

Revista Argentina de Agrometeorología

ISSN 2545-8418

Editada por la
Asociación Argentina
de Agrometeorología

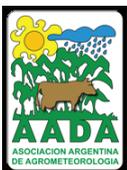
Revista Digital | Volumen XIII | Año 2022



Revista Argentina de

AGROMETEOROLOGIA

Volumen XIII. AÑO 2022



Asociación Argentina de Agrometeorología

Comisión Directiva

Presidente: Andrea Inés Irigoyen

Vicepresidente: Antonio de la Casa

Secretaria: Marisa Gloria Cogliati

Prosecretaria: Andrea del Valle Rivarola

Secretaria de Actas: Ana Beatriz Wingeyer

Tesorero: Angél Domingo Blasón

Protesorero: Matías A. Cambareri

Vocales Titulares: Leonardo Ariel Serio

Silvia Ana C. Cravero

Vocales Suplentes: Patricia Irene Figuerola

Guillermo Rondán

Revista Argentina de

AGROMETEOROLOGÍA

Director: Pedro Enrique Boletta

Comité Editor

Coordinador: Andrés C. Ravelo

Integrantes del Comité Editor

Antonio de la Casa

Patricia Figuerola

Denice Fontana

Andrea Irigoyen

Mario Murphy

Olga Penalba

Ana María Planchuelo

Andrés C. Ravelo

Rafael Rodríguez

Roberto Seiler

Leonardo Serio

Marta Vinocur

RADA

REVISTA ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGÍA

Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos

Agrícolas y Naturales (CREAN)

Ing. Agr. Félix Aldo Marrone 746 - C.C. 509 - C.P. 5000

Ciudad de Córdoba - ARGENTINA

www.crean.unc.edu.ar /

<https://www.siteaada.org/revista-de-la-aada>

Email: pecbol@gmail.com

Revisores

Dr. Gustavo Ovando, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Univ. Nac. de Córdoba, Argentina

Dr. Antonio de la Casa, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Univ. Nac. de Córdoba, Argentina

Ing. (M. Sc.) Pedro Enrique Boletta, Fac. de Ciencias Forestales, Univ. Nac. de Santiago del Estero, Argentina

Ing. (M. Sc.) Liliana Spescha, Facultad de Agronomía, Univ. de Buenos Aires, Argentina

Ing. (M. Sc.) Angel Blason, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Argentina

Dr. Roberto Zanvettor, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Univ. Nac. de Córdoba, Argentina

Dra. Alejandra Coronel, Facultad de Ciencias Agrarias, Univ. Nac. de Rosario, Argentina

M. Sc. María Elena Fernández Long, Facultad de Agronomía, Univ. de Buenos Aires, Argentina

Dr. César Augusto Aguirre, Facultad de Ciencias Agrarias, Univ. Nac. de Entre Ríos, Argentina

Nota Editorial

En mi carácter de director de RADA, deseo expresar mi sentido pesar por el fallecimiento de quien fuera uno de los socios vitalicios de la AADA, el Ing. Agr. (M. Sc.) Víctor Rotondo. El Volumen XIII está integrado por cinco trabajos. Los trabajos consideran distintos aspectos de interés en la Agrometeorología, de los cuales dos se refieren a distintos aspectos de los sistemas productivos y los otros tres están relacionados indirectamente al cambio climático y como esta situación repercute en la producción.

Con gran satisfacción les informamos que nuestra revista es muy visitada en la pestaña incluida a comienzos del año 2020 en la nueva página web de la AADA. A partir de dicho año se puede consultar los volúmenes publicados de RADA en el sitio de la página web de la AADA (<https://www.siteaada.org/revista-de-la-aada>) en la pestaña que posee la Revista, se encuentran todos los volúmenes publicados hasta la fecha y son de libre acceso. Desde este sitio se puede descargar el volumen completo de RADA y los trabajos en forma individual en formato PDF y también los resúmenes en español y en inglés.

Además, se comunica que la Comisión Directiva de la AADA ha dispuesto desde el año 2021 que los autores puedan publicar sin costo en nuestra revista, sean o no socios de la AADA.

Considero importante seguir insistiendo con la solicitud a nuestra comunidad de agrometeorólogos de publicar sus investigaciones en RADA ya sean como trabajos completos o comunicaciones. Para mantener, de esta forma, la continuidad de la publicación de la revista como un medio de difusión científica de los aportes de la Agrometeorología al desarrollo sustentable de nuestro país.

Ing. Ftal (M Sc.) Pedro Enrique Boletta
Director RADA

CONTENIDO

Estimación de la anomalía del rendimiento de maíz a partir de componentes principales de índices espectrales en la región agrícola de secano de Córdoba, Argentina DE LA CASA, A.; G. OVANDO; G. DÍAZ; P. DÍAZ Y F. SOLER	1
Comparación del funcionamiento de las sondas Diviner 2000, EC-5 y CS620 para determinar el contenido de agua en el suelo BLASÓN, A. D.; M. B. BARRIOS Y A. MOLLÁ KRALI	15
Variabilidad climática de la precipitación, temperatura y de sus eventos extremos en el sur de Santa Fe ANIBALINI, V.; M. J. DICKIE; J. GASTAUDO Y C. CORONEL.....	23
Fluctuación de la napa freática y la productividad de alfalfa, en la localidad de Marcos Juárez, ecorregión pampeana centro, Argentina MARTÍN, B. Y A. CORONEL.....	31
Índices climáticos de precipitación y temperatura de San José de Metán, Salta, Argentina VÁZQUEZ, V. N.; S. M. VARGAS Y E. VISENTINI	39
Normas para la presentación de trabajos en la Revista de la Asociación de Agrometeorología (RADA) en formato digital.....	47

Estimación de la anomalía del rendimiento de maíz a partir de componentes principales de índices espectrales en la región agrícola de secano de Córdoba, Argentina

de la Casa, A.; Ovando, G.; Díaz, G.; Díaz, P. y Soler, F.

RESUMEN

Distintos indicadores espectrales obtenidos durante el ciclo de cultivo de maíz (*Zea mays* L.) se transformaron a partir del Análisis de Componentes Principales (ACP) para estimar la anomalía del rendimiento (ARMz) en Córdoba, Argentina, entre 2000 y 2018. Luego de corroborar la condición de multicolinealidad de los registros espectrales, se estimó ARMz aplicando el Análisis de Regresión Múltiple (AnReMu) convencional en sus tres modos característicos: i) Empleando todas las variables; ii) Con selección hacia adelante y iii) Con selección hacia atrás, para obtener modelos cuyos R^2 alcanzaron valores de 0,658, 0,609 y 0,596, respectivamente. Realizado el ACP se reiteró el AnReMu al conjunto de los primeros 6 CP para estimar ARMz y se estableció que todos los coeficientes contribuyen de manera significativa para explicar la variabilidad, si bien el modelo alcanza un R^2 de sólo 0,53. La menor performance del modelo de CP se explica porque otros factores que contribuyen en menor proporción a la variabilidad total presentan correlaciones también elevadas con ARMz. Aplicando AnReMu con selección hacia adelante al conjunto de CP, se obtuvo un modelo de 11 términos significativos con un R^2 de 0,628, similar al ajuste de los modelos que usan datos espectrales.

Palabras clave: NDVI; LST; TVDI

de la Casa, A.; Ovando, G.; Díaz, G.; Díaz, P. and Soler, F., 2022. Corn yield anomaly estimation from principal components of spectral indices in the rainfed agricultural region of Córdoba, Argentina RADA XIII: 1-14

SUMMARY

Different spectral indicators obtained during the corn (*Zea mays* L.) crop cycle were transformed from the Principal Component Analysis (PCA) to estimate the yield anomaly (ARMz) in Córdoba, Argentina, between 2000 and 2018. After corroborate the multicollinearity condition of the spectral records, ARMz was estimated by applying the conventional Multiple Regression Analysis (AnReMu) in its three characteristic modes: i) Using all the variables; ii) With forward selection and iii) With backward selection, to obtain models whose R^2 reached values of 0.658, 0.609 and 0.596, respectively. Once the PCA was

carried out, the AnReMu was reiterated to the set of the first 6 PCs to estimate ARMz and it was established that all the coefficients contribute significantly to explain the variability, although the model reaches an R^2 of only 0.53. The lower performance of the CP model is explained by the fact that other factors that contribute to a lesser extent to the total variability present also high correlations with ARMz. Applying AnReMu with forward variable selection to the CP set, a model of 11 significant terms with an R^2 of 0.628 was obtained, similar to the fit of models using spectral data.

Key words: NDVI; LST; TVDI

de la Casa, A.; Ovando, G.; Díaz, G.; Díaz, P. y Soler, F.: Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Ing. Agr. Félix Aldo Marrone 746, Ciudad Universitaria. (5000) Córdoba, Argentina. Correspondencia a: delacasa@agro.unc.edu.ar

INTRODUCCIÓN

En razón de la influencia determinante de las condiciones climáticas y su variabilidad tanto anual como interanual sobre la productividad agrícola (Lobell *et al.*, 2007), es usual que las herramientas empleadas para pronosticar el rendimiento utilicen información meteorológica/climática a fin de expresar el grado de satisfacción de los requerimientos de energía y agua de un cultivo (Cai *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2016; Drecker *et al.*, 2018). No obstante, también es factible para tal propósito recurrir a datos radiométricos que exponen tanto el estado y vigor de la vegetación (Seo *et al.*, 2019), como de las condiciones térmicas e hídricas prevalentes (Doraiswamy *et al.*, 2005; Lobell, 2013; Johnson, 2016; Liu *et al.*, 2020). En contraposición al carácter puntual de los datos meteorológicos, la información remota ofrece la ventaja tanto del carácter espacial de los datos como de la visión sinóptica de cada escena. Con el apoyo de procedimientos multivariados y de inteligencia artificial, algunos estudios también combinan ambas fuentes de información a los efectos de estimar la variabilidad interanual del rendimiento (Cai *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2021).

A los efectos de realizar pronósticos estacionales del rendimiento de los cultivos han sido propuestos procedimientos con distinto nivel de complejidad (Basso and Liu, 2019). Una alternativa cada vez más generalizada es recurrir directa e indirectamente al uso de indicadores espectrales (IVe) para representar el estado y condición de los cultivos. El análisis de regresión que emplea los registros de rendimiento como información dependiente y los IVe como variables independientes constituye un método habitual,

utilizando a tal efecto el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) (Mkhabela *et al.*, 2011; Nagy *et al.*, 2018), el Índice de Vegetación Mejorado de dos bandas (EVI2) (Bolton and Friedl, 2013; Liu *et al.*, 2020), el Índice de Agua de la Diferencia Normalizada (NDWI) (Bolton and Friedl, 2013) o el Índice de Vegetación de Rango Dinámico Amplio (WDRVI) (Sakamoto, 2020). Por su parte, Johnson (2014) estableció que los valores diurnos de la temperatura superficial de la tierra (LST), además de presentar una señal de respuesta especular a la del NDVI durante la temporada de cultivo, se correlacionaron negativamente con los rendimientos de maíz y de soja. Asimismo, Holzman and Rivas (2016) realizaron un pronóstico temprano del rendimiento de maíz a partir del Índice de Sequía de Temperatura de la Vegetación (TDVI), que se calcula empleando el espacio aproximadamente triangular establecido por la relación entre NDVI y LST.

El análisis de componentes principales (ACP) es una técnica multivariada que ha sido utilizada con múltiples propósitos (Jolliffe, 2002): estimar y pronosticar la productividad agrícola, tanto con información meteorológica (Cai *et al.*, 2013; Verma *et al.*, 2016) como empleando datos multiespectrales y multitemporales de reflectancia (Chang *et al.*, 2003); determinar la distribución territorial de la sequía (Mathbout *et al.*, 2018) o para diferenciar las distintas zonas de manejo en un lote (Peralta *et al.*, 2015). Dos argumentos que justifican el uso de ACP son, por una parte, la posibilidad de restringir el número de variables predictoras y, por la otra, evitar la multicolinealidad entre ellas, es decir la fuerte correlación que puede existir entre el conjunto de variables explicativas de un modelo. Tanto la cantidad de

variables sometidas a análisis como la correlación entre ellas es un problema recurrente cuando se analiza información meteorológica (Verma *et al.*, 2016). La Regresión sobre Componentes Principales (RCP) es un método apropiado para superar ambas limitaciones, ya que las variables originales se transforman en un nuevo conjunto de factores no correlacionados entre sí denominados componentes principales (CP). Además, esta transformación organiza las variables ortogonales obtenidas por orden de importancia de acuerdo a la contribución que ofrecen en el modelo, y el procedimiento implica eliminar algunas de dichas componentes para lograr una reducción de la varianza.

Meyer *et al.* (1991) utilizaron el ACP para evaluar la relación entre indicadores de sequía de Palmer (PDSI y CMI) y el rendimiento de maíz en las Grandes Planicies y el Medio Oeste de los Estados Unidos. Por su parte, Cai *et al.* (2013) desarrollaron indicadores climáticos a partir del ACP basados en tres componentes que aplican posteriormente para estimar el rendimiento de los cultivos de maíz y soja sometidos a escenarios climáticos futuros. Identificaron la heterogeneidad espacial de las respuestas del rendimiento de los cultivos al cambio climático en varios estados del Norte y Sur de EE. UU.

Utilizando ACP Schillerberg *et al.* (2019) establecieron que los primeros 5 componentes principales explican 79% y 72% de la variabilidad de las anomalías de rendimiento de los cultivos de maíz y trigo de invierno, respectivamente, y que el primer CP de la variabilidad del rendimiento de los cultivos está fuertemente asociado con la Oscilación Multidecadal Atlántica (AMO). Por su parte, El Niño Oscilación Sur (ENSO) es el fenómeno de interacción entre el Océano Pacífico ecuatorial y la atmósfera que controla las condiciones meteorológicas en gran parte de las principales regiones agrícolas del mundo (Iizumi *et al.*, 2014; Anderson *et al.*, 2017). En la provincia de Córdoba esta oscilación climática influye sobre el régimen de lluvias (de la Casa *et al.*, 2019b) y, por su condición de persistencia, es factible anticipar su impacto sobre el rendimiento de los cultivos de secano desde el mes de agosto, inmediatamente antes del comienzo de la siembra de maíz y soja en la región (de la Casa *et al.*, 2021).

El objetivo de este trabajo fue estimar la anomalía del rendimiento del cultivo de maíz en la región de secano de la provincia de Córdoba, Argentina, empleando un conjunto de datos e indicadores espectrales de MODIS mediante el análisis de componentes principales.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Región en estudio

La región en estudio comprende el territorio Central, Sur y Sudeste de la provincia de Córdoba, cuya ubicación geográfica muestra la Figura 1. La Figura presenta la división política provincial y señala la distribución espacial de los 11 principales departamentos productores de maíz de secano en la región. Las condiciones edafoclimáticas del territorio permiten el desarrollo de la producción agrícola de secano. Los principales suelos corresponden a Haplustoles y Arguiduoles que, en general, son profundos y bien drenados. El clima de la región se clasifica como templado, con temperaturas promedio en verano de aproximadamente 23,5°C en tanto que la temperatura promedio en invierno ronda los 8°C. La precipitación se concentra en primavera y verano, con un valor promedio anual de alrededor de 800 mm (Jarsún *et al.*, 2003; Meade *et al.*, 2016; Aliaga *et al.*, 2017). Los principales cultivos en esta área, que en su mayoría se realizan bajo sistema de siembra directa, corresponden a soja, maíz y, en menor medida, trigo. El cultivo de maíz en la provincia de Córdoba ocupa actualmente alrededor de 3 millones de hectáreas (BCCBA, 2022).

2. Datos de rendimiento de maíz

Los datos de rendimiento de maíz, entre 2000 y 2018, para los 11 principales departamentos de producción de secano de la provincia de Córdoba fueron proporcionados por el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de Argentina (MAGyP, 2020). Estos datos de rendimiento se expresaron en términos de la anomalía (ARMz) que se obtuvo, como muestra la Figura 2 para el departamento Marcos Juárez, haciendo la diferencia entre el rendimiento de cada departamento y año (RMz_{di}) y un valor de índole tecnológico (T_{di}). En este caso, el aporte tecnológico se consideró a partir de la recta de regresión lineal entre los datos de rendimiento y el tiempo (años). Tanto en Marcos Juárez como para el resto de los departamentos, las pendientes lineales no presentan un incremento o decrecimiento significativo, de modo que la línea de tendencia se aproxima al valor medio. A partir de este comportamiento se interpreta que la base tecnológica del cultivo de maíz se ha mantenido relativamente constante en la región a lo largo de los primeros años del siglo XXI.

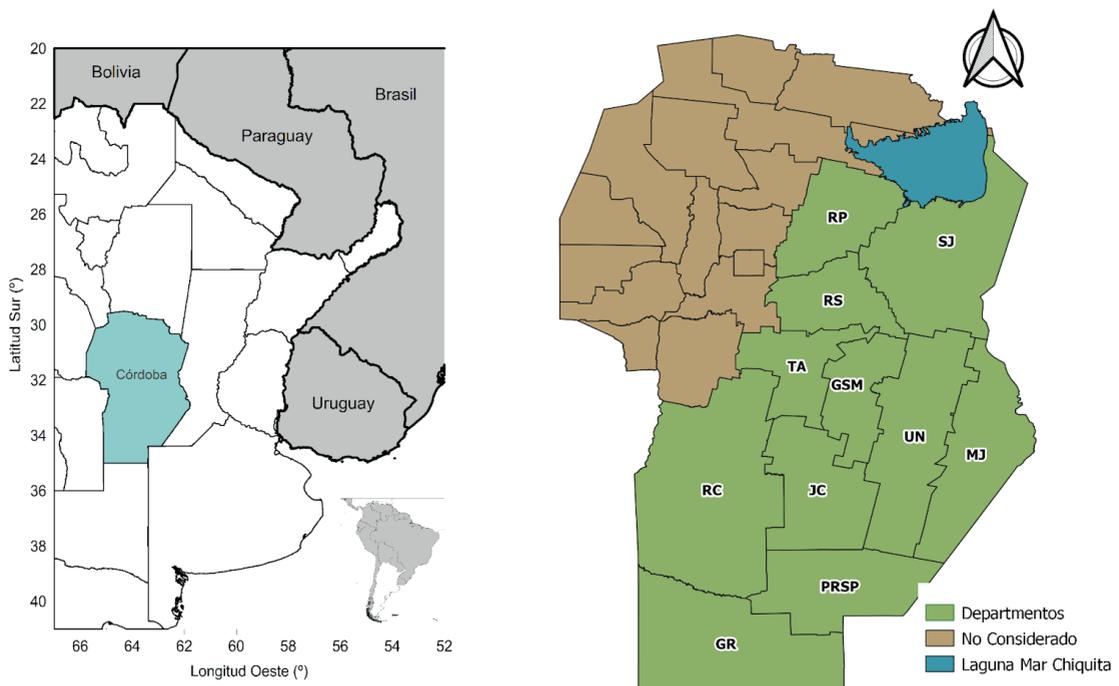


Figura 1. Departamentos de la provincia de Córdoba que integran la región de producción de maíz de secano. Departamentos: RP=Río Primero, SJ=San Justo, RS=Río Segundo, TA=Tercero Arriba, GSM= General San Martín, UN= Unión, MJ= Marcos Juárez, RC= Río Cuarto, JC= Juárez Célman, PRSP= Presidente Roque Sáenz Peña, GR= General Roca.

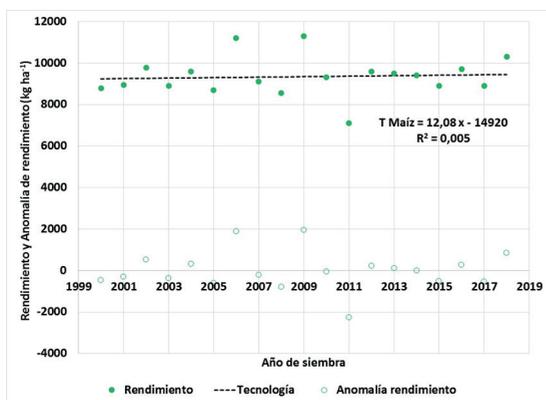


Figura 2. Rendimientos de maíz, valores de la tendencia calculada a partir de una regresión lineal para representar la influencia del aporte tecnológico de largo plazo y la anomalía del rendimiento de maíz para el departamento de Marcos Juárez entre 2000 y 2018.

3. Datos radiométricos

3.1 Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) y temperatura de superficie de la tierra (LST).

En este estudio se utilizaron datos de NDVI y registros diurnos de LST correspondientes a períodos mensuales. La fuente de estos datos

son los productos MOD13C2 y MOD11C3, respectivamente, derivados del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA. Para cubrir la extensión completa del ciclo de cultivo en la región, el análisis comprende el periodo desde octubre de un año hasta abril del siguiente.

3.2 Índice de Sequía de la Temperatura de la Vegetación (TVDI)

A partir del espacio triangular conformado por los datos de NDVI y LST también se obtuvo, de acuerdo al esquema de cálculo propuesto por Sandholt *et al.* (2002), el Índice de sequía de temperatura de la vegetación (TVDI), que fue utilizado para representar la disponibilidad de agua y estimar el rendimiento de maíz (Holzman and Rivas, 2016).

4 Datos del ENSO

Dos conjuntos de datos se utilizaron como proxy del ENSO: i) el Índice de Oscilación Sur (SOI), una señal atmosférica relacionada con la variabilidad de las precipitaciones y el NDVI en la provincia de Córdoba (de la Casa y Ovando, 2006; de la Casa *et al.*, 2019b) y ii) la anomalía de temperatura

superficial del mar (ATSM) en la región El Niño 3.4 (de la Casa *et al.*, 2021).

4.1. Datos SOI

El SOI representa la anomalía de la variación de la presión atmosférica en Tahití y Darwin, dos sectores opuestos del Océano Pacífico tropical (Chowdhury and Beecham, 2010). La serie de tiempo SOI se obtuvo de la Oficina de Meteorología del Gobierno de Australia (Bureau of Meteorology, 2019). De acuerdo a la Oficina Meteorológica de Australia, mientras los valores de SOI negativos que se sostienen por debajo de -8 indican episodios de El Niño, los valores de SOI positivos por encima de +8 son típicos de los episodios La Niña. Los valores de SOI entre ambos límites se consideran casos neutrales.

4.2 Datos de Anomalía de la Temperatura de la Superficie del Mar (ATSM)

Debido a que el término El Niño (La Niña) se refiere al calentamiento (enfriamiento) extenso que experimenta el Océano Pacífico tropical central y oriental, otra forma de describir la oscilación entre las fases El Niño y La Niña es utilizando la temperatura de la superficie del mar y, de manera más específica, su anomalía respecto a un valor medio de referencia (Barnston *et al.*, 1997). Diferentes ubicaciones geográficas se han propuesto como regiones del origen de la señal. En este caso, se utilizan datos de la región de El Niño 3.4 (5° N – 5° S, 120-170° W), en tanto la fuente de datos es la misma que para SOI. Valores persistentes inferiores a -0,8 °C son típicos de La Niña, mientras valores persistentes superiores a +0,8 °C corresponden a los episodios El Niño.

5. Procedimientos de análisis

El análisis de componentes principales (ACP) se aplicó para integrar la información radiométrica durante toda la extensión del ciclo de cultivo y evaluar su contribución particular sobre la variabilidad interanual de la anomalía del rendimiento de maíz en la región. A tal efecto, se obtuvieron y compararon modelos de estimación obtenidos del AnReMu que utilizan alternativamente los datos radiométricos originales y los factores que produce el ACP. Además, el ACP se aprovechó también en su capacidad de clasificación para evaluar la dependencia de la información espectral con respecto a la señal de teleconexión que el ENSO origina en la región de estudio.

En primer término se realizó el AnReMu al conjunto completo de datos e información espectral y los resultados se enmarcaron en una evaluación regional. A los efectos de obtener modelos lineales para estimar la anomalía de rendimiento de maíz, el procedimiento se aplicó haciendo uso de sus 3 alternativas: i. Incorporando todas las variables (21); ii. Haciendo una selección de variables hacia adelante (en cada paso el modelo incorpora una variable al conjunto de predictores que satisface ciertas restricciones estadísticas); y iii. Haciendo una selección de variables hacia atrás (en cada paso el modelo elimina una variable del conjunto de predictores que no satisface ciertas restricciones estadísticas).

Posteriormente, se aplicó el análisis de componentes principales (ACP) a la base de datos integrada por el conjunto de indicadores (NDVI, TDVI y LST), donde los 7 meses del ciclo de cultivo dieron lugar a las columnas (7x3) y los años analizados (19) en los 11 departamentos que integran la región a las filas de la matriz. La estructura de variabilidad se exploró a partir de los autovalores o elementos de la matriz de correlación y el conjunto de variables analizadas y suplementarias (no interviene en la determinación) se describieron a partir del plano factorial integrado por el primer y segundo factor (componente). El método de "scree" (resto) se utilizó para retener los factores de interés que se emplearon luego en el análisis de regresión múltiple (ARM). Asimismo, los modelos obtenidos del ARM se constituyeron empleando factores sólo de carácter significativo.

Finalmente, a partir de los CP obtenidos se procedió a obtener modelos de regresión múltiple para estimar ARMz aplicando el AnReMu. En primer término se emplearon sólo los CP que surgen del método "scree" y, por último, apelando al procedimiento de selección de factores hacia delante.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Multicolinealidad en los datos e indicadores espectrales.

La Tabla 1 contiene los coeficientes de correlación entre los datos e indicadores espectrales evaluados en el estudio a escala mensual, clasificados siguiendo un criterio colorimétrico para facilitar su evaluación. Los valores analizados se extienden entre los meses de octubre y abril del año siguiente, periodo que abarca en su totalidad el ciclo de cultivo de maíz

en la región, desde la etapa que precede a la siembra hasta la posterior a su final. Mientras la relación del NDVI, tanto con LST como con TVDI, se presenta inversa en términos generales (Johnson, 2014; Johnson, 2016), ya que la acumulación de biomasa de acuerdo a la señal del NDVI se reduce en respuesta a la intensidad del estrés hídrico, la que se suscita entre ambos indicadores de estrés, en cambio, resulta de carácter positiva. Este resultado es congruente porque la interpretación física de ambas expresiones es análoga. El incremento de LST expresa una condición de estrés asociada a la falta de agua en la medida que, para una situación particular del balance de energía, el aumento térmico se interpreta que ocurre como consecuencia de haber disminuido la capacidad refrigerante que promueve el proceso de evapotranspiración del cultivo. Por su parte, la influencia de la falta de agua sobre la temperatura

del cultivo en el caso de TVDI es ponderada de acuerdo a la condición de cobertura del suelo que presenta el cultivo, en relación directa con el valor de NDVI (Moran *et al.*, 1994; de la Casa *et al.*, 2013).

Dentro de cada mes LST está más correlacionada con TDVI que con NDVI (con valores de r superiores a 0,72). La relación NDVI - TDVI presenta la correlación más elevada ($r = -0,887$) en enero, siendo los valores de r más bajos tanto al comienzo de la estación de cultivo (octubre), como al final (marzo - abril). Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Sun and Kafatos (2007) en Estados Unidos, que determinaron el valor de r más negativo (-0.89) en el mes de julio. En tal sentido, Karnieli *et al.* (2010) al analizar el espacio triangular/trapezoidal entre LST-NDVI, a partir de datos de bimestrales encontraron dos grandes grupos de puntos: uno con la típica pendiente

Tabla 1. Mapa de color del coeficiente de correlación (r) entre los valores mensuales de los datos e indicadores espectrales (NDVI, LST y TVDI) durante el ciclo de maíz en Córdoba, Argentina.

	NDVI						LST						TVDI													
	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr					
NDVI	1,00																									
nov	0,84	1,00																								
dic	0,14	0,35	1,00																							
ene	0,03	0,09	0,57	1,00																						
feb	-0,36	-0,45	-0,06	0,58	1,00																					
mar	-0,33	-0,42	-0,42	0,09	0,70	1,00																				
abr	0,07	0,02	-0,45	-0,31	0,05	0,60	1,00																			
LST	-0,65	-0,64	-0,11	-0,08	0,34	0,38	0,16	1,00																		
nov	-0,58	-0,79	-0,26	-0,28	0,17	0,15	-0,20	0,54	1,00																	
dic	-0,21	-0,27	-0,70	-0,45	0,06	0,31	0,19	0,14	0,29	1,00																
ene	-0,11	-0,21	-0,41	-0,89	-0,55	-0,20	0,10	0,14	0,43	0,42	1,00															
feb	0,35	0,40	0,04	-0,42	-0,75	-0,57	-0,01	-0,19	-0,21	0,00	0,43	1,00														
mar	0,15	0,03	0,27	-0,08	-0,38	-0,64	-0,52	-0,03	0,26	-0,21	0,31	0,46	1,00													
abr	-0,14	-0,24	0,09	-0,10	-0,08	-0,30	-0,51	0,22	0,54	0,15	0,21	0,28	0,53	1,00												
TVDI	-0,25	-0,32	-0,12	-0,01	0,23	0,29	0,29	0,77	0,26	0,10	0,08	0,01	-0,01	0,05	1,00											
nov	-0,29	-0,58	-0,21	-0,21	0,09	0,13	-0,11	0,36	0,85	0,16	0,37	-0,12	0,34	0,38	0,30	1,00										
dic	-0,25	-0,26	-0,52	-0,33	0,08	0,30	0,25	0,26	0,22	0,88	0,32	0,11	-0,21	0,13	0,30	0,16	1,00									
ene	0,00	-0,11	-0,35	-0,77	-0,52	-0,14	0,18	0,18	0,38	0,40	0,87	0,55	0,32	0,33	0,19	0,40	0,39	1,00								
feb	0,25	0,20	-0,10	-0,43	-0,58	-0,43	-0,03	-0,11	0,09	0,23	0,55	0,79	0,51	0,27	0,04	0,17	0,22	0,64	1,00							
mar	0,09	-0,03	0,24	0,11	-0,12	-0,36	-0,44	0,12	0,25	-0,11	0,13	0,22	0,79	0,35	0,09	0,37	-0,10	0,21	0,41	1,00						
abr	-0,16	-0,21	0,11	0,06	0,13	-0,04	-0,15	0,37	0,31	0,13	0,04	0,17	0,27	0,73	0,31	0,23	0,25	0,19	0,17	0,26	1,00					



negativa, indicando condiciones de crecimiento vegetal limitado por el contenido de humedad del suelo, y una segunda clase con una pequeña pendiente positiva que muestra poca variabilidad de LST en todo el rango de NDVI, por lo que el valor de correlación general estaría influenciado por las proporciones de estos dos grupos presentes en el área de estudio.

Otro aspecto para destacar de la Tabla 1 es el predominio de los valores de correlación de carácter significativo, particularmente cuando las variables se contrastan entre sí. El análisis entre los distintos meses del ciclo para el mismo indicador, en cambio, tiende a producir correlaciones más elevadas sólo con respecto al mes subsecuente. De esta manera, se manifiesta con claridad la condición de multicolinealidad que presenta este conjunto de variables espectrales, especialmente cuando su propósito es servir de información independiente en un modelo de estimación o predicción del rendimiento.

2. Estimación de la productividad de maíz para la región de secano a partir de los datos e indicadores espectrales.

Los datos e indicadores espectrales mensuales (LST, NDVI y TVDI) en una primera etapa se emplean directamente como variables independientes en un análisis clásico de regresión múltiple. A tal efecto, el procedimiento se aplicó primero considerando la influencia de todas las variables independientes y, luego, realizando una selección estadística de variables hacia adelante (incorporando) y hacia atrás (descartando). Los resultados obtenidos a partir del conjunto completo de datos e indicadores espectrales muestran en la Tabla 2 que la sumatoria de términos lineales explica alrededor de 65,6% de la variabilidad de la anomalía del rendimiento de maíz, aunque sólo 7 de ellas, además de la ordenada al origen, alcanzan un carácter significativo ($p < 0,05$). La inclusión de todas las variables modifica los grados de libertad del Análisis de Varianza (ANAVA) y reduce el valor del ajuste, como lo señala el R^2 aj ligeramente más bajo (0,617).

La interpretación causal de los términos significativos del modelo lineal se presenta confusa. Asociado a la estimación del volumen de biomasa presente, mientras el NDVI en noviembre tiene un coeficiente negativo incongruente con respecto a la anomalía de rendimiento, el de diciembre, en cambio, resulta positivo y es más razonable para explicar las variaciones de la productividad del

maíz. Por su parte, la información de LST en los meses de enero, febrero y marzo corresponde a coeficientes de signo negativo, de modo que el aumento de la temperatura durante este lapso tiende a producir anomalías negativas de rendimiento en respuesta a una situación de estrés hídrico en las etapas reproductivas del cultivo de maíz. El TVDI en febrero y marzo, por el contrario, es otro indicador de estrés hídrico que muestra una inesperada contribución positiva sobre el rendimiento.

Tabla 2. Intercepción y coeficientes de regresión (b) con su error estándar de estimación y los valores de t de Student con su valor de probabilidad (p) del modelo de regresión múltiple para estimar la anomalía de rendimiento de maíz en la región de secano de Córdoba.

	<i>b</i>	<i>Std.Err.</i>	<i>t(187)</i>	<i>Valor de p</i>
Intercepción	225548,8	54911,01	4,10753	0,000060
NDVI_oct	1989,4	1855,37	1,07226	0,284985
NDVI_nov	-6430,7	2937,00	-2,18954	0,029796
NDVI_dic	5568,9	1625,37	3,42623	0,000752
NDVI_ene	-4372,7	2351,40	-1,85962	0,064511
NDVI_feb	-4095,1	2568,46	-1,59438	0,112541
NDVI_mar	2035,4	2754,42	0,73894	0,460868
NDVI_abr	4125,1	2149,33	1,91924	0,056476
LST_oct	-60,0	55,91	-1,07396	0,284225
LST_nov	3,0	99,97	0,02954	0,976465
LST_dic	83,9	76,02	1,10374	0,271122
LST_ene	-299,8	78,40	-3,82425	0,000179
LST_feb	-230,8	95,66	-2,41262	0,016804
LST_mar	-213,4	85,25	-2,50268	0,013183
LST_abr	-35,7	84,55	-0,42212	0,673424
TVDI_oct	1868,1	1006,07	1,85684	0,064907
TVDI_nov	494,1	1708,10	0,28925	0,772708
TVDI_dic	-2468,1	1622,82	-1,52087	0,129982
TVDI_ene	-1347,3	1250,47	-1,07747	0,282659
TVDI_feb	2991,5	1354,61	2,20843	0,028430
TVDI_mar	3937,8	1378,78	2,85599	0,004776
TVDI_abr	538,1	1088,67	0,49429	0,621680

Por su parte, el AnReMu que realiza la selección de variables hacia adelante (con un valor del estadístico F de Fisher para entrar de 4 y un F para sacar de 1), de acuerdo a los resultados de la Tabla 3, excluye por completo las variables que no presentan una contribución significativa en la variabilidad de la anomalía productiva. Esta reducción de la base de información tiene el costo de disminuir ligeramente el R^2 a 0,608. No obstante, la extracción de información poco explicativa de la variabilidad no modifica sustancialmente el R^2 ajustado del modelo completo, que alcanza en este caso un valor de 0,596.

Tabla 3. Intercepción y coeficientes de regresión (b) con su error estándar de estimación y los valores de t de Student con su valor de probabilidad (p) del modelo de regresión múltiple que selecciona las variables hacia adelante para estimar la anomalía de rendimiento de maíz en la región de secano de Córdoba.

	b	Std.Err.	t(201)	Valor de p
<i>Intercepción</i>	133890,4	19110,00	7,00630	0,000000
<i>LST_ene</i>	-242,1	27,72	-8,73368	0,000000
<i>LST_abr</i>	-69,2	34,14	-2,02677	0,044007
<i>LST_nov</i>	79,0	34,19	2,31075	0,021861
<i>NDVI_dic</i>	2995,8	804,47	3,72393	0,000255
<i>NDVI_abr</i>	5189,0	1007,09	5,15247	0,000001
<i>LST_feb</i>	-229,5	62,26	-3,68563	0,000293
<i>TVDI_feb</i>	2888,4	947,92	3,04713	0,002621

Finalmente, el AnReMu con el método de selección hacia atrás produce un modelo de estimación más parsimonioso que incluye, además de la constante, a otros 5 términos lineales (Tabla 4). Mientras el NDVI en diciembre y abril presenta una contribución positiva sobre la productividad, los valores de temperatura de superficie (LST) de enero y febrero exponen una correlación negativa que, asociada a la condición de estrés hídrico durante periodos críticos del cultivo, explica la ocurrencia de mermas en el rendimiento. Más difícil de justificar resulta la relación directa de TVDI con la anomalía del rendimiento ya que se trata, al igual que LST, de un indicador de estrés hídrico. Es interesante destacar que la extracción de 2 variables no modifica sustancialmente el valor de R^2 ni de R^2 aj (0,5964 y 0,5864, respectivamente) que produce el modelo con selección hacia adelante, poniendo en evidencia la menor importancia predictiva de LST en los meses de noviembre y abril.

Tabla 4. Intercepción y coeficientes de regresión (b) con su error estándar de estimación y los valores de t de Student con su valor de probabilidad (p) del modelo de regresión múltiple que selecciona las variables hacia atrás para estimar la anomalía de rendimiento de maíz en la región de secano de Córdoba.

	b	Std.Err.	t(203)	Valor de p
<i>Intercepción</i>	157723,3	14485,13	10,88863	0,000000
<i>NDVI_dic</i>	2941,8	803,17	3,66281	0,000318
<i>NDVI_abr</i>	5662,1	853,93	6,63067	0,000000
<i>LST_ene</i>	-209,0	23,36	-8,94710	0,000000
<i>LST_feb</i>	-331,5	45,66	-7,25938	0,000000
<i>TVDI_feb</i>	3596,3	904,57	3,97573	0,000098

La incorporación preferencial de variables relacionadas a la condición de estrés hídrico es consistente con la propuesta de Meyer *et al.* (1991), que utilizaron como variables independientes de sus modelos predictivos a indicadores de sequía (Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) e Índice de Humedad del Cultivo (CMI)) para

analizar la variación del rendimiento de maíz en regiones de secano de USA. Al igual que en el área en estudio, la disponibilidad de agua constituye la principal limitante de la productividad agrícola (Bodner *et al.*, 2015; Rattalino Edreira *et al.*, 2018; de la Casa *et al.*, 2019a).

3. Estimación de la productividad de maíz para el conjunto de la región de secano a partir de los componentes principales

Visto el alcance del AnReMu para estimar la anomalía de rendimiento de maíz empleando directamente información de origen satelital, se analiza ahora el procedimiento análogo pero utilizando las nuevas variables ortogonales que suscita el ACP. Aplicada la transformación de CP al conjunto de 21 variables objeto del análisis se obtiene la información de la Tabla 5, que resume y ordena la proporción de variabilidad explicada por cada uno de los autovalores. Considerando que la variabilidad total corresponde al conjunto de 21 variables transformadas (la suma del porcentaje de cada una totaliza 100% de la variabilidad), mientras los primeros factores que extrae el análisis muestran una contribución notablemente más importante, los últimos, en cambio, explican una proporción de la variabilidad sólo residual. Para la región de producción de maíz de secano de Córdoba los primeros 7 factores explican aproximadamente 90% de la variabilidad y, de esta forma, el procedimiento lograría en principio reducir a un tercio el conjunto de variables candidatas originales.

Como muestra la Tabla 5, el número de CP o factores seleccionados que fueron utilizados posteriormente para el AnReMu de acuerdo a la prueba "scree" (Cattell, 1966) corresponde a 6, que comprende 85,6% de la varianza total. Precisamente, el criterio que se aplica en este caso es retener para el análisis posterior sólo los autovalores mayores a 1.

Tabla 5. Autovalores y variabilidad total y acumulada para las variables (3 x 7) del análisis regional.

	Autovalores	% Variabilidad total	Autovalores acumulados	% Variabilidad total acumulada
1	5,487	26,128	5,487	26,128
2	4,988	23,752	10,475	49,880
3	3,533	16,826	14,008	66,706
4	1,564	7,449	15,573	74,155
5	1,388	6,611	16,961	80,767
6	1,012	4,817	17,973	85,584
7	0,751	3,577	18,724	89,161

Como muestra la Figura 3a, la mayor correlación del primer factor se presenta en el mes de enero, tanto para la variable LST (-0,805) como para TVDI (-0,824), señalando en ambos casos que el primer CP se encuentra ligado a factores de riesgo por estrés hídrico en un momento del ciclo que resulta particularmente sensible para el maíz. Por su parte, el segundo CP presenta la correlación más alta para los valores de NDVI en los meses de febrero (0,799) y marzo (0,848). De esta forma, de acuerdo tanto a LST como a TVDI se interpreta que un eventual episodio de estrés hídrico durante etapas sensibles a la falta de agua como el comienzo de las fases reproductivas en maíz (panojamiento, polinización y fecundación), repercute de manera negativa no sólo sobre el rendimiento, sino que estaría asociado también a una merma en la acumulación de biomasa.

Por su parte, la introducción de la anomalía de rendimiento (ARMz) a la representación gráfica como una variable suplementaria (no participa de la transformación), de acuerdo a la Figura 3b muestra una vinculación consistente con la estructura de variabilidad de los datos en el espacio factorial determinado por los dos primeros factores. En un sentido explicativo, presenta una aproximación positiva tanto con respecto a los valores de NDVI (asociada a la producción de biomasa) en enero (más ligado al primer factor) y en febrero y marzo, más vinculado con el segundo. Por el contrario, las variables relacionadas al estrés (LST y TVDI) durante el mes de enero se interpreta que estarían asociadas de manera negativa con la anomalía de rendimiento (ya que un mayor estrés traería aparejado una reducción del rendimiento).

Por otra parte, la inclusión de la variable SOLas al espacio factorial muestra asimismo su vinculación inversa tanto con CP1 como CP2, y confirma la influencia de los episodios ENSO sobre la productividad agrícola en la región agrícola de secano de Córdoba (de la Casa *et al.*, 2021). La ATSM de diciembre, en cambio, presenta valores de correlación de igual naturaleza y muy similares a los de ARMz, expresando en el mismo sentido que la fase caliente (fría) de los episodios ENSO se vinculan con las anomalías positivas (negativas) de rendimiento. A partir de un ACP rotado, Schillerberg *et al.* (2019) reportaron que los primeros cinco componentes principales explican el 79% (maíz) y el 72% (trigo de invierno) de la variabilidad espacial y temporal de las anomalías de rendimiento de estos cultivos en numerosas regiones de los Estados Unidos de América; en tanto el primer componente principal de la variabilidad del rendimiento de los cultivos

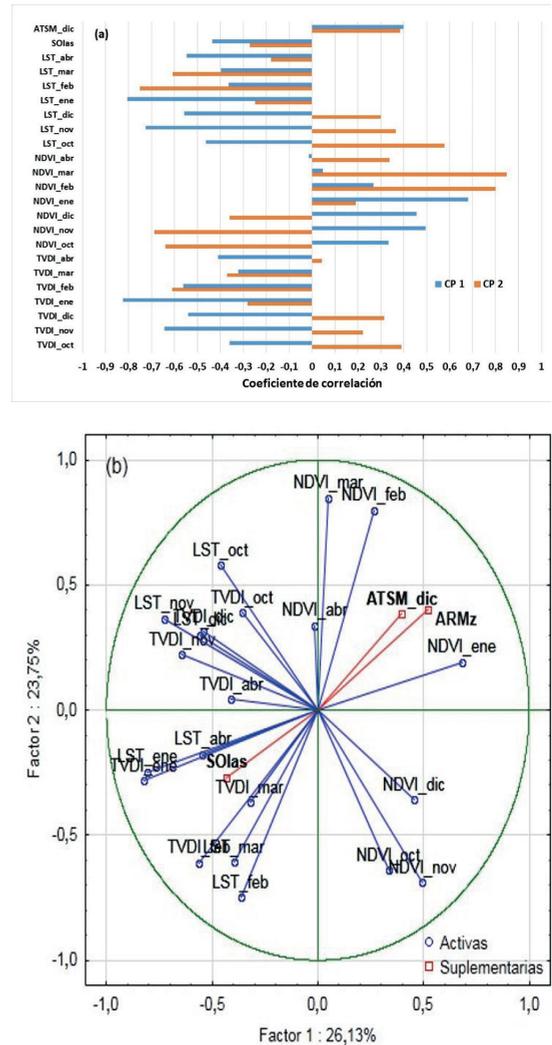


Figura 3.(a) Correlación entre las variables radiométricas mensuales (LST, NDVI y TVDI) y los 2 primeros factores del Análisis de Componentes Principales. (b) Anomalía de rendimiento de maíz (ARMz), Índice de Oscilación Sur de agosto y setiembre (SOLas), Anomalía de la Temperatura de la Superficie del Mar de diciembre (ATSM) (variables suplementarias) y el conjunto de índices radiométricos (variables activas) en el espacio factorial 1 X 2.

se mostró fuertemente asociado con la Oscilación Multidecadal Atlántica (AMO).

Como muestra la Figura 4, la introducción de los valores mensuales tanto de SOI como de ATSM al espacio factorial que conforman los 2 primeros CP, más allá de su carácter inverso, permite reconocer de manera anticipada la capacidad predictiva que presentan las señales oceánica y atmosférica acerca del potencial productivo de cada ciclo agrícola. Además, la persistencia de la

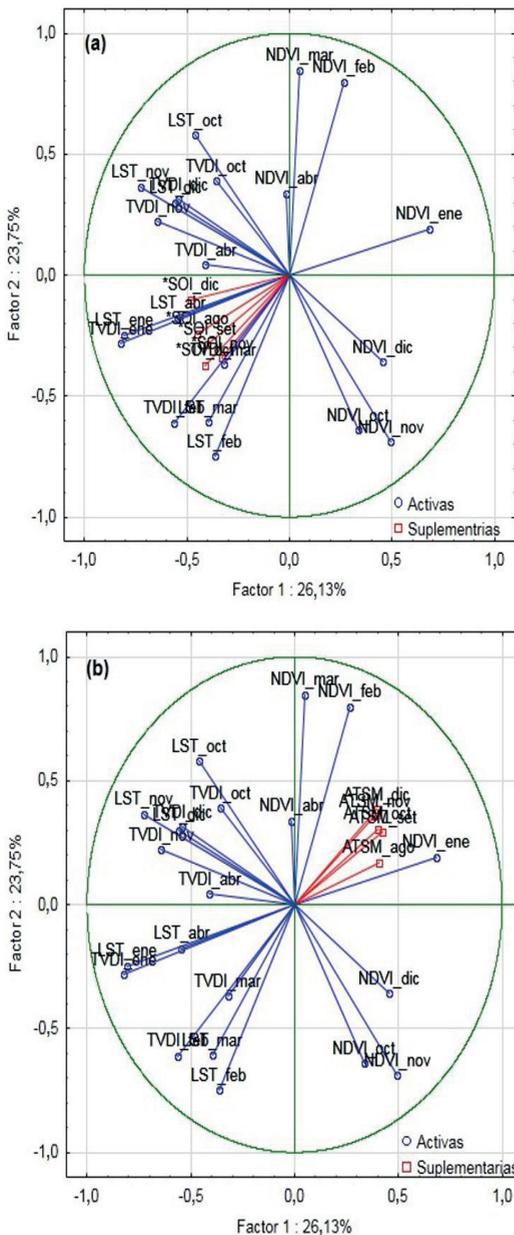


Figura 4. (a) Proyección del Índice de Oscilación Sur (SOI) y (b) de la Anomalia de la Temperatura de la Superficie del Mar (ATSM) desde agosto hasta diciembre (variables suplementarias) en el espacio factorial 1 X 2.

señal se verifica porque las correlaciones de los indicadores del ENSO con respecto a ambos CP son relativamente similares entre agosto (antes de la siembra de maíz) y diciembre (cuando el cultivo está completando las etapas vegetativas).

A partir de los 6 primeros factores ortogonales identificados y aplicado el análisis de regresión

lineal múltiple convencional para estimar ARMz, se obtienen los coeficientes de correlación y regresión que muestra la Tabla 6. Para una ordenada al origen que tiende a cero en correspondencia a un valor de anomalía, todos los factores presentan el carácter significativo ($p < 0,05$). Por su parte, el coeficiente de determinación (R^2) presenta un valor de 0,53, en tanto el R^2 ajustado por el número de términos considerados se reduce escasamente a 0,52, lo que avala la interpretación de que todos los factores considerados aportan de manera efectiva para explicar la variabilidad.

Tabla 6. Intercepción y coeficientes de regresión (b) con su error estándar de estimación y los valores de t de Student con su valor de probabilidad (p) del modelo de regresión múltiple que estima la anomalía del rendimiento de maíz a partir de los primeros 6 componentes principales (CP) derivados de la matriz de datos e indicadores radiométricos.

	<i>b</i>	Error típico	Valor de t	Valor de p
Intercepción	-2,0912E-11	54,4445086	-3,8409E-13	1
CP 1	251,898	23,2986463	10,8116855	8,619E-22
CP 2	203,066	24,4362824	8,31000034	1,384E-14
CP 3	-89,635	29,0336363	-3,08727474	0,00230371
CP 4	-130,661	43,6344683	-2,99443979	0,00309306
CP 5	121,23	46,3167011	2,62373414	0,00936116
CP 6	238,973	54,2607897	4,40415725	1,721E-05

No obstante, el modelo conformado con los 6 CP que capturan el 86% de la variabilidad de los datos originales sólo alcanza a explicar aproximadamente la mitad de la variabilidad de ARMz. Este comportamiento muestra, por una parte, que la información radiométrica utilizada tiene un alcance limitado en su capacidad de estimar la productividad agrícola y, por el otro, que la región tiene un comportamiento productivo heterogéneo, tanto por sus diferentes condiciones edáficas (tipo de suelo y capacidad de retención de agua) como por las técnicas y manejo particular (fechas de siembra). Esta diversidad justificaría un análisis pormenorizado por departamento.

La menor performance predictiva del modelo obtenido a partir de las primeras 6 CP (0,53) comparado al modelo lineal que utiliza todas las variables o que se restringe sólo a emplear las significativas, se explica porque otros factores que contribuyen en menor proporción a la variabilidad total ("scree"), presentan correlaciones también elevadas con ARMz. Esta conjetura se sostiene por medio de un AnReMu que realiza una selección hacia adelante del conjunto de CP. En este caso, como muestra la Tabla 7, se obtuvo un modelo

de 11 términos (factores) todos significativos que produce un R^2 de 0,628 (R^2 ajustado de 0,608), similar a los coeficientes de ajuste de los modelos que usan los datos espectrales.

Tabla 7. Intercepción y coeficientes de regresión (b) con su error estándar de estimación y los valores de t de Student con su valor de probabilidad (p) del modelo de regresión múltiple que selecciona hacia adelante los componentes principales (CP) para estimar la anomalía de rendimiento de maíz en la región de secano de Córdoba.

	b	Std.Err.	t(187)	Valor de p
Intercepción	0,000	49,1563	0,00000	0,999997
CP 1	251,898	21,0356	11,97480	0,000000
CP 2	203,066	22,0628	9,20399	0,000000
CP 6	238,973	48,9904	4,7795	0,000002
CP 13	-493,489	117,8522	-4,18735	0,000043
CP 3	-89,635	26,2136	-3,41940	0,000763
CP 4	-130,661	39,3962	-3,31658	0,001085
CP 12	381,996	116,1747	3,28812	0,001194
CP 9	-224,390	76,6964	-2,92569	0,003840
CP 18	729,149	250,8477	2,90674	0,004071
CP 5	121,523	41,8180	2,90599	0,004080
CP 20	-827,194	354,4839	-2,33352	0,020630

Los resultados de la Tabla 7 muestran los coeficientes del modelo lineal, como así también el valor de t cuya magnitud se reduce desde arriba hacia abajo, a medida que crece la probabilidad de error. Este ordenamiento de los términos permite advertir que el CP 13 se incorpora al modelo primero que CP 3 y CP 4, y que el CP 12 lo hace antes que CP 9 y CP 5. De esta forma, si bien el ACP transforma la matriz original de datos radiométricos e introduce un conjunto de variables ortogonales (no correlacionadas entre sí) que están relacionadas estrechamente con la productividad del maíz, principalmente los dos primeros CP, se observa que existen factores que influyen en menor proporción sobre la varianza pero tienen una estrecha correlación con la variable respuesta. Esta particularidad fue señalada antes por Hadi and Ling (1998) y justifica el uso de procedimientos destinados a la selección de variables (Cai *et al.*, 2013).

Por último, la Figura 5 presenta el análisis de correlación y regresión entre los valores observados y estimados de ARMz a partir de los modelos que utilizan, por una parte, el conjunto completo de la información espectral (de acuerdo a los coeficientes de regresión de la Tabla 2) y, por la otra, los CP derivados de la información espectral (según los coeficientes de la Tabla 7). No

sólo los coeficientes de determinación presentan un valor moderado en ambos casos, que en términos del R^2 ajustado resultan muy similares (0,617 en el primer caso y 0,608 para el segundo), sino que la recta de ajuste en uno y otro se aparta de la función identidad y muestra la tendencia a subestimar tanto las anomalías de rendimiento positivas como negativas. De esta forma, más allá de utilizar directamente las variables espectrales o sus valores transformados de carácter ortogonal, la capacidad predictiva resultante no difiere de manera sustancial.

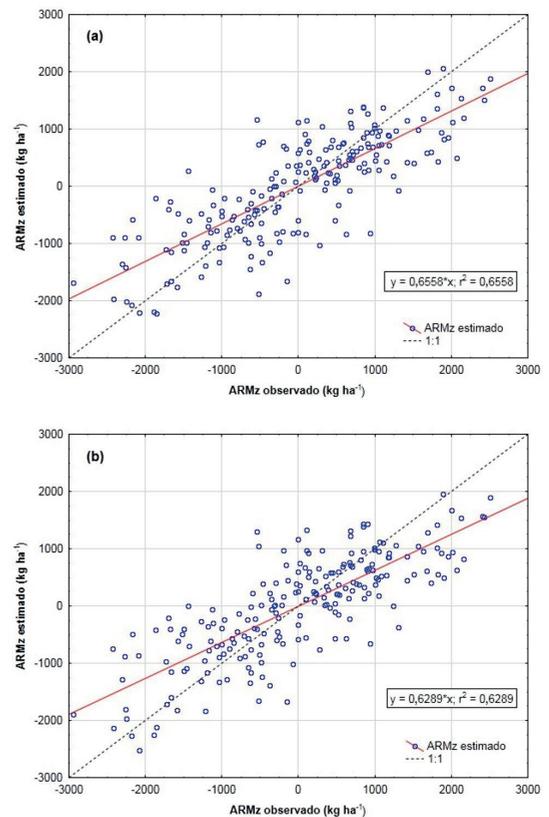


Figura 5. Relación entre la anomalía de rendimiento de maíz (ARMz) observada y estimada a partir de los modelos de regresión múltiple determinados a partir de (a) el conjunto de variables espectrales y (b) la selección hacia adelante de componentes principales en la región de secano de Córdoba, Argentina. Incorporadas se presentan la función de ajuste y la función de identidad (1:1).

La Tabla 8 presenta con propósitos comparativos las medidas de ajuste y error de los modelos desarrollados. Además de la heterogénea aptitud productiva de la región en estudio, donde algunos departamentos presentan condiciones edafoclimáticas más propicias que otros para la

producción de maíz, los episodios ENSO que se pueden valorar con anticipación al comienzo del ciclo de producción agrícola, constituyen otro factor relacionado con la productividad agrícola que se debe considerar especialmente a fin de desarrollar herramientas predictivas más precisas. Estos eventos alcanzan su punto máximo en el invierno boreal, cuando las anomalías de la circulación atmosférica se intensifican e impactan sobre los cultivos de maíz y la soja en el sureste de América del Sur (Anderson *et al.*, 2017; de la Casa *et al.*, 2021).

Tabla 8. Coeficiente de determinación (R^2) y su valor ajustado por los grados de libertad (R^2_{aj}), F de Fisher y su valor de probabilidad (p) y Raíz cuadrada del error medio (RMSE) de los modelos de regresión múltiple desarrollados con todas las variables y mediante selección hacia adelante y hacia atrás, a partir de índices espectrales (IVE) y de su transformación en componentes principales (CP).

	R^2	R^2_{aj}	F	RMSE (kg ha ⁻¹)
IVE				
Todas	0,6558	0,6171 (21;187)=	16,97	666,05
Hacia adelante	0,6087	0,5951 (7;201)=	44,67	710,15
Hacia atrás	0,5964	0,5864 (5;203)=	59,99	721,25
CP				
Todas	0,6558	0,6171 (21;187)=	16,97	666,05
Hacia adelante	0,6289	0,6082 (11;197)=	30,35	691,60
Hacia atrás	0,5076	0,4979 (4;204)=	52,57	796,66

CONCLUSIONES

La regresión múltiple a partir del ACP constituye un procedimiento apropiado para desarrollar modelos destinados a estimar la anomalía del rendimiento de maíz en la región de producción de secano de Córdoba, Argentina, a partir de indicadores radiométricos derivados de MODIS. No obstante, la performance predictiva a escala regional resultó sólo moderada, con coeficientes de determinación (R^2 y R^2_{aj}) que presentan un rango entre 0,5 y 0,63, dependiendo de la cantidad y naturaleza de los componentes utilizados. De todos modos, la capacidad predictiva de estos modelos no difiere ostensiblemente de la que presentan los modelos desarrollados directamente a partir de la información de origen satelital.

El ACP resultó una técnica relativamente efectiva para tratar problemas de multicolinealidad de datos y registros radiométricos, en la medida que la información utilizada se encuentra fuertemente correlacionada entre sí (en particular TVDI porque deriva simultáneamente de NDVI y de LST), como así también a fin de reducir la dimensionalidad

de la base de datos predictores. Por otra parte, el proceso de rotación y transformación logra introducir variables al análisis que no sólo son subrogantes de las originales (datos satelitales en este caso), sino que también constituyen composiciones integrales de las mismas durante la extensión completa del ciclo de cultivo. No obstante, la implementación apropiada de la técnica demanda emplear procedimientos de selección de variables en la medida que algunos CP que contribuyen en menor medida a la varianza y en términos generales tienden a ser excluidos del análisis, mantienen sin embargo correlaciones elevadas con la variable respuesta.

De acuerdo a su inserción en el espacio factorial que se configura a partir de los dos primeros CP de los indicadores espectrales, se estableció que la información espectral influye directamente sobre la variabilidad interanual de la ARMz. Asimismo, se verificó que el ENSO, utilizando tanto la temperatura de la superficie del mar como SOI a modo de proxy, constituye una señal no sólo relacionada con ARMz sino que también está vinculada a la información espectral. En ambos casos, se denota un comportamiento que, siendo anticipado desde agosto (previo a la siembra de maíz), muestra también un carácter de persistencia.

BIBLIOGRAFÍA

- Aliaga, V.S.; F. Ferrelli and M.C. Piccolo, 2017. Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International Journal of Climatology* 37: 1237–1247. <https://doi.org/10.1002/joc.5079>
- Anderson, W.B.; R. Seager, W. Baethgen and M. Cane, 2017. Crop production variability in North and South America forced by life-cycles of the El Niño Southern Oscillation. *Agric. For. Meteorol.* 239: 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.008>
- Anderson, W.B.; R. Seager, W. Baethgen, M. Cane and L. You, 2019. Synchronous crop failures and climate-forced production variability. *Science Advances* 5(7): eaaw1976. doi: 10.1126/sciadv.aaw1976
- Barnston, A.G.; M. Chelliah and S.B. Goldenberg, 1997. Documentation of a highly related ENSO-related SST region in the equatorial Pacific. *Ocean-Atmosphere* 35: 367–383. doi:10.1080/07055900.1997.9649597
- Basso, B.; and L. Liu, 2019. Seasonal crop yield forecast: Methods, applications, and accuracies. *Advances in Agronomy* 154: 201–255. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.11.002>
- BCCBA, 2021. Bolsa de Cereales de Córdoba. Cultivos estivales 2020/21 en Córdoba. La superficie sembrada de maíz estableció un nuevo récord Jul 14, 2021. <https://www.bccba.org.ar/informes/cultivos-estivales->

- 2020-21-en-cordoba-la-superficie-sembrada-de-maiz-establecio-un-nuevo-record/
- Bodner, G.; A. Nakhforoosh and H-P Kaul, 2015. Management of crop water under drought: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 35(2): 401–442. doi: 10.1007/s13593-015-0283-4
- Bolton, D.K.; and M.A. Friedl, 2013. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agric. For. Meteorol.* 173: 74–84. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.01.007
- Bureau of Meteorology — Australian Government, 2019. Information from <http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml>
- Cai, R.; J. Mullen, J. Bergstrom, W.D. Shurley and M.E. Wetzstein, 2013. Using a climate index to measure crop yield response. *Journal of Agricultural and Applied Economics* 45(4): 1-18. doi: 10.22004/ag.econ.157314
- Cai, Y.; K. Guan, D. Lobell, A.B. Potgieter, S. Wang, J. Peng, T. Xu, S. Asseng, Y. Zhang, L. You, L. and B. Peng, 2019. Integrating satellite and climate data to predict wheat yield in Australia using machine learning approaches. *Agric. For. Meteorol.* 274: 144–159. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.010>
- Chowdhury, R.K.; and S. Beecham, 2010. Australian rainfall trends and their relation to the Southern Oscillation Index. *Hydrol. Process.* 24(4): 504–514.
- de la Casa, A.; y G. Ovando, 2006. Influencia de episodios El Niño-Oscilación Sur (ENOS) sobre la precipitación y el rendimiento de maíz en la provincia de Córdoba, Argentina. *Agricultura Técnica (Chile)* 66(1): 80–89.
- de la Casa, A.C.; G.G. Ovando, A.C. Ravelo, E.G. Abril and H. Bergamaschi, 2013. Estimating maize ground cover using spectral data from Aqua-Modis in Córdoba, Argentina. *International Journal of Remote Sensing* 35(4): 1295–1308.
- de la Casa, A.; G. Ovando, L. Bressanini, G. Díaz, P. Díaz y C. Miranda, 2019a. Evaluación de la brecha de rendimiento para maíz tardío con distintas densidades de siembra en la región central de Córdoba, Argentina. *Agriscientia* 36 (2): 1–17.
- de la Casa, A.C.; G.G. Ovando and G.J. Díaz, 2019b. Interannual variability of seasonal rainfall in Córdoba, Argentina, evaluated from ENSO and ENSO Modoki signals and verified with MODIS NDVI data. *SN Applied Sciences* 1(12): 1-21. doi:10.1007/s42452-019-1650-6.
- de la Casa, A.C.; G.G. Ovando and G.J. Díaz, 2021. ENSO influence on corn and soybean yields as a base of an early warning system for agriculture in Córdoba, Argentina. *European Journal of Agronomy* 129: 126340. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126340>
- Doraiswamy, P.C.; T.R. Sinclair, S. Hollinger, B. Akhmedov, A. Stern and J. Prueger, 2005. Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment. *Remote Sens. Environ.* 97(2): 192–202. doi: 10.1016/j.rse.2005.03.015
- Dreccer, M.F.; J. Fainges, J. Wish, F.C. Ogbonnaya and V.O. Sadras, 2018. Comparison of sensitive stages of wheat, barley, canola, chickpea and field pea to temperature and water stress across Australia. *Agric. For. Meteorol.* 248: 275–294. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.10.006
- Hadi, A.S.; and R.F. Ling, 1998. Some cautionary notes on the use of Principal Components Regression. *The American Statistician* 52(1): 15–19.
- Holzman M.E.; and R.E. Rivas, 2016. Early maize yield forecasting from remotely sensed Temperature/Vegetation Index measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9(1): 507–519.
- Jarsún, B.; J.A. Gorgas, E. Zamora, E. Bosnero, E. Lovera, A. Ravelo y J. L. Tassile, 2003. Caracterización general de la provincia. pp. 23-60. In: J. A. Gorjas and J. L. Tassile. Recursos naturales de la Provincia de Córdoba. Los Suelos. Córdoba, Argentina Agencia Córdoba Ambiente e INTA. Córdoba, Argentina.
- Johnson, D.M., 2014. An assessment of pre- and within-season remotely sensed variables for forecasting corn and soybean yields in the United States. *Remote Sens. Environ.* 141: 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.10.027>
- Johnson, D.M., 2016. A comprehensive assessment of the correlations between field crop yields and commonly used MODIS products. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 52: 65–81. doi:10.1016/j.jag.2016.05.010
- Jolliffe, I.T., 2002. *Principal Component Analysis*. 2nd Ed. New York, NY: Springer. 487 pp.
- Karnieli, A.; N. Agam, R.T. Pinker, M. Anderson, M.L. Imhoff, G.G. Gutman, ... and A. Goldberg, 2010. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. *Journal of Climate* 23(3): 618–633.
- Liu, J.; T. Huffman, B. Qian, J. Shang, Q. Li, T. Dong, A. Davidson and Q. Jing, 2020. Crop yield estimation in the Canadian Prairies using Terra/MODIS-derived crop metrics. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13: 2685–2697. doi: 10.1109/JSTARS.2020.2984158
- Lobell, D.B.; K.N. Cahill and C.B. Field, 2007. Historical effects of temperature and precipitation on California crop yields. *Climatic Change* 81(2): 187–203. doi: 10.1007/s10584-006-9141-3
- Lobell, D.B., 2013. The use of satellite data for crop yield gap analysis. *Field Crops Research* 143: 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.08.008>
- Mathbout, S.; J.A. Lopez-Bustins, J. Martin-Vide, J. Bech and F.S. Rodrigo, 2018. Spatial and temporal analysis of drought variability at several time scales in Syria during 1961–2012. *Atmospheric Research* 200: 153–168. doi: 10.1016/j.atmosres.2017.09.016

- Meade, B.; E. Puricelli, W.D. McBride, C. Valdés, L. Hoffman, L. Foreman and E. Dohlman, 2016. Corn and soybean production costs and export competitiveness in Argentina, Brazil, and the United States. USDA Economic Information Bulletin, 154.
- Meyer, S.J.; K.G. Hubbard and D.A. Wilhite, 1991. The relationship of climatic indices and variables to corn (maize) yields: A principal components analysis. *Agric. For. Meteorol.* 55(1–2): 59-84.
- MAGyP, 2020. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la República Argentina. Estimaciones Agrícolas. <https://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>. (Accessed 15 October 2020).
- Mkhabela, M.S.; P. Bullock, S. Raj, S. Wang and Y. Yang, 2011. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agric. For. Meteorol.* 151(3): 385–393.
- Moran, M.S.; T.R. Clarke, Y. Inoue and A. Vidal, 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 49(3): 246–263. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90020-5)
- Nagy, A.; J. Fehér and J. Tamás, 2018. Wheat and maize yield forecasting for the Tisza river catchment using MODIS NDVI time series and reported crop statistics. *Computers and Electronics in Agriculture* 151: 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.035>
- Peralta, N.R.; J.L. Costa, M. Balzarini, M. Castro Franco, M. Córdoba and D. Bullock, 2015. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. *Computers and Electronics in Agriculture* 110: 103–113. doi: 10.1016/j.compag.2014.10.017
- Rattalino Edreira, J.I.; N. Guilpart, V. Sadras, K.G. Cassman, M.K. van Ittersum, R.L.M. Schils and P. Grassini, 2018. Water productivity of rainfed maize and wheat: A local to global perspective. *Agric. For. Meteorol.* 259: 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.05.019>
- Sandholt, I.; K. Rasmussen and J. Andersen, 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment* 79(2-3): 213–224.
- Schillerberg, T.A.; D. Tian and R. Miao, 2019. Spatiotemporal patterns of maize and winter wheat yields in the United States: Predictability and impact from climate oscillations. *Agric. For. Meteorol.* 275: 208–222. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.05.019>
- Seo, B.; J. Lee, K. Lee, S. Hong and S. Kang, 2019. Improving remotely-sensed crop monitoring by NDVI-based crop phenology estimators for corn and soybeans in Iowa and Illinois, USA. *Field Crops Research* 238: 113–128. doi:10.1016/j.fcr.2019.03.015
- Sun, D.; and M. Kafatos, 2007. Note on the NDVI-LST relationship and the use of temperature-related drought indices over North America. *Geophysical Research Letters* 34: L24406, doi:10.1029/2007GL031485
- Verma, U.; H.P. Piepho, A. Goyal, J.O. Ogutu and M.H. Kalubarme, 2016. Role of climatic variables and crop condition term for mustard yield prediction in Haryana. *Int. J. Agricult. Stat. Sci.* 12(1): 45–51.
- Wang, R.; L.C. Bowling and K.A. Cherkauer, 2016. Estimation of the effects of climate variability on crop yield in the Midwest USA. *Agric. For. Meteorol.* 216(1): 141–156.
- Zhu, B.; S. Chen, Y. Cao, Z. Xu, Y. Yu and C. Han, 2021. A regional maize yield hierarchical linear model combining Landsat 8 vegetative indices and meteorological data: Case study in Jilin province. *Remote Sensing* 13(3): 356.

Comparación del funcionamiento de las sondas Diviner 2000, EC-5 y CS620 para determinar el contenido de agua en el suelo

Blasón, A.D.; Barrios, M.B. y Mollá Kralj, A.

RESUMEN

En la agricultura de secano es fundamental conocer la disponibilidad y variación espacio-temporal del contenido de agua en los suelos para evaluar la productividad de los cultivos. El presente trabajo presenta una metodología exploratoria de estandarización en laboratorio para caracterizar, calibrar y comparar los registros de tres tipos de sonda para medir humedad, en relación al contenido volumétrico de agua (θ_v) medido en el suelo por gravimetría. Se describe el volumen captado por la medición de las sondas, respuestas a la variación de temperatura, calibración particular, entre otros aspectos. Las sondas evaluadas fueron: Diviner 2000 Sentek (FDR), ECH₂O EC-5 Decagon Devices (FDR), CS620 Campbell Scientific (TDR). Las lecturas de las sondas resultaron notoriamente sensibles a la tensión de trabajo, lo cual hace necesario la incorporación de un regulador de voltaje que permita garantizar la calidad de las medidas. La temperatura de la electrónica de los sensores no afectó sensiblemente las lecturas de la sonda. El pequeño volumen medido permite el estudio detallado de microambientes; razón por la cual se debe elegir con cuidado el lugar de medición, ya que los resultados pueden verse afectados por materiales extraños al suelo o cavidades cercanas.

Palabras claves: humedad edáfica; sonda capacitiva; TDR; FDR

Blasón, A.D.; Barrios, M.B. and Mollá Kralj, A., 2022. Comparison of the performance of the Diviner 2000, EC-5 y CS620 probes to determine soil water content. RADA XIII: 15-22

SUMMARY

In rainfed agriculture it is fundamental to know the availability and spatio-temporal variation of the water content in the soil to evaluate the productivity of the crops. The present work presents an exploratory standardization methodology in the laboratory to characterize, calibrate and compare the records of three types of probes to measure humidity, in relation to the volumetric water content (θ_v) measured in the soil by gravimetry. The volume captured by the measurement of the probes, responses to temperature variation, particular calibration, among other aspects, are described. The probes evaluated were: Diviner 2000 Sentek (FDR), ECH₂O EC-5 Decagon Devices (FDR), CS620 Campbell Scientific (TDR). The readings of the probes were notoriously sensitive to the working voltage, which makes it necessary to incorporate a voltage regulator

to ensure the quality of the measurements. The temperature of the electronics of the sensors did not significantly affect the readings of the probe. The small volume measured allows the detailed study of microenvironments; this is why the measurement site must be chosen carefully, because the results may be affected by foreign materials in the soil or nearby cavities.

Key words: Soil moisture; capacitive probe; TDR; FDR

Blasón, A.D.: Cátedra de Agrometeorología, Barrios, M.B.: Cátedra de Edafología, Mollá Kralj, A.: Cátedra de Ecología y Fitogeografía; Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Ruta 4, km 2, Llavallol (1836), Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina. Tel. 0114 2826263/7905. Correspondencia a: adblason@yahoo.com

INTRODUCCIÓN

En la agricultura es fundamental conocer la disponibilidad y variación espacio-temporal del contenido de agua en los suelos; y en especial el balance hídrico del horizonte explorado por las raíces. A la hora de evaluar ese contenido, la mayor dificultad radica en elegir los puntos más representativos del terreno para ubicar los sensores (Feres, 1997). Su variabilidad intrínseca hace necesario realizar muchas mediciones para inferir con exactitud el contenido de agua, por medio de sistemas portátiles de medición rápida y confiable para realizar el balance de agua en el suelo (Hidalgo *et al.*, 2003).

Existen diferentes métodos de medición de la humedad en el suelo: gravimetría, sonda de neutrones, reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) y en el de la frecuencia (FDR), entre otros; cada uno con ventajas e inconvenientes. La gravimetría es un método sencillo y muy fiable, su mayor inconveniente radica en ser destructivo, complicando el seguimiento exhaustivo de la humedad edáfica a lo largo del tiempo (Hidalgo *et al.*, 2003), y operativamente limitado por el número de muestras simultáneas a procesar. Entre los métodos de medición alternativos no destructivos más utilizados los: radioactivos, resistivos y capacitivos. La sonda de neutrones permite el seguimiento temporal con buen resultado, pero requiere de la calibración local de la misma. Además, es un equipo oneroso y con cierta peligrosidad de operación, requiriendo para ello una capacitación técnica especializada.

El avance en electrónica hizo posible dispositivos que basan su utilidad en la relación existente entre la constante dieléctrica de un medio, y la medición generada con campos electromagnéticos

a diferentes frecuencias (Smith-Rose, 1933). Tanto la técnica de reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR) (Hoeskstra y Delaney, 1974; Wobschall, 1978; Dean *et al.*, 1987; Hook *et al.*, 1992; Watson *et al.*, 1995; Nadler y Lapid, 1996) como en el dominio del tiempo (TDR) (Topp *et al.*, 1980; Topp y Davis, 1985; Green y Topp, 1992), utilizan la medición de la constante dieléctrica (K_s) del suelo (característica intrínseca de la mezcla suelo-agua-aire) que rodea a los sensores, para estimar de forma fiable el contenido de agua. La constante dieléctrica del agua pura (K_w) a 20 °C y 1 atm fue determinada en 80,4; siendo inversamente proporcional a la temperatura (West, 1980). En el suelo seco, la misma (K_{ss}) quedó comprendida entre 3 y 7; y para el aire (K_a) el valor resulta igual a 1.

Un sensor capacitivo actúa como parte de un acumulador, en el cual, los dipolos permanentes de las moléculas de agua en un medio dieléctrico se polarizan y alinean en un campo electromagnético. Esta propiedad resulta particularmente útil ya que el suelo se caracteriza por distinguir claramente los valores dieléctricos de cuatro componentes destacables: fase sólida, aire, agua disponible y no disponible para las plantas (Hallikainen *et al.*, 1985; Vaz, 2008).

Basados en la disimilitud de K_w respecto al K_{ss} de la fase sólida y al K_a del aire, los mencionados métodos captan el efecto que produce el contenido de agua retenida en el suelo de manera más lábil (en general meso y macroporos de flujo lento) o agua disponible, sobre la velocidad de propagación de una señal. Ésta es emitida sobre una guía de onda que se introduce en el suelo a modo de sensor o sonda, resultando la medición electromagnética proporcional al contenido de agua. Las lecturas deben ser luego corregidas

mediante ecuaciones que resultan en modelos de calibración, ya sean generales o particulares. Es así que, determinando la capacitancia, se obtiene la constante dieléctrica del medio y, en consecuencia, una correcta estimación del contenido de agua disponible en el suelo (Dean *et al.*, 1987).

La baja potencia del sistema FDR explora un pequeño volumen de suelo al realizar la medición. Esta particularidad limita su confiabilidad a la correcta instalación de la sonda, ya que no tolera separación alguna con el suelo, porque el aire extra circundante malogra la calidad de su medida (Hidalgo *et al.*, 2003). La sonda FDR Diviner 2000 (Sentek, 1999) consiste en un único sensor portátil capaz de determinar el contenido de agua en el suelo a intervalos regulares, desde los 10 cm hasta una profundidad de 1,6 m. Esta sonda es suministrada de fábrica con una calibración estándar, realizada para suelos ligeros de Australia. Por este motivo, se recomienda realizar una calibración local para cada suelo puesto que, de no hacerse, las mediciones resultan solo relativas y comparables entre ellas, perdiendo exactitud en los valores absolutos.

El objetivo de este trabajo es presentar una metodología de estandarización en laboratorio para caracterizar, calibrar y comparar mediciones electromagnéticas arrojadas por tres tipos de sondas capacitivas, en relación al contenido volumétrico de agua (θ_v) medido en el suelo. Se analiza en particular la influencia del volumen captado por la medición de las sondas, el efecto de la variación de temperatura sobre las lecturas y la calibración general de grupo o particular para cada sonda cuando se cuenta con más de una del mismo tipo midiendo en un mismo suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las sondas evaluadas fueron: FDR modelo Diviner 2000 (Sentek, 1999), EcH₂O EC-5 (Decagon Devices Inc., 2006) y TDR modelo CS620 (Campbell Scientific Inc., 2001). La sonda Diviner 2000 fue alimentada, operada y leída mediante el adquisidor original provisto por el fabricante, en modo de lectura continua, para obtener en forma directa el valor de frecuencia observado (Raw count). La EC-5 fue alimentada, registrada y leída en forma directa mediante un adquisidor comercial de desarrollo local (Cavadevices), de similar prestación al adquisidor Em5 (data logger) recomendado por la firma Decagon Devices para realizar medidas con las EC-5. Se alimentó la sonda con una tensión regulada constante de 2,5

V y se evaluó su medición a través de la tensión de salida en mV, mediante una PC conectada al adquisidor con un programa de soporte lógico (firmware) diseñado para tal fin.

En el caso de la sonda TDR CS620 no se contó con su adquisidor asociado, motivo por el cual fue necesario confeccionar un dispositivo que permitiera su operación y lectura; detalles de su construcción y prestación se describen en un trabajo previo (Fernández *et al.*, 2008). A diferencia de otras similares, este modelo mide un punto sobre la señal reflejada en el final de la guía de onda antes de disparar un nuevo evento, y poder generar así, una salida que varía en frecuencia en lugar de analizar la onda entera, como en los TDR convencionales.

Con el fin de evaluar y comparar características del funcionamiento y medición de las sondas consideradas, se procedió a ordenar su análisis de acuerdo con los siguientes pasos:

Influencia de la tensión de alimentación

Dado el diseño de alimentación, lectura y registro de las sondas evaluadas, el presente análisis se pudo realizar sólo para la CS620 y la EC-5. No resultó posible llevarlo a cabo sobre la Diviner 2000, ya que la misma fue observada y alimentada con su adquisidor original con celdas recargables y función de batería baja, que impidieron su análisis.

Para el análisis se observaron lecturas pareadas, de tensión de alimentación de las sondas y sus respectivos registros tanto en frecuencia para la CS620, como en tensión para la EC-5. Las mediciones se realizaron sobre medios de constante dieléctrica conocida, aire y agua, en función de la variación de tensión de entrada utilizando una fuente variable regulada.

Influencia de la temperatura

Para evaluar si la temperatura del medio posee algún efecto sobre estas sondas, se procedió a generar un conjunto de lecturas con las mismas inmersas en agua en agitación a distintas temperaturas. Se controló la variación en la temperatura con un termómetro de uso oficial marca Siap de una décima de apreciación contraste 057/04 con corrección 0,2 °C a restar, dentro de un recipiente aislante en el rango de 0 a 50 °C, considerándolo suficiente para la mayoría de las mediciones posibles de ser realizadas con este instrumental.

Volumen captado por el sensor

Basado en antecedentes que mencionan la baja potencia, y por ende de medición puntual generada con este tipo de sondas, se diseñó un conjunto de experimentos para evaluar posibles cambios en las lecturas. Se estudiaron distintas respuestas: en el agua, a la variación de la distancia entre el extremo de las sondas y una superficie libre de agua y el extremo de las guías (axial); y con respecto a la distancia de la cara más externa de las varillas y el borde de recipiente (radial).

Calibración en laboratorio

La imposibilidad de realizar mediciones sobre lisímetros convencionales, nos condujo a readecuar las calibraciones del instrumental para la medición del agua edáfica. Se utilizó un microlisímetro para medir correctamente la evaporación del suelo según concluyó Flumignan *et al.* (2012). Por lo tanto, se readecó un recipiente a modo de microlisímetro conteniendo suelo del horizonte A superficial de un Argiacuol vértico con 39% arcilla, 53% limo y 8% arena muy fina, disponible experimentalmente en el sitio. Se comparó de forma pareada la variación de peso, con los valores de las sondas en función del contenido de agua dentro del mismo; exponiendo al suelo al secado natural por evaporación, desde capacidad de campo hasta peso constante.

Para el ensamblado y operación del microlisímetro, se utilizó un recipiente plástico cilíndrico de 10 litros de capacidad y una balanza digital de hasta 20 kg y 1 g de resolución, previamente calibrada. En su fondo se colocó una capa de grava (1-2 cm. Ø aprox.), hasta una altura de 3 cm desde su base. Coincidente con la base de la capa de grava, se instaló un pico de drenaje con filtro para percolación, previniendo así la pérdida de suelo. Se completó el recipiente con una muestra de suelo secada al aire y tamizada a 2850 μm , dejando un borde de aproximadamente 5 cm para evitar derrames durante las recargas. Conjuntamente con el suelo, fueron instalados tres sensores EC-5 y un tubo de acceso para la sonda Diviner 2000. Asimismo, se dispuso el tubo de acceso para la sonda Diviner 2000 en el centro del balde; y las EC-5 a 4,5 cm del mismo, formando un triángulo equilátero. Equidistantemente a 30 grados de las EC-5, se realizaron repetidamente las mediciones con la sonda CS620, pinchando cuidadosamente en los mismos orificios dejados en la primera lectura. La Figura 1 presenta detalles de la disposición de las sondas.

Una vez montado el dispositivo, se procedió

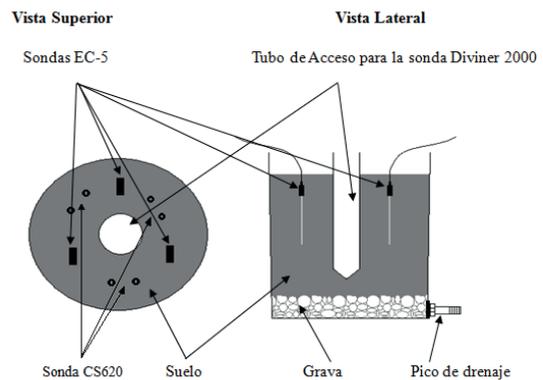


Figura 1. Esquema de construcción de un microlisímetro e instalación de sondas para la medición de la humedad edáfica.

a regar el mismo con una cantidad de agua suficiente para saturar el suelo, cuatro litros en este caso. Posteriormente, se lo dejó drenar durante 48 horas, recolectando y midiendo el exceso para calcular el contenido de agua aproximado al valor de capacidad de campo. Partiendo de esta condición, se procedió a cerrar el pico de drenaje y observar el periodo de desecación natural por evaporación hasta peso constante. Durante este lapso, se registraron de manera sistemática valores pareados del peso del microlisímetro y de las sondas testeadas. Dicho procedimiento fue repetido consecutivamente cuatro veces para su análisis y calibración en laboratorio. La Figura 2 presenta una fotografía del microlisímetro montado y en operación.



Figura 2. Microlisímetro en operación para la calibración de sondas a fin de medir la humedad edáfica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia de la tensión de alimentación

En la sonda Campbell CS620, el descenso de la frecuencia con la disminución de la tensión resultó lineal hasta los 4,7 V, como puede apreciarse en la Figura 3. Para mantener la precisión de medición, la caída de tensión de alimentación no debe superar los 20 mV por debajo de la tensión nominal de trabajo. Para conseguir y sostener la precisión en la medición, es necesario asegurar una tensión de alimentación del regulador de al menos 7,5 V; esto se consigue utilizando baterías de 9 a 12 V. Los presentes resultados se encuentran en concordancia con el alerta por batería baja que disponen los sistemas comerciales para garantizar la precisión de la medición.

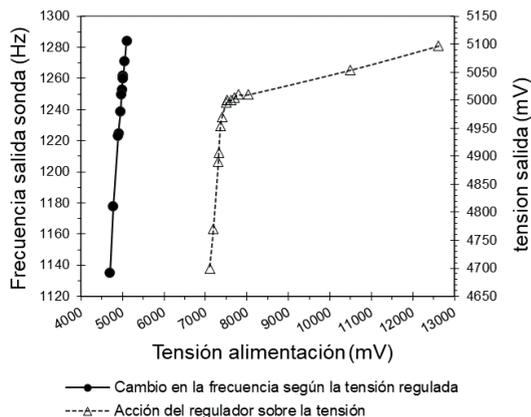


Figura 3. Variación de las lecturas de la sonda CS-620 al modificarse la tensión de alimentación sobre el regulador de suministro eléctrico, y curva de la acción del mismo en el rango de 4000 a 13000 mV

Con respecto a la sonda EC-5, la Figura 4 muestra como la caída de tensión de salida es prácticamente lineal en el rango de tensión de alimentación explorado (2100 mV – 3100 mV). Según el fabricante, la tensión nominal de alimentación es de 2500 mV. Un descenso en la tensión de alimentación de 100 mV (2400 mV) produce una lectura por defecto de unos 50 mV, lo que en términos de porcentaje de humedad edáfica representaría un error del 6 %. Por otra parte, un aumento en la tensión de alimentación de 100 mV produce una lectura por exceso de unos 70 mV, lo que en términos de porcentaje de humedad edáfica representaría un error del 8 %. A pesar de ser un sistema que mide con gran precisión, es altamente dependiente de la tensión

de alimentación, razón por la cual esta debe ser debidamente regulada.

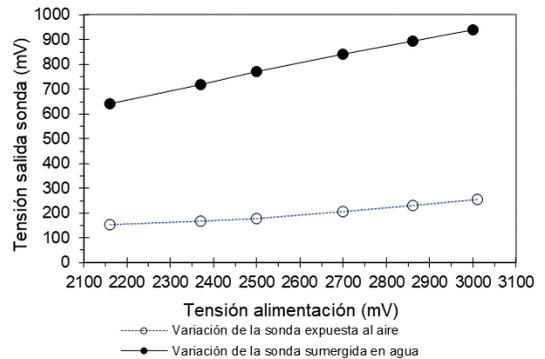


Figura 4. Variación de lecturas de la sonda EC-5 al variar la tensión de alimentación, al aire y sumergida en agua, en el rango de 2000 a 3000 mV

Cabe destacar que cuando se experimenta la variación de tensión de salida según la tensión de alimentación en el aire, la misma no es tan notoria como en el agua debido a su baja constante dieléctrica. Dicho efecto debe ser considerado más particularmente cuanto mayor sea la cantidad de agua que contenga el suelo.

Influencia de la temperatura

El efecto de la temperatura sobre la frecuencia que genera la sonda, resultó en una relación de forma curvilínea. Este comportamiento se debe al calor electrónico que actúa sobre los componentes del sensor, puesto que la constante dieléctrica del aire no cambia con la temperatura (Seyfried y Murdock, 2001).

Influencia de la temperatura en agua

Las Figuras 5, 6 y 7 muestran las relaciones resultantes, causadas por el cambio en la constante dieléctrica del agua con la temperatura, para las distintas sondas evaluadas. En el caso de la sonda EC-5 se aprecia una ligera sobreestimación en las lecturas con temperaturas inferiores a la nominal de trabajo de 20 °C, mientras que las superiores a ésta por el contrario subestiman dichas lecturas. El patrón de dispersión es debido a que se dispuso físicamente de tres dispositivos de este tipo, aunque la variación de lecturas a través del rango térmico es claramente lineal. En el mismo sentido, en la Figura 6 para la sonda Diviner 2000 y en la Figura 7 para la CS620, se observa el mismo patrón

lineal aún más claramente marcado por tratarse de la utilización repetida de solo una sonda. En ambos casos la relación resultó opuesta a la de EC-5, esto es que subestiman sus lecturas con temperaturas inferiores a 20 °C y los sobreestiman cuando la temperatura está por encima.

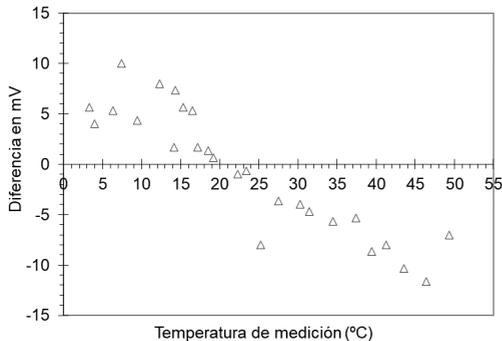


Figura 5. Diferencias entre las lecturas de sondas EC-5 en agua a distintas temperaturas con respecto a un valor de referencia de 20 °C.

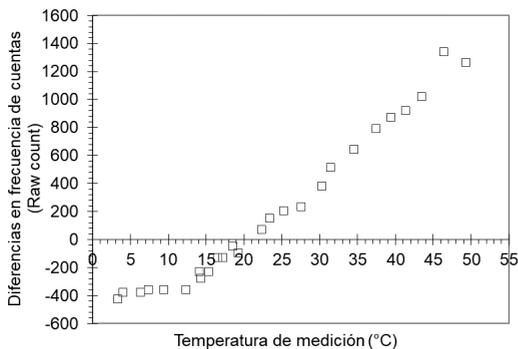


Figura 6. Diferencia entre las lecturas de una sonda Diviner 2000 en agua a distintas temperaturas con respecto a un valor de referencia de 20 °C.

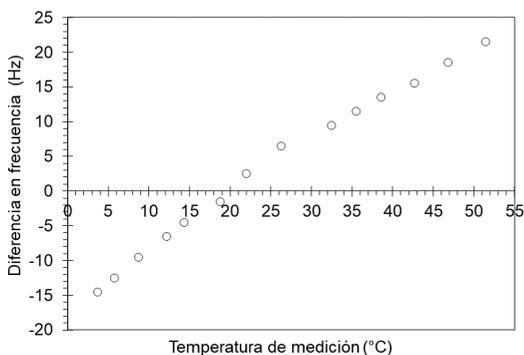


Figura 7. Diferencia entre las lecturas de una sonda CS620 Campbell en agua a distintas temperaturas con respecto a un valor de referencia de 20 °C.

La Tabla 1 presenta los resultados más destacados de las características funcionales de las sondas estudiadas. De las tres sondas experimentadas, la que mayor error arrojó por influencia de la temperatura fue la sonda CS620 (6,8 %). Dicho error se distribuyó más hacia temperaturas altas (4,1 %), que hacia temperaturas bajas (2,7 %). En este aspecto, la sonda que se comportó más simétricamente fue la EC-5, con un error del 3,7%, distribuido 1,7 % hacia temperaturas altas y un 2,0 % hacia temperaturas bajas. Sin embargo, esta sonda es la que mayor variabilidad presentó en sus lecturas a medida que variaba la temperatura, posiblemente producto de la evaluación de tres dispositivos de este tipo; observándose para las otras dos sondas con un único dispositivo evaluado de cada una, un comportamiento prácticamente invariable. Por último, la sonda Diviner 2000 presenta el menor error de las tres (2,4%), en su mayor parte debido a temperaturas altas. Se observa en la Figura 6 que por debajo de los 15 °C, la variación debida a temperatura es mínima.

Tabla 1. Rangos de medición, diferencias de lecturas respecto a referencia de temperatura de trabajo a 20 °C y estadísticos de error para cada tipo de sonda.

Parámetros de evaluación	Sonda		
	EC-5	Diviner	CS-620
Rango medición aire-agua a 20 °C (Ran)	580,0	75266,0	530,5
Diferencia máxima absoluta a 20 °C (DMA)	11,7	1343,0	21,5
DMA /Ran (%)	2,0	1,8	4,1
Raíz de la diferencia cuadrática media a 20 °C (RMSD)	6,2	578,7	12,0
RMSD / Ran (%)	1,1	0,8	2,3
Mayor diferencia (+)	10,0	1343,0	21,5
Mayor diferencia (-)	-11,7	-427,0	-14,5
Error positivo (%)	1,7	1,8	4,1
Error negativo (%)	-2,0	-0,6	-2,7
Máximo error (%) de lectura posible entre 3 y 55 °C	3,7	2,4	6,8
Máximo error de lámina (mm) por temperatura a CC			0,99

Volumen captado por las sondas

La sonda CS620 no responde a una distancia axial mayor a 4 cm (Figura 8) y a una distancia radial mayor a 3 cm (Figura 9). Esto resulta en un volumen de medición aproximado de 1 dm³, asumiendo una distribución esferoidal del campo generado por el sensor.

La sonda Diviner 2000 presenta varios aspectos

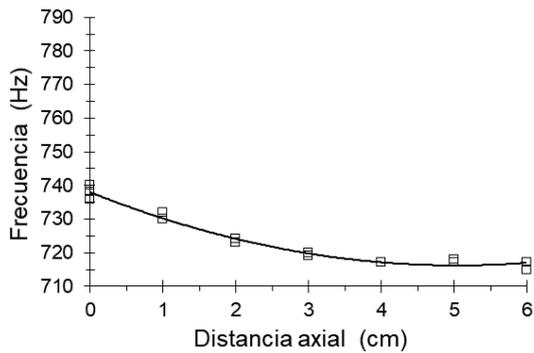


Figura 8. Relación entre la distancia axial y la frecuencia de la sonda CS620.

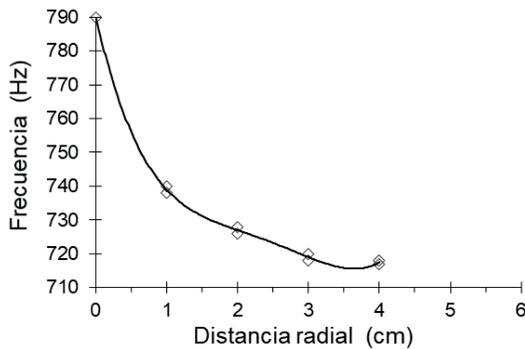


Figura 9. Relación entre la distancia radial y la frecuencia de la sonda CS620.

a tener en cuenta (Figura 10). El primero de ellos, es la atenuación que produce el caño de acceso. Cuando se usa la sonda con el caño de acceso suministrado por el fabricante, el rango de lectura es de unas 40.000 cuentas, mientras que con la sonda desnuda este rango aumenta a 75.000. Además, los valores máximos de lectura en cada caso (con y sin caño) al aire son más próximos que dichos valores en agua. Esto es debido a que la atenuación originada por el caño en el agua se ve multiplicado por su elevada constante dieléctrica, que es unas 80 veces mayor que la del aire. Por último, definimos que la distancia axial que capta el sensor con caño es de aproximadamente 40 mm, y la distancia radial de 15 mm (Figura 11). Cabe destacar que la mayor intensidad del campo magnético se encuentra en los primeros 5 mm. Este fenómeno se puede juzgar, por el cambio de pendiente en la curva entre los 5 mm iniciales y los siguientes 10 mm.

En la Figura 12 y 13, se aprecia que la sonda EC-5 no responde a una distancia mayor de 70 mm en sentido axial y a 30 mm en sentido radial.

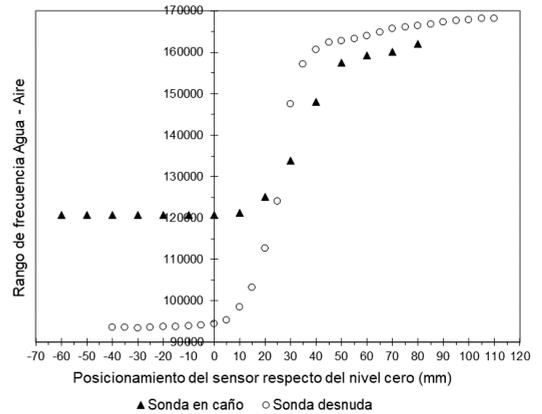


Figura 10. Distancia axial captada por la sonda Diviner 2000 y la atenuación causada por el tubo de acceso.

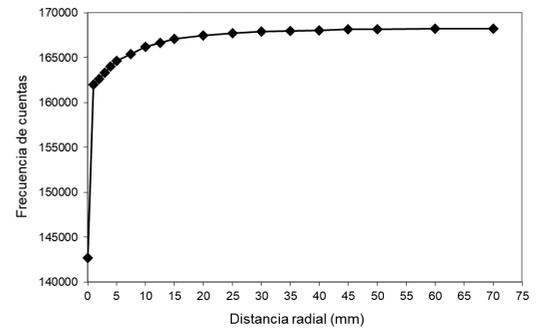


Figura 11. Distancia radial captada por la sonda Diviner 2000.

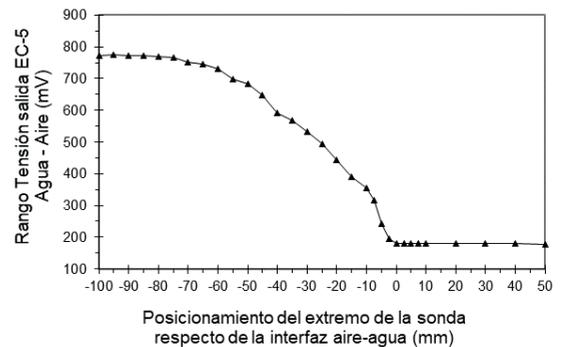


Figura 12. Distancia axial captada por la sonda EC-5.

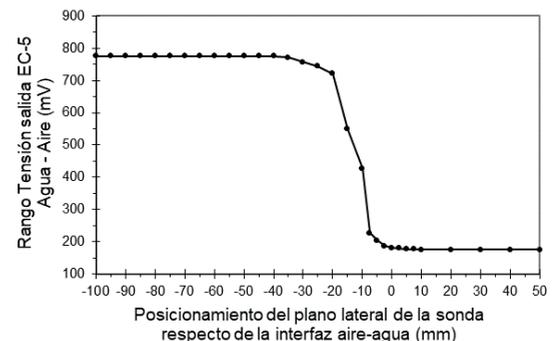


Figura 13. Distancia radial captada por la sonda EC-5.

Conclusiones

La lectura de las sondas es notoriamente sensible a la tensión nominal de trabajo. Esto hace necesario la incorporación de un regulador de voltaje con capacidad de establecer un corte al menos de la tensión mínima de trabajo que garantice la fiabilidad de los valores observados. Además, la temperatura de la electrónica del sensor no afecta sensiblemente la lectura de las sondas. También es importante destacar, que el pequeño volumen de suelo medido sólo alcanza para conocer en detalle la humedad de microambientes. En este sentido, al explorar poco volumen de suelo se debe elegir con cuidado el lugar de medición, ya que los resultados pueden verse notoriamente afectados por materiales atípicos del suelo o cavidades de aire cercanas.

BIBLIOGRAFÍA

- Campbell Scientific Inc., 2001. HydroSense Instruction manual. Campbell Scientific, Logan, UT. 28 pp.
- Dean, T.J.; J.P. Bell and A.J. Baty, 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique. Part I. Senso design and performance. *J. Hydrol.* 93: 67-78.
- Decagon Devices Inc., 2006. ECH2O Probe User's Manual. <http://www.decagon.com/literature/manuals/echomanual.pdf> (Consultada el 15/10/2020).
- Fereres, E., 1997. Irrigation scheduling of horticultural crops. *Proc 2nd Int. Sym. On Irrigation of Hort. Crops*. Ed K.S. Chartzoulakis. *Act Horticulturae* 449 (1) 253-258.
- Fernández, N.R.; A.D. Blasón y A. Moltoni, 2008. Comportamiento de una sonda (TDR) para medir la humedad edáfica: Evaluación en distintos medios y condiciones. *Actas de la XII Reunión Argentina de Agrometeorología, (AADA)*. San Salvador de Jujuy, Argentina. 8 al 10 de Octubre de 2008. CD.
- Flumignan, D.L.; R.T. Faria and B.P. Lena, 2012. Test of a microlysimeter for measurement of soil evaporation. *Engenharia Agrícola* 32(1) 80-90. <https://www.scielo.br/j/eagri/a/dWpWy8kfszP7C38TVJvTtcm/?format=pdf&lang=en> (Consultada el 12/11/2020).
- Green, R.E. and G.C. Topp, 1992. Survey of use of field methods for measuring soil hydraulic properties. G.C. Topp et al (ed). *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*. SSSA Spec. Publ. 30. SSSA. Madison, WI, pp. 281-288.
- Hallikainen, M.T.; F.T. Ulaby, M.C. Dobson, M.A. El-Rayes and L.K. Wu, 1985. Microwave dielectric behavior of wet-soil. Part I: Empirical models and experimental observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 26:2311-2316.
- Hidalgo, J.; M. Pastor y J.C. Hidalgo, 2003. Evaluación de una sonda FDR para la estimación de la evolución del contenido de agua en el suelo y para el control de riegos en olivar. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI*. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero, pp. 171-176.
- Hoekstra, T.J. and A. Delaney, 1974. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. *J. Geophys* 79:1699-1708.
- Hook, H.R.; N.J. Livingston, Z.J. Sun and P.B. Hook, 1992. Remote diode shorting improves measurement of soil water by domain reflectometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1384-1391.
- Nadler, A. and Y. Lapid, 1996. An improved capacitance sensor for in situ monitoring of soil moisture. *Aust. J. Soil* 34:361-368.
- Sentek, 1999. Diviner 2000. User Guide Version 1.5. Sentek, Pty. Australia. 88 pp.
- Seyfried, M.S. and M.D. Murdock, 2001. Response of a new soil water sensor to variable soil, water content and temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65:28-34.
- Smith-Rose, R.L., 1933. The electrical properties of soils for alternating currents at radio frequencies. *Proc. R. Soc. London* 140-359.
- Topp, G.C. and J.L. Davis, 1985. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): A field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:19-24.
- Topp, G.C.; J.L. Davis and A.P. Annan, 1980. Electromagnetic determination of soil water content using TDR. Applications to wetting fronts and steep gradients. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46:672-678.
- Vaz, C., 2008. Aplicabilidade e limitações da TDR para a medida da umidade em solos brasileiros. In *Embrapa Instrumentação-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. En: II Workshop de aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental. Unitaú de Taubaté, Brasil, pp. 96-116. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/31137/1/proci08.00052.PDF> (Consultada el 08/11/2020).
- Watson, K.; R. Gatto, P. Weir and P. Buss, 1995. Moisture and salinity sensor and method of use. U.S. Patent 5418466. 15 pp.
- West, R.C. (ed.), 1980. *Handbook of chemistry and physics*. 61st ed. CRC Press, Boca Raton. FL. 398 pp.
- Wobschall, D., 1978. A frequency shift dielectric soil moisture sensor. *IEEE Trans. Geosci. Electron* 16:112-118.

Variabilidad climática de la precipitación, temperatura y de sus eventos extremos en el sur de Santa Fe

Anibalini, V.; Dickie, M. J.; Gastaudó, J. y Coronel, A.

RESUMEN

La variabilidad climática en distintas escalas temporales (largo plazo, interdecadal e interanual) de las precipitaciones, de la temperatura y de sus eventos extremos son determinantes en la producción agropecuaria de la región sur de Santa Fe, provocando daños económicos y sociales. En este contexto, este estudio buscó establecer los índices de extremos climáticos de precipitación y temperatura en el sur de Santa Fe, y determinar su variabilidad a largo plazo, interdecadal e interanual. Para ello, se determinaron series de precipitación anual y temperatura media anual de la localidad bajo estudio (Zavalla). Se establecieron índices de extremos de precipitación y temperatura. Se determinó un aumento significativo del calentamiento y una disminución de los días con precipitación a largo plazo. La precipitación anual mostró una tendencia a la disminución, contraria a la hallada a nivel regional, lo que podría explicarse por la sensibilidad diferencial de las escalas de trabajo. Se encontró que la variabilidad interdecadal de los días consecutivos con precipitación y el número de olas de calor es significativa. En todas las variables e índices analizados la variabilidad interanual resultó la más importante, la cual estaría limitando la obtención de los rendimientos potenciales de los cultivos en la zona de influencia del área bajo estudio.

Palabras clave: tendencia; décadas; extremos hídricos; extremos térmicos

Anibalini, V.; Dickie, M. J.; Gastaudó, J. and Coronel, A., 2022. Climate variability of precipitation, temperature and their extreme events in the south of Santa Fe. RADA XIII: 23-29

SUMMARY

Climate variability on different time scales (long-term, interdecadal and interannual) of precipitations, temperatures and climate extremes are determinants in agricultural production in southern Santa Fe. This variability causes economic and social damage. In this context, our aim was to establish the climatic extreme precipitation and temperature indexes in southern Santa Fe, and determine their long-term, interdecadal and interannual variability. Precipitation and temperature series for Zavalla were identified. Extreme precipitation and temperature indexes were established. Long-term warming

increased significantly and wet days' decrease. Annual precipitation showed decreasing trend, opposite that found at regional level, explained by the differential sensitivity of the work scales. Interdecadal variability on consecutive wet days and heatwaves was significant. In every variable and indexes studied the interannual variability was the most important. This could limit crop yields in the study region.

Key words: trends; decade; extreme precipitation; extreme temperature

Anibalini, V. y Gastaud, J.: Cátedra de Climatología. Facultad de Cs. Agrarias-UNR. Campo Experimental Villarino, CC N° 14. (S2125ZAA) Zavalla – Santa Fe. Argentina. Dickie, M. J.: Cátedra de Climatología. Facultad de Cs. Agrarias-UNR. Campo Experimental Villarino. INTA Cañada de Gómez. Lavalle 1466. (2500) Cañada de Gómez-Santa Fe. Argentina. Coronel, A. Cátedra de Climatología. Facultad de Cs. Agrarias-UNR. Campo Experimental Villarino. Instituto de Investigaciones en Ciencias Agrarias de Rosario (IICAR) (CONICET-UNR). Campo Experimental Villarino, CC N° 14. (S2125ZAA) Zavalla – Santa Fe. Argentina. Correspondencia a: coronel8@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Hace décadas que se observa una tendencia al incremento de los eventos extremos en el tiempo y clima del mundo, producto del calentamiento global (Westra *et al.*, 2013). Particularmente en el centro de Argentina, el clima tiende a condiciones más cálidas y húmedas, aumentando la magnitud y frecuencia de temperaturas extremas y lluvias intensas (Cavalcanti *et al.*, 2015; Müller *et al.*, 2021). Estos eventos han causado grandes pérdidas económicas en el sector agrícola-ganadero, consecuencia de las inundaciones. Pero también la falta de precipitaciones (P), es un evento extremo que provoca estaciones de sequía prolongadas causando grandes daños económicos y sociales. En la región pampeana, la mayor parte de los sistemas de producción agrícola no incluyen irrigación, con lo cual la precipitación se convierte en un elemento decisivo de lo que allí ocurrirá. Es así que determinar la variabilidad de baja frecuencia de las P a través de distintos índices climáticos resulta importante para comprender más acabadamente la ocurrencia de eventos extremos en una región o localidad determinada. Además, el crecimiento de los días tropicales (DT) y las olas de calor (OC) también provocan grandes daños económicos y sociales (Moreno *et al.*, 2020).

Cabe destacar que estos eventos no sólo presentan tendencias a largo plazo, sino que también fluctúan en distintas escalas temporales, por ejemplo: variabilidad interanual, variabilidad interdecadal.

Para Argentina, diversos trabajos muestran

que estas fluctuaciones son reflejadas en las distintas variables atmosféricas, como la cantidad de precipitación, la intensidad de precipitación, la temperatura, la evapotranspiración, como así también en la ocurrencia de fenómenos extremos (Forte Lay *et al.*, 2008; Tencer, 2010; Coronel *et al.*, 2012). Asimismo, la variabilidad climática es la causa principal de la variación de la producción agrícola de un año a otro (Travasso *et al.*, 2009; Fernández Long *et al.*, 2011; Jozami *et al.*, 2018).

Por lo tanto, en Zavalla, sur de Santa Fe, donde la producción se realiza bajo condiciones de secano y siendo zona de vulnerabilidad climática frente al cambio climático es importante caracterizar los indicadores basados en P y temperatura (T). Definir su variabilidad se torna relevante ante un escenario de calentamiento global, dado el efecto que estas variables tienen sobre la salud humana, los sistemas productivos y naturales.

Los objetivos fueron establecer los índices de extremos climáticos de P y T en el sur de Santa Fe, y determinar su variabilidad a largo plazo, interdecadal e interanual.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la localidad de Zavalla ubicada a 33°01'S y 60°53'O, a una altitud de 50 m sobre el nivel del mar, sur de la provincia de Santa Fe (Argentina) (Figura 1). Se ubica en el centro de la región agrícola de Argentina. Para el período de análisis (1973-2020), la temperatura media anual es de 17°C, su régimen de precipitaciones es semi-monzónico, no contando con estaciones

secas marcadas a lo largo del año, con una P anual que varía entre 511 a 1378 mm a lo largo del período, siendo la P media anual de 966 mm. La serie temporal analizada abarca desde el 1 de enero de 1973 al 31 de diciembre del 2020. Los datos diarios de P, temperatura máxima (TM) y temperatura media (Tm), se obtuvieron de la estación agrometeorológica de la Facultad de Ciencias Agrarias-UNR, perteneciente a la red del SMN y de INTA, ubicada en la localidad en estudio.

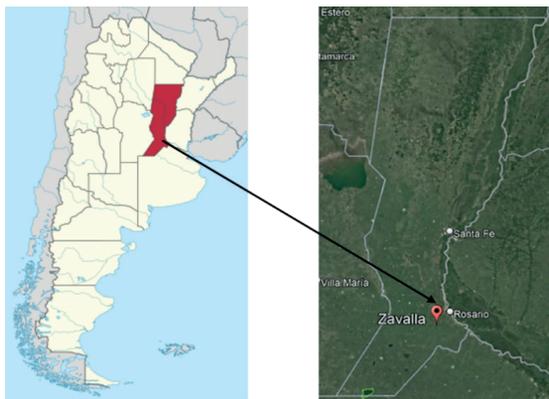


Figura 1. Ubicación geográfica de la localidad de Zavalla

Se determinaron las series de precipitaciones anuales (P_a) y de temperaturas medias anuales (T_{ma}) y las series anuales de los siguientes índices extremos:

P1d: valor máximo de P diaria para cada año

TDh: número total anual de días húmedos ($P \geq 1$ mm)

ISId: índice simple de intensidad diaria

Este índice se determina para cada año:

$$ISId = P_a / TDh$$

Ds: número máximo anual de días secos consecutivos (día seco $P < 1$ mm)

Dh: número máximo anual de días húmedos consecutivos (día húmedo $P \geq 1$ mm)

DT (días tropicales): cantidad total anual de días con temperatura máxima $\geq 30^\circ\text{C}$ (MeteoSwiss)

OC (ola de calor): cantidad total anual de olas de calor. Se define como ola de calor: temperaturas máximas \geq al percentil 90 del semestre cálido (octubre-marzo) de la serie 1973-2020, durante al menos 3 días consecutivos (SMN). El percentil 90 toma un valor de $33,1^\circ\text{C}$.

Con el fin de garantizar OC independientes, dado que una misma masa de aire puede persistir por varios días, se estableció que entre dos períodos consecutivos los mismos estuvieran separados al menos por tres días entre sí (Coronel

et al., 2006; Dickie y Coronel, 2020).

Para cada una de estas variables se determinaron: a) los valores estadísticos básicos: promedio, desviación estándar, máximo y mínimo; b) la tendencia lineal a largo plazo a través de mínimos cuadrados; c) se dividieron las series de temperatura media anual y precipitación anual, y de los índices extremos en las siguientes décadas: 1973-1980 (d1), 1981-1990 (d2), 1991-2000 (d3), 2001-2010 (d4), 2011-2020 (d5). Se evaluó si las décadas pertenecen a la misma población con el test de Kruskal-Wallis, y a su vez se calcularon los parámetros estadísticos básicos para cada década (promedio, mediana, cuartiles, límites de confianza 5 y 95%). d) la variabilidad interdecadal mediante el suavizado por regresión local Lowess (Cleveland, 1979). Para calcular la componente de mediano plazo o decadal se requiere un filtro de longitud mayor a los períodos característicos del fenómeno de El Niño-Oscilación Sur (ENOS), lo cuáles varían entre dos y ocho años. Por lo tanto, se probó distintos anchos de ventana en el suavizado Lowess. En esta metodología el ancho de ventana varía entre 0 y 1, y dicho valor está relacionado con el número de datos vecinos tomados para obtener la regresión local para cada valor de la nueva serie. El valor definido fue 0,2, o sea cada dato de la serie suavizada se calculó con un 20% del total de los datos (48 datos), lo que significa 10 datos vecinos. Este valor es acorde a la ventana utilizada al aplicar otras metodologías, como promedios móviles pesados de 11 años, utilizados entre otros por Penalba y Vargas (2004). e) La variabilidad interanual: a la serie original se le resta la tendencia y la serie suavizada por Lowess.

En el análisis de la variabilidad interanual, dado que los valores de P_a son de distinto orden de magnitud al resto de las variables, se estandarizaron las series interanuales dividiendo cada valor por el valor medio de la variable y se multiplicó por 100, a fin de expresar los cambios en porcentaje.

La varianza explicada por cada uno de los componentes de la variabilidad se determina como el cociente: entre la varianza de la tendencia lineal y la varianza de la serie original (tendencia a largo plazo), entre la varianza del suavizado lowess y de la serie original (interdecadal), y por último para la variabilidad interanual el cociente entre la varianza de la serie original-tendencia-suavizado y la de la serie original (Caorsi *et al.*, 2018). En el caso de la tendencia a largo plazo coincide con el coeficiente de determinación R^2 , ya que son variables ortogonales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra los parámetros estadísticos de las variables e índices de eventos extremos para Zavalla, para el período 1973-2020.

Tendencia a largo plazo

Las variables e indicadores de eventos extremos que presentan tendencias lineales significativas durante el período de análisis son: TDh, Tma y DT. En el caso de TDh se observa un decrecimiento de los días con P (3,6 días en 10 años), mientras que para Tma y DT un significativo aumento (0,2°C en 10 años y 5,5 días en 10 años, respectivamente) (Tabla 2.). El decrecimiento de TDh, no alcanza para definir un aumento significativo en ISId. La variabilidad explicada por la tendencia lineal en estas variables oscila entre un 27 y 29%.

Si bien la Pa muestra un leve decrecimiento de 1973 al 2020, el mismo no es significativo. Sin embargo, en Rosario, localidad situada a 30 km de Zavalla, se observa un comportamiento diferente ya que la Pa aumenta en forma sostenida a partir de principios del siglo XX (Müller y Lovino, 2019), al igual que en otros sitios de la región pampeana (Müller *et al.*, 2021). Hay que tener en cuenta que las tendencias son sensibles al período de información analizado, en el caso de Zavalla el lapso de tiempo es menor ya que comienza su funcionamiento en 1973, mientras que los otros estudios toman como inicio 1911, 1960 ya que toman como base la estación Rosario Aero. Por otro lado, la P es la variable que presenta mayor

variabilidad espacial y temporal.

Tanto en Zavalla como en Rosario (Müller y Lovino, 2019) los Ds tienden a aumentar y por el contrario los Dh a una disminución. Si bien en Zavalla estas tendencias no son estadísticamente significativas.

Las tendencias positivas de la Tma y de los índices extremos DT y OC son consistentes con el calentamiento regional asociado al Cambio Climático. Lo encontrado para Tma es coincidente con lo expresado para la región húmeda en la Tercera Comunicación de Cambio Climático (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015), por Brendel (2020) y Müller y Lovino (2019) para Rosario. Müller y Lovino (2019) expresan que el mayor aumento de la Tma en Rosario ocurre a partir de la década del 70, período en el que comienza este estudio.

Así mismo, Feron *et al.* (2019) postulan que se espera según distintas proyecciones de modelos climáticos que las OC se dupliquen en América del Sur y las temperaturas extremas aumenten.

Series decádicas

Las variables e indicadores que presentan diferencias significativas entre las décadas analizadas son TDh, Tma y DT, las mismas que presentaron tendencias significativas a largo plazo (Tabla 2. y Tabla 3.).

El comportamiento decadal de estas variables puede observarse en la Figura 2. TDh muestra una disminución continua de su valor medio a través

Tabla 1. Promedio (Prom), desviación estándar (DS), valores máximos (Máx) y mínimos (Mín) de cada variable e índice

	Pa(mm)	P1d(mm)	TDh	ISId(mm/día)	Ds	Dh	Tma(°C)	DT	OC
Prom	966,3	90,2	62	15,6	39	4	17,1	61	2
DS	200,0	28,5	10	2,7	13	1	0,5	14	1
Máx	1378,1	185,2	85	23,4	83	7	18,1	106	5
Mín	510,6	47,5	43	10,4	19	2	15,7	34	0

Tabla 2. Coeficiente de regresión (R², %), pendientes (a) y su correspondiente valor de probabilidad (p) de las tendencias lineales de cada variable analizada

	Pa	P1d	ISId	TDh	Ds	Dh	Tma	DT	OC
R ²	3	0,5	4	27	5	1	27	29	5
a	-2,5	-0,14	0,04	-0,36	0,20	-0,01	0,02	0,55	0,02
p	0,24	0,65	0,18	0,0002	0,13	0,49	0,0002	0,0001	0,14

Tabla 3. Valores de Kruskal-Wallis (H) y su probabilidad (p) para todas las variables

	Pa	P1d	ISId	TDh	Ds	Dh	Tma	DT	OC
H	1,11	0,93	2,51	10,7	2,49	3,23	14,16	14,45	8,55
p	0,89	0,92	0,64	0,03	0,65	0,46	0,007	0,006	0,06

de las décadas, como así también en la mediana y en los valores máximos. En cuanto al valor mínimo, en términos generales disminuye, presentando una discontinuidad entre las décadas d3 (1991-2000) y d4 (2001-2010). Por el contrario, Tma y DT presentan una tendencia de aumento entre las décadas. La única variable que presenta un valor atípico, por debajo del límite de confianza del 5%, es Tma en la década d4, cuyo valor es 16,2°C y corresponde al valor anual del año 2007. El valor mínimo de todo el período de esta variable es 15,7°C (Tabla 1.), corresponde al año 1976, sin embargo, no es un valor atípico para la respectiva década (d1).

Los valores de tendencia encontrados para el número de DT y OC son coincidentes con lo expresado por Arguez *et al.* (2020) donde se postula que las tendencias anuales si bien son al alza, pueden ser con un nivel de significancia bajo, pero al analizarlas a nivel de década la tendencia se mantiene y la significancia aumenta considerablemente.

Variabilidad interdecadal

La varianza explicada por la variabilidad interdecadal varía entre 6 y 20%, tomando los mayores valores para Dh y OC (Tabla 4.; Figura 3). Por lo tanto, el número consecutivo de días húmedos y las olas de calor en Zavalla son los

índices que presentan mayor relación con las oscilaciones de frecuencia menores a 10 años, dentro de las cuales se encuentra el fenómeno ENOS.

La variabilidad interdecadal contribuye en forma positiva a partir del año 2015, resultando mayores Dh y OC (Figura 3.). Es esperable que Dh aumente durante la fase cálida del ENOS, principalmente durante el semestre cálido.

Variabilidad interanual

Por último, la varianza explicada por la variabilidad interanual también se muestra en la Tabla 4. Esta variabilidad es la más importante en todas las variables e índices analizados.

Con el fin de analizar la importancia de los valores de la variabilidad interanual en la Figura 4 se muestra para cada variable estandarizada e índice sus estadísticos básicos (promedio, mediana, cuartiles, máximos y mínimos).

Se destaca la diferencia en la variabilidad interanual de la Pa respecto a Tma, ya que para Pa el máximo (mínimo) valor puede estar hasta un 50% por arriba (debajo) de la media del período analizado, mientras que para Tma los cambios pueden llegar como máximo a un 5%.

Asimismo, se observa la ocurrencia de valores atípicos en índices con la variable precipitación

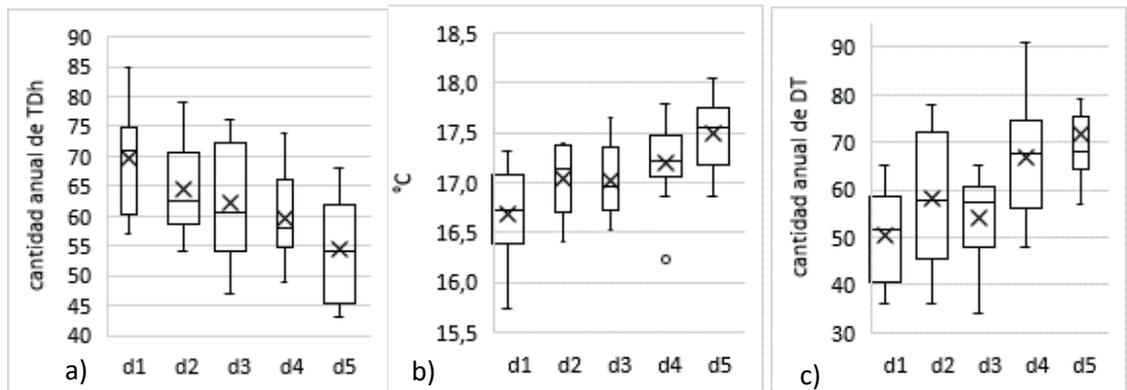


Figura 2. Box plot de las variables que muestran diferencias entre décadas: a) TDh; b) Tma; c) DT. Referencias: límite inferior caja: 25%; límite superior: 75%, línea recta dentro de la caja: 50%, cruz: promedio, límite inferior de la recta: 5%, límite superior: 95%; puntos: valor atípico.

Tabla 4. Varianza explicada por la variabilidad interdecadal e interanual en %

	Pa	P1d	ISId	TDh	Ds	Dh	Tma	DT	OC
Decadal	6	6	8	5	7	17	7	8	20
Interanual	85	89	87	62	78	69	64	56	70

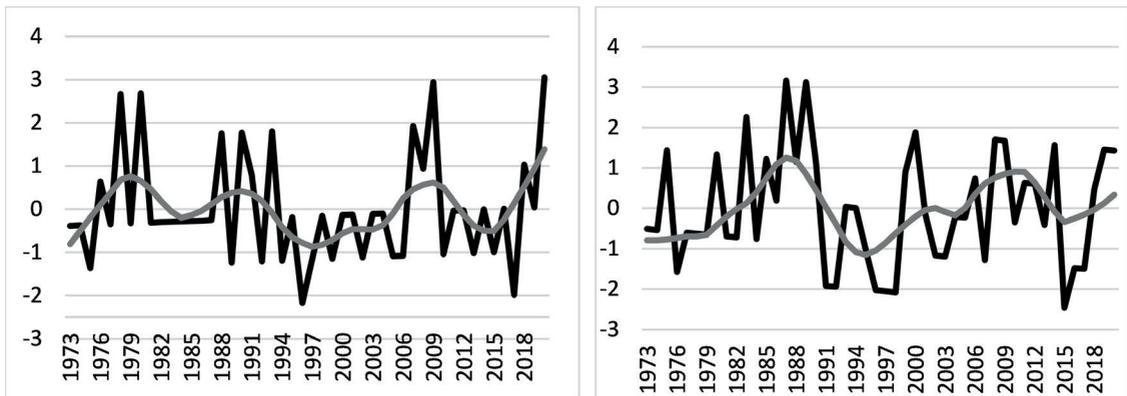


Figura 3. Izquierda: Dh sin tendencia lineal (negra) y variabilidad interdecadal (gris). Derecha: OC sin tendencia lineal (negra) y variabilidad interdecadal (gris).

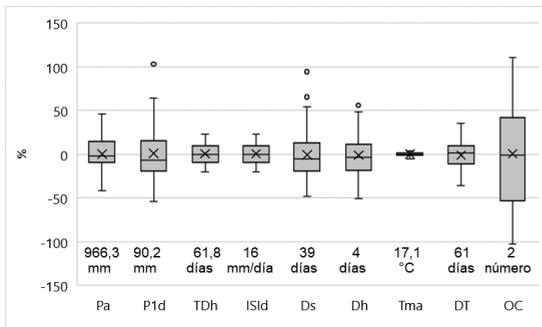


Figura 4. Box plot de la variabilidad interanual de las variables e índices. Se incluye los valores medios de cada una de las variables e índices. Referencias: límite inferior caja: 25%; límite superior: 75%, línea recta dentro de la caja: 50%, cruz: promedio, límite inferior de la recta: 5%, límite superior: 95%; puntos: valor atípico.

(P1d, Ds y Dh), en tanto con los índices relacionados a la temperatura no se presentan valores atípicos.

Que la variabilidad interanual sea la más importante en explicar las varianzas de las series, muestra un escenario de incertidumbre debido a los impactos que generan en la salud humana, la actividad agropecuaria, el sector energético, entre otros (Brendel, 2020).

Los cambios en la Pa, que también se destacan en los índices asociados, muestra la chance de ocurrencia de excesos o déficit de precipitación, que tendrán su consecuencia en forma contundente en el sector agropecuario, principalmente si los mismos ocurren en la época de mayor precipitación (semestre cálido) y en particular en los períodos críticos de los cultivos (Dickie y Coronel, 2018; Jozami *et al.*, 2018).

Si bien los cambios de la Tma son pequeños, DT y OC presentan mayor variabilidad interanual alrededor de la media. Según Confalone *et al.* (2017), cuando se considera la ocurrencia de

OC junto a una situación de deficiencia hídrica puede ocasionar una merma significativa en los rendimientos de los cultivos de maíz y soja, en condiciones de secano.

CONCLUSIONES

En la zona de estudio, sur de Santa Fe, la variabilidad interanual es la más importante en todas las variables e índices analizados. En este escenario surge la necesidad de la gestión del riesgo climático, ya que la variabilidad interanual de las precipitaciones y de la temperatura condicionan los rendimientos de los principales cultivos de la región, y expone a la sociedad a mayores riesgos de inundaciones, sequías y olas de calor.

Además, se determinó a largo plazo un aumento significativo del calentamiento y una disminución de los días con precipitación. Resulta relevante tomar medidas que disminuyan la liberación de gases de efecto invernadero, especialmente en la actividad agropecuaria, ya que es la principal actividad productiva de la región.

Es importante en este contexto, el seguimiento de los pronósticos y proyecciones climáticas con el fin de tomar decisiones con el objetivo de planificar y orientar las actividades económicas con una visión de sustentabilidad ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

- Arguez, A.; S. Hurley, A. Inamdar, L. Mahoney, A. Sanchez-Lugo and L. Yang, 2020. Should We Expect Each Year in the Next Decade (2019–28) to Be Ranked among the Top 10 Warmest Years Globally? *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 101: E655–E663.

- Brendel, A.S., 2020. Tendencias y anomalías termopluviométricas actuales y futuras de una cuenca hidrográfica de la Región Pampeana Argentina: un análisis orientado a reducir los impactos socioambientales. *Geografía Digital* 17(34):30–45.
- Caorsi, M.; G. Cruz, R. Terra y L. Astigarraga, 2018. Variación de la precipitación y la ocurrencia de sequías en la cuenca lechera del SW del Uruguay en el período 1939 - 2011. *Agrociencia (Uruguay)* 22(1):116–123.
- Cavalcanti, I.F.A.; A.F. Carril, O.C. Penalba, A.M. Grimm, C.G. Menéndez, E. Sanchez, A. Chechi, A. Sörensson, F. Robledo y J. Rivera, 2015. Precipitation extremes over La Plata Basin—review and new results from observations and climate simulations. *J. Hydrol.* 523:211–230.
- Cleveland, W.S., 1979. Robust Locally weighted Regression and Smoothing Scatterplots. *American Statistical Association* 74:829–836.
- Confalone, A.; C.A. Vilatte, L.M. Aguas, M.S. Barufaldi, M.F. Eseiza and G.D. Ponce, 2017. Efecto biofísico del cambio climático en el rendimiento de cultivos de verano. *Cuban J. Agric. Sci.*51(2):249–25.
- Coronel, A.; S. Bischoff y M. Lara, 2006. Estructura vertical, temporal y espacial de las masas de aire extremas en la República Argentina en invierno. *Meteorológica* 31(1 y 2):37–48.
- Coronel, A.; O. Sacchi y M. Costanzo, 2012. Variabilidad climática de los componentes del balance hídrico seriado en el sur de Santa Fe. *Ciencias Agronómicas* 19:7–11.
- Dickie, M. y A. Coronel. 2018. Relación estadística entre los rendimientos de maíz y la ocurrencia de deficiencias hídricas en el Depto. Rosario. *Ciencias Agronómicas* 31:017–024.
- Dickie, M. y A. Coronel, 2020. Masas de aire y patrones de circulación asociados a la ocurrencia de deficiencias hídricas severas durante el período crítico de maíz. *RIA* 46(3):371–378.
- Feron, S.; R.R. Cordero, A. Damiani, P.J. Llanillo, J. Jorquera, E. Sepúlveda, V. Asencio, D. Laroze, F. Labbe, J. Carrasco and G. Torres, 2019. Observations and Projections of Heat Waves in South America. *Sci Rep* 9, 8173 pp.
- Fernández Long, M.E.; L. Spescha, R. Hurtado y G.M. Murphy, 2011. Impacto del ENOS sobre los rendimientos de maíz en la región pampeana argentina. *Agriscientia* 28: 31–38.
- Forte Lay, J; O. Scarpati y A. Capriolo, 2008. Variabilidad de las precipitaciones y contenido de agua en el suelo de la Planicie Pampeana (Argentina). *Geofísica internacional* 47 (4): 341–354.
- Jozami, E.; E. Montero Bulacio and A. Coronel, 2018. The effect of the Oceanic Niño Index in corn yield at the central region of Argentina. *Int. Journal of Climatology* 38(1):1–12.
- Moreno, J.M.; C. Laguna-Defior; V. Barros; E. Calvo Buendía; J.A. Marengo y Ú. Oswald Spring (eds.), 2020. Adaptación frente a los riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos – Informe RIOCCADAPT. McGraw-Hill, Madrid, España, 716 pp.
- Müller, G.V. y A.M. Lovino, 2019. Servicio a terceros: Variabilidad climática, eventos extremos y escenarios climáticos futuros en la ciudad de Rosario. Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático (CEVARCAM) – FICH – UNL. Santa Fe, Argentina, 49 pp.
- Müller, G.V.; A.M. Lovino and L.C. Sgroi, 2021. Observed and Projected Changes in Temperature and Precipitation in the Core Crop Region of the Humid Pampa, Argentina. *Climate* 9:1–24.
- Penalba O. and W. Vargas, 2004. Interdecadal and interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. *I. J. Climatol.* 24:1565–1580.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, 2015. Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. “Cambio Climático en Argentina; Tendencias y Proyecciones” (Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera). Buenos Aires, Argentina. 264 pp.
- Tencer, B., 2010. Variabilidad de los eventos extremos de temperatura observados y modelados en el sudeste de Sudamérica, y sus proyecciones ante un escenario de cambio climático. Tesis doctoral FCEyN-UBA, 206 pp.
- Travasso. M.I.; G.O. Magrin, O. Grondona and G.R. Rodríguez, 2009. The use of SST and SOI anomalies as indicators of crop yield variability. *Int.J. Climatol.* 29(1): 23–29.
- Westra, S.; L.V. Alexander and F.W. Zwiers, 2013. Global Increasing Trends in Annual Maximum Daily Precipitation. *J. Clim.* 26: 3904–3918.
- <https://www.meteosuisse.admin.ch/home/climat/changement-climatique-suisse/jours-tropicaux-jours-de-gel-et-autres-indicateurs-climatiques.html> (Consultada el 27/05/2022).
- <https://www.smn.gov.ar/estadisticas> (Consultada el 01/06/2022).

Fluctuación de la napa freática y la productividad de alfalfa, en la localidad de Marcos Juárez, ecorregión pampeana centro, Argentina

Martín, B. y Coronel, A.

RESUMEN

La ecorregión pampeana centro de Argentina es afectada por la presencia de la napa e influye positiva o negativamente sobre las pasturas según la profundidad en que se encuentre. En consecuencia, analizar y comprender sus efectos sobre especies forrajeras, en especial alfalfa, es una información útil debido a su incidencia directa en la productividad forrajera. Se consideró el modelo AquaCrop, calibrado y validado en la especie, para estimar la biomasa aérea forrajera en base a las variables climáticas que operan en el crecimiento, el balance hídrico del suelo, y la profundidad de la napa freática. El objetivo de este trabajo es estimar producciones de biomasa forrajera en alfalfa y su respuesta a la fluctuación de la profundidad de la napa freática, en diferentes escenarios climáticos de la localidad de Marcos Juárez, provincia de Córdoba. Los resultados muestran que el modelo es capaz de predecir la biomasa, considerando los aportes de la napa freática, con un error cuadrático medio de 0,409 tn MS ha⁻¹ en cada corte. Hubo respuestas en el crecimiento en alfalfa relacionado a los aportes que realiza la napa freática en el balance hídrico, durante cada situación de corte.

Palabras clave: agua subterránea; *Medicago sativa*; biomasa forrajera

Martín, B. and Coronel, A., 2022. Water table fluctuation and productivity of alfalfa, in Marcos Juárez, central pampean ecoregion, Argentina. RADA XIII: 31-37

SUMMARY

The Pampas ecoregion of Argentina affected by the presence of the groundwater table and it positively or negatively influences of forages depending on its depth. Consequently, the analysis and understanding of its effects on forage species, especially alfalfa, is useful information due to its direct impact on forage productivity. The Aqua Crop model, calibrated and validated for this specie, considered to estimate the forage aerial biomass based on the climatic variables that operate in growth, the soil water balance, and the depth of the water table. The objective of this work was to estimate forage biomass production in alfalfa in response to water table fluctuations, for different climatic scenarios in Marcos Juárez, Córdoba. The results show that the model is capable of predicting biomass, when considering the water table

contributions, with an average error of 0,409 tn MS ha⁻¹ in each section. During each the period of cutting, there were responses in alfalfa growth related to the contributions of the water table in the water balance.

Key words: groundwater; *Medicago sativa*; forage biomass

Martín, B.: Cátedra de Forrajes. Facultad de Cs. Agrarias–UNR. Campo Experimental Villarino, CC N° 14. (S2125ZAA) Zavalla – Santa Fe. Argentina. Coronel, A.: Cátedra de Climatología. Facultad de Cs. Agrarias–UNR. Campo Experimental Villarino, CC N° 14. (S2125ZAA) Zavalla – Santa Fe. Argentina. Instituto de Investigaciones en Ciencias Agrarias de Rosario (IICAR) (CONICET–UNR). Campo Experimental Villarino, CC N° 14. (S2125ZAA) Zavalla – Santa Fe. Argentina. Correspondencia a: coronel8@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad hídrica es el factor ambiental más limitante de la productividad de los cultivos en nuestro país. Por tal motivo el aporte de humedad de la napa freática, adquiere gran relevancia por su potencial contribución en el crecimiento de las especies (Nosetto *et al.*, 2009). El nivel freático fluctúa de acuerdo a la variabilidad climática y al uso y manejo del suelo. La recarga de dicho acuífero libre se genera durante los ciclos de balance hídrico positivo y/o por la reducción del consumo de agua en algún período del año. Se destaca que el ascenso de napas freáticas provoca anegamientos en suelos productivos de la ecorregión pampeana húmeda, y genera problemas en el crecimiento de las especies, entre ellas la alfalfa (*Medicago sativa* L.). No obstante, también puede contribuir al consumo de agua por el sistema radical específico de esa especie (Nosetto *et al.*, 2009). Respecto a esta situación, las interacciones suelo, sistema radical y variables meteorológicas, son fundamentales en el crecimiento de alfalfa, importante componente forrajero en los sistemas ganaderos de Argentina (Basigalup y Rossanigo, 2007).

El uso de modelos para simular la biomasa y rendimiento cosechable de cultivos en respuesta al agua como factor limitante, constituye una valiosa herramienta para estimar el impacto de variaciones climáticas interanuales o estacionales, en diferentes tipos de suelos, y así prevenir potenciales consecuencias ambientales (Hernández *et al.*, 2009). El modelo AquaCrop, calibrado y validado en alfalfa (Martín, 2021), permite estimar la producción de biomasa forrajera considerando las variables meteorológicas y edáficas intervinientes. El modelo, en su última versión, incorpora la profundidad del nivel freático y los aportes que realiza por ascenso capilar (Steduto *et al.*, 2009; Raes *et al.*, 2017). La

influencia de esta variable permite comprender las respuestas de la producción de la biomasa forrajera a la dinámica freática. De modo que napas freáticas demasiado profundas son inaccesibles y no ofrecen agua al crecimiento de la biomasa, en tanto que napas freáticas cercanas a la superficie generan anegamientos que limitan su producción. El objetivo de este trabajo fue aplicar el modelo AquaCrop para estimar producciones de biomasa forrajera en alfalfa y en respuesta a la fluctuación de la profundidad de la napa freática, en diferentes escenarios climáticos de la localidad de Marcos Juárez, provincia de Córdoba.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio fue la localidad de Marcos Juárez (32,68°S; 62,12°O), de la provincia de Córdoba (Figura 1). Se caracteriza por ser una zona subhúmeda con un régimen de precipitaciones que varía entre 800 a 1100 mm. El suelo predominante es Argiudol típico. El balance hídrico regional tiende a ser positivo.

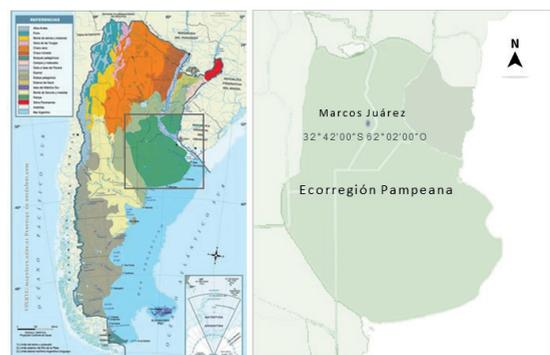


Figura 1. Ecorregión pampeana en Argentina y ubicación del área de estudio (localidad de Marcos Juárez, provincia de Córdoba).

El modelo AquaCrop, requiere de datos de entrada para cuatro módulos: el de clima (temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación, vientos, radiación o brillo solar y humedad); el de cultivo requiere datos de fenología, raíces, índice de cosecha, fecha de siembra, densidad de siembra y desarrollo de follaje; el de manejo necesita información sobre irrigación y parámetros de campo, al respecto se planteó un escenario sin riego ni malezas y sin limitantes de fertilidad. Por último, el de suelos que requiere información de variables hidrofísicas en varios horizontes (textura, estructura y profundidad de la napa freática). En este módulo se especificó la profundidad del nivel freático en los momentos del registro realizados en freatómetros ubicados en cercanía a las parcelas de corte de la Red de INTA.

La información meteorológica utilizada en el modelo fue proporcionada por SIGA- Sistema de Información y Gestión Agrometeorológico- de INTA (años 2000 al 2018). Los datos de la acumulación de biomasa aérea, en cada momento de corte de pasturas de alfalfa, se obtuvo de la Red de Evaluación de cultivares de alfalfa de INTA (INTA, período 2000/2017), en aquellos grupos sin latencia estival (GL 8 a 10), para el primer o segundo año de producción. Se trabajó con 60 cortes de alfalfa, divididos por su estación de crecimiento (30 en otoño-invierno (O-I) y 30 en primavera-verano (P-V)), y a su vez en distintas condiciones hídricas: normales, secas o húmedas (10 cortes para cada condición de cada estación de crecimiento). Para considerar la condición hídrica, se relacionó las precipitaciones que ocurrieron en cada período de corte con los registros promedios históricos diarios. Cuando el valor de la precipitación era superior o inferior en un 25% respecto de los históricos, para ese período de acumulación de la MS, se consideró condición húmeda o seca, respectivamente y a los casos restantes normales.

Los parámetros de entrada en el módulo cultivo fueron determinados por Martín (2021): cobertura máxima del follaje (85%), duración del período entre cortes en tiempo térmico acumulado (grados día acumulados), parámetros de densidad de plantas (250 y 150 plantas m², en los cortes del primer y segundo ciclo de producción, respectivamente), índice de cosecha (75%), temperaturas umbrales (temperatura base: 2,5°C en O-I y 5°C en P-V), profundidad máxima de raíces 3,5 m. En primera instancia se calculó la biomasa estimada (Bs) considerando la profundidad de la napa freática (NF) y se los comparó con la biomasa observada en los cortes realizados en las parcelas de ensayo de la RED (Bo) incorporando todos los datos sin discriminarlos por su estacionalidad ni

condición hídrica. Luego, se modelaron los cortes caracterizados por períodos de acumulación del crecimiento (P-V y O-I), obteniendo Bs cuando se incluye en el modelo la profundidad de la NF y cuando se desactiva su inclusión.

Para analizar el grado de ajuste entre Bs y Bo, se consideraron el coeficiente de determinación (R²) y la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE).

Por último, para cada condición hídrica, se analizó la Bs con y sin NF en relación con Bo y el aporte de la NF cuando es incluida; y en particular, la relación de la condición hídrica y la inclusión de la NF en situaciones de napas someras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores medios anuales de la profundidad de la NF correspondiente a la localidad, para el período 2000-2017, se grafican en la Figura 2. Se observa que la NF presentó picos de ascensos y descensos de variada intensidad. La determinación de la tendencia lineal temporal pone en evidencia un ascenso persistente y significativo de la misma. Cisneros *et al.* (1999) reportó que el ascenso generalizado de las NF, en la localidad en estudio, condiciona la selección de las especies de cultivo que se adapten a esas situaciones. Posiblemente alfalfa no estaría ajena a tener diversas respuestas en el crecimiento en esas condiciones hídricas.

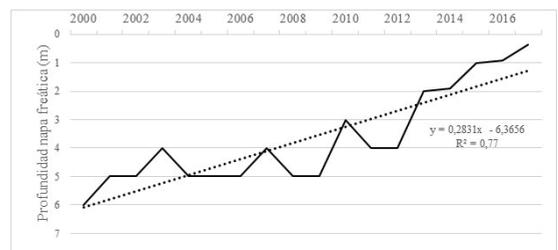


Figura 2. Evolución de la profundidad de la Napa Freática anual media en la localidad de Marcos Juárez, período 2000-2017 y su tendencia lineal (ecuación y R²).

En general, la diferencia entre valores estimados por el modelo para la predicción de la biomasa forrajera en cada corte, considerando la profundidad de la NF, tuvo un buen ajuste. El modelo AquaCrop explicó alrededor del 70% de la relación entre los valores de Bo y Bs (Figura 3), y un RMSE de 0,409 tn MS ha⁻¹. Estos valores fueron considerados como aceptables por otros autores en diversas validaciones del modelo, por ejemplo: en frijol (Olivera *et al.*, 2016); en soja (Morasi *et al.*, 2007); en papa (Montoya *et al.*, 2016); en cebada

(Araya *et al.*, 2010), en avena y raigrás (Terán Chaves, 2015), entre otros.

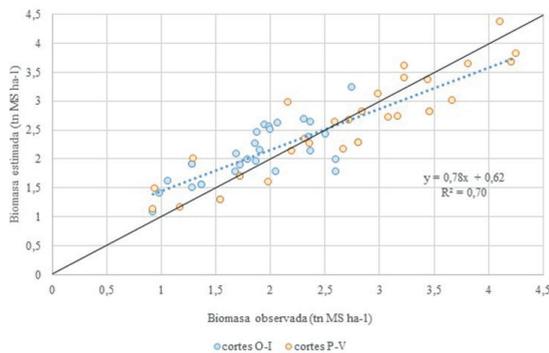


Figura 3. Relación entre valores de la biomasa observados en cada corte y la biomasa estimada a partir del Modelo AquaCrop (tn MS ha⁻¹), considerando la napa freática. Línea punteada la tendencia lineal y la línea entera la relación 1:1

Los valores medios de la Bs obtenidos considerando la NF, fueron menores en la estación otoño–invernal ($2,12 \pm 0,60$ tn MS ha⁻¹) que los estimados para P-V ($2,64 \pm 0,84$ tn MS ha⁻¹) (Tabla 1), en concordancia con las productividades medias observadas. Las diferencias de la producción se relacionan con sus respectivas tasas de crecimiento. En este aspecto, Brummer *et al.* (2000), encontraron períodos de alto crecimiento, principalmente a mediados de primavera–principios de verano y luego, descenso en el crecimiento a partir de mediados de verano, como respuesta a la disminución en la longitud del día. Sin embargo, en este estudio, se puede observar una mayor dispersión en los valores de la Bo de los cortes de P-V que en los de O-I, ya que en algunos cortes primavero-estivales se observan productividades del orden de las otoño-invernales (Figura 3). Teniendo en cuenta que en el período P-V no hay limitante en cuanto a la radiación, esta dispersión en las productividades podría estar relacionado con la condición hídrica de cada corte y con el aporte de la NF.

En O-I, los valores medios de Bs sin considerar la profundidad de la NF, fueron menores que

cuando se la incluye (Tabla 1), mientras que en P-V las estimaciones con o sin NF no presentan diferencias. Los coeficientes de determinación lineal sin NF no serían válidos para lograr buenas estimaciones de biomasa, especialmente en O-I. Esto muestra la importancia del aporte de la NF en el balance de agua en el suelo, para la estimación de la biomasa de alfalfa. En relación con los resultados de incluir la NF, se observó un RMSE medio de $0,41$ tn MS ha⁻¹, y un valor de $0,76$ tn MS ha⁻¹ cuando no se incluye la NF. Con el objetivo de abordar el tema desde una perspectiva distinta, en la Figura 4, se representan diagramas de dispersión para corroborar visualmente las relaciones observadas al sumar o no los aportes de la NF en el modelo. Se pueden identificar algunos

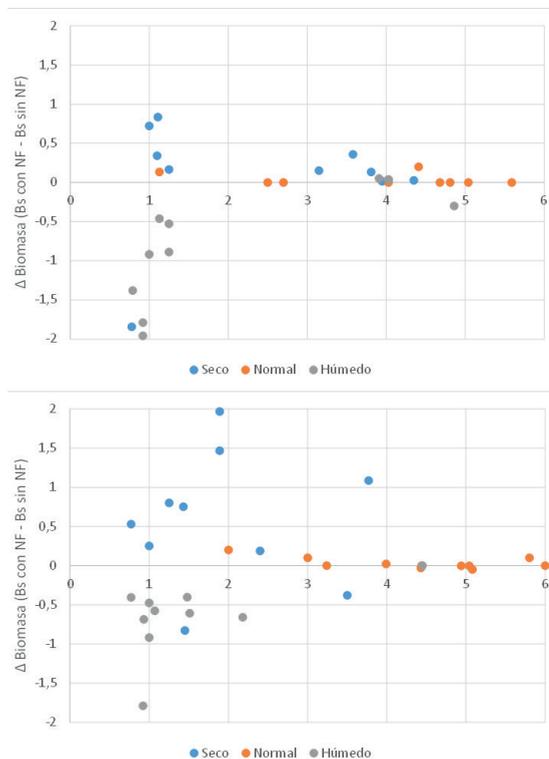


Figura 4. Diagrama de dispersión entre la diferencia de producción estimada con y sin napa freática (tn MS ha⁻¹) y la profundidad (NF, m). Superior: Otoño-Invierno; Inferior: Primavera-Verano.

Tabla 1. Relaciones estadísticas entre las biomásas observadas (Bo, tn MS ha⁻¹) y biomásas estimadas (Bs, tn MS ha⁻¹) considerando la napa freática (NF) y sin considerarla.

	Biomasa			Con NF		Sin NF	
	Bo	Bs con NF	Bs sin NF	R ²	RMSE	R ²	RMSE
Período Otoño–Invierno	$1,92 \pm 0,64$	$2,12 \pm 0,60$	$2,30 \pm 0,71$	0,71	0,408	0,11	0,866
Período Primavera–Verano	$2,75 \pm 0,97$	$2,64 \pm 0,84$	$2,68 \pm 0,90$	0,83	0,407	0,56	0,658

patrones de comportamiento entre la variación de la biomasa estimada y la profundidad de NF, en los distintos períodos de crecimiento y condiciones hídricas.

En la Figura 4 se muestra que napas más cercanas a la superficie se relacionaron, en algunas oportunidades, con diferencias negativas entre estimaciones con y sin NF y en otras con diferencias positivas. En general, tanto en O-I como en P-V, la capacidad de transporte capilar de NF con profundidades mayores a los 2 m no provocan importantes cambios en la cantidad de materia seca acumulada en los cortes modelados. Los cortes con condiciones hídricas normales se observan en la zona de estabilización entre la Bs con NF y sin NF. En NF con profundidades menores a los 2 m, el comportamiento difiere según la condición hídrica de los cortes. Cuando las condiciones son húmedas tiende a disminuir la producción de biomasa cuando se incluye en el modelo la NF y en forma opuesta en condiciones secas. Esto indica que, para el cultivo de alfalfa, según el modelo, napas a menos de 2 m de la superficie podría estar condicionando la producción de biomasa forrajera, de acuerdo con la condición hídrica del corte. Resultados similares fueron encontrados por Jobbágy y Noretto (2009). Estos autores señalan que la banda óptima de utilización de la napa por cultivos de maíz y soja, en suelos sin impedimentos físicos, se considera que oscila entre 1,20 a 2,40 metros. Chiacchiera *et al.* (2016) expresa que la profundidad óptima de la NF para alfalfa en invernáculo es de 1 m, con una profundidad máxima de exploración radicular de 3 m. Dada la mayor variación entre Bs con y sin NF cuando la misma se encontraba a menos de 2 m de la superficie, se tomaron los cortes asociados a esta situación y se analizó el comportamiento del modelo en las condiciones húmedas y secas, comparando los resultados del mismo (Bs con y sin NF) con la Bo (Figura 5).

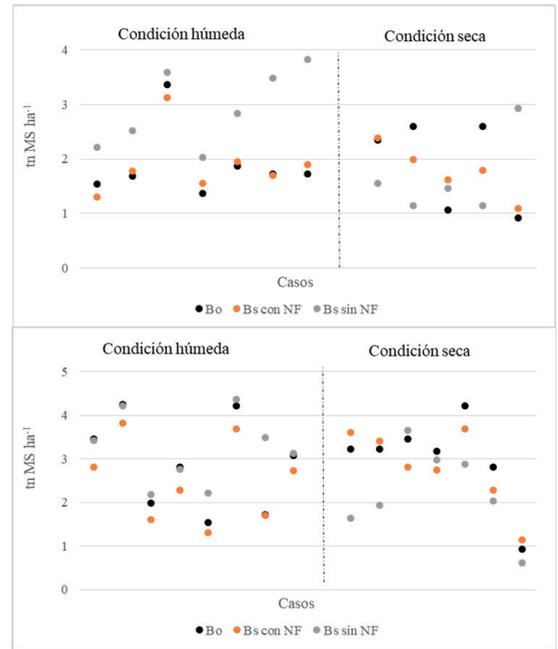


Figura 5. Diagrama de dispersión entre la diferencia de producción observada y estimada con y sin napa freática (tn MS ha⁻¹), en la profundidad de la NF de 0 a 2 m (NF, m), para las distintas condiciones climáticas. Superior: Otoño-Invierno; Inferior: Primavera-Verano.

En O-I, en condiciones húmedas, se observa un muy buen ajuste del modelo considerando la NF, y es destacable que la Bs sin NF es siempre superior. En condiciones secas, en líneas generales, considerar la NF genera un mejor ajuste de la Bo, y la Bs sin NF toma valores menores a la Bs con NF.

En P-V, de los 8 cortes en condiciones húmedas, sólo 3 de ellos ajusta mejor si el modelo considera la NF; mientras en condiciones secas introducir los niveles freáticos mejoran las estimaciones. Un aspecto particular se relaciona a la fluctuación del aporte por ascenso capilar que realiza la NF para cada situación hídrica y época de crecimiento

Tabla 2. Valores promedio y desvíos de: biomasa observada (Bo), biomasa estimada con y sin NF (según cálculos del modelo AquaCrop) y sus respectivos RMSE (tn MS ha⁻¹), la profundidad de napa freática (m) y sus aportes (mm), por estación de crecimiento y condición hídrica.

Período estacional	Condición climática	Biomasa observada (Bo)	Biomasa estimada (Bs) con NF	RMSE	Biomasa estimada (Bs) sin NF	RMSE	Profundidad NF (m)	Aporte NF (mm)
O-I	Seco	1,96±0,58	2,17±0,74	0,317	1,92±0,6	1,019	2,44±1,47	71,31±48,22
	Normal	1,9±0,56	2,27±0,54	0,425	2,29±0,5	0,455	3,82±1,37	14,44±29,46
	Húmedo	1,78±0,58	1,94±0,52	0,484	2,58±0,81	0,98	2,19±1,62	58,45±45,27
P-V	Seco	2,95±1,15	2,89±1,01	0,388	2,41±1,06	0,654	1,94±1,01	71±51,22
	Normal	2,49±0,73	2,51±0,5	0,415	2,47±0,53	0,383	4,36±1,15	2,97±2,79
	Húmedo	2,84±0,96	2,53±0,86	0,416	3,18±0,81	0,868	1,53±1,11	84,76±56,22

(Tabla 2). Se destacan los mm aportados por la NF en condiciones secas en O-I y en P-V. En condiciones normales el aporte de la NF es mínimo, mientras que en situaciones húmedas los aportes son significativos.

En Marcos Juárez, el ascenso de la NF constituyó, en general, una oportunidad para la producción de alfalfa. Para la condición seca, se observa, en general, que la NF actúa como una importante fuente de agua para la especie, en especial en O-I, y así mitigar los períodos de sequía. Cisneros *et al.* (1999), Dardanelli y Collino (2002) y Nosetto *et al.* (2009) demuestran que napas poco profundas representan una fuente adicional de agua en cultivos para la localidad, coincidente con lo encontrado para alfalfa (Figura 5). En términos medios en los períodos húmedos considerar el aporte de la NF arroja menores diferencias entre la Bo y la Bs con NF que sin incluirla (Tabla 2), especialmente en O-I. Sin embargo, es destacable que cuando la NF se encontraba a menos de 2 m de la superficie en el período O-I, Bs sin NF sobrestima considerablemente los valores de Bo, por lo que se infiere que la NF fue una limitante para el crecimiento de la alfalfa pudiendo ocasionar pérdidas por anoxia radicular (Figura 5). Al respecto, los trabajos realizados por Cisneros *et al.* (1999, 2011 y 2013) señalan que en esa región napas a menos de 1,5 m configura una situación de alto riesgo y baja productividad potencial del sitio.

En condiciones húmedas en P-V el modelo AquaCrop subestima la Bo al sumar los aportes de la NF, estas condiciones de gran aporte de agua ya sea por precipitaciones y/o por NF son leídas por el modelo como una limitante aumentando los porcentajes de estrés por cierre de estomas (Martín, 2021).

La estimación del modelo sin considerar la NF produjo RMSE que triplican, en condiciones seca, y duplican en situaciones húmedas, a los errores observados en Bs con NF (Tabla 2). Mientras que, en condiciones normales, se observa similitud en los ajustes. En términos generales, cuando la NF es considerada mejora los valores de la estimación. Resultados que señalan la importancia de poder controlar el nivel freático a través de prácticas que puedan minimizar el grado de saturación en el suelo o maximizar el consumo de agua según sucedan situaciones húmedas o secas en la especie.

El modelo permitió observar aportes elevados de agua por la presencia de la NF. Esa oferta se relacionaría con las propiedades hidráulicas de los suelos Argiudoles típicos de la localidad.

El agua almacenada en el suelo puede ser una fuente importante de abastecimiento, sumado a considerar los aportes de la NF, que en la zona se la describe como un mosaico de profundidades bastante complejo de unidades menores y se destaca su incidencia en los rendimientos de diferentes cultivos (Iriondo, 2010).

CONCLUSIONES

La incorporación en el modelo AquaCrop 6.1 de la profundidad del nivel freático y los aportes que realiza por ascenso capilar, permite comprender las respuestas de la producción de la biomasa de alfalfa a la dinámica freática en la localidad analizada.

La mejor estrategia que posee la especie para incrementar el uso del agua y la producción de forraje es la capacidad del sistema radical para utilizar el agua disponible en NF relativamente profundas. En consecuencia, la NF actuaría como una importante fuente de agua para alfalfa mitigando los períodos de sequía que podrían suscitarse.

En un escenario húmedo y napas freáticas a partir de hasta 2 m de profundidad, tienen un alto riesgo de anegamiento y como consecuencia, limita el crecimiento de la especie, especialmente en O-I. En las condiciones donde la napa se encuentra entre 0,5 y 2 m de profundidad, la ocurrencia de un escenario seco, mostró máximos incrementos en las producciones de biomasa del orden de una tonelada de materia seca en otoño-invierno, y de dos toneladas en primavera-verano, causado por la contribución que realizó la presencia de la NF.

BIBLIOGRAFÍA

- Araya, A.; S. Habtu, K.M. Hadgu, A. Kebede and T. Dejene, 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management* 97(11):1838–1846.
- Basigalup, D.H. y R. Rossanigo, 2007. Panorama actual de la alfalfa en Argentina. En Basigalup, D.H. (Ed.): *El cultivo de alfalfa en Argentina*. Buenos Aires. INTA, pp. 15–24.
- Brummer, E.C.; M. Shah and D. Luth, 2000. Reexamining the relationship between fall dormancy and winter hardiness in alfalfa. *Crop Sci.* 40:971–977.
- Chiacchiera, S.; N. Bertram, E. Taleisnik and E. Jobbágy, 2016. Effect of watertable depth and salinity on growth dynamics of Rhodes grass (*Chloris gayana*). *Crop and*

- Pasture Science 67(8):881–887.
- Cisneros, J.M.; J. Cantero and A. Cantero Gutiérrez, 1999. Vegetation, soil hydrophysical properties, and grazing relationships in Saline sodic soils of Central Argentina. *Canadian Journal of Soil Science* 79(3):399–409.
- Cisneros, J.M.; A. Degioanni, A. Cantero y H. Videla Mensague, 2011. Modelos de comportamiento de la napa freática en ambientes afectados por sales. En: Segunda Reunión de la Red Argentina de Salinidad RASTUC 2011. San Miguel de Tucumán, Argentina, 81 pp.
- Cisneros, J.M.; J.M. Scilingo, O. Giayetto, F. Morla y E.E. Jobbágy, 2013. Uso del modelo de simulación Aquacrop FAO para estimar el aporte subterráneo de agua al cultivo de soja. En Actas XXIV Congreso Nacional del Agua. San Juan. <https://www.researchgate.net/publication/284029051> (consultada: 12/05/2022).
- Dardanelli, J.L. and D.J. Collino, 2002. Water table contribution to alfalfa water use in different environments of the Argentine Pampas. *Agriscientia* 19:11–18.
- Hernández, N.; F. Soto y A. Caballero, 2009. Modelos de simulación de cultivos. *Cultivos Tropicales* 2009 30(1):73–82.
- Iriondo, M., 2010. Geología del Cuaternario en Argentina. *Moglia, Corrientes*, 437 pp. http://www.museoameghino.gob.ar/archivos/repositorios/138_descarga_95_version_digital_del_libro_geologia_del_cuaternario_en_argentina.pdf (consultada: 5/06/2020).
- Jobbágy, E.C. y M.D. Nosetto, 2009. Napas freáticas: pautas para comprender y manejar su impacto en la producción. En: XVII Congreso Aapresid. Rosario, 19 al 21 de agosto de 2009. http://gea.unsl.edu.ar/pdfs/Jobbágy_et_al_aapresid_2009.pdf (consultada: 9/07/2022)
- Martín, B., 2021. Estimación de la producción de forraje de *Medicago sativa* L. a partir de variables climáticas y edáficas y desarrollo de un índice de valoración forrajero, en la región pampeana argentina. Tesis Doctoral. Ingeniería Agronómica Univ. Nac. Rosario, Facultad de Ciencias Agrarias, UNR, 170 pp.
- Montoya, F.; D. Camargo, J.F. Ortega, J.I. Córcoles and A. Domínguez, 2016. Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management* 164 Part 2:267–280.
- Morasi, D.N.; J.G. Arnold, M.W.V. Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel and T.L. Veith, 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885–900.
- Nosetto, M.D.; E.D. Jobbágy, R.B. Jackson and G.A. Sznaider, 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research* 113(2):138–148.
- Olivera, N.T.; O.B. Manrique, Y.G. Masjuan and A.M. Guerrero Alega, 2016. Evaluation of AquaCrop model in crop dry bean growth simulation. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 25(3):23–30.
- Raes, D.; P. Steduto, T.C. Hsiao and E. Fereres, 2017. AquaCrop version 6.0 reference manual. Rome: FAO, 2017. <https://www.fao.org/documents/card/es/c/BR267E/> (Consultada el 21/02/2020).
- Steduto, P.; T.C. Hsiao, D. Raes and E. Fereres, 2009. AquaCrop–The FAO Crop model to simulate Yield response to Water: I. Concepts and Underlying principles. *Agronomy Journal* 101(3):426–437.
- Terán Chaves, C.A., 2015. Determinación de la huella hídrica y modelación de la producción de biomasa de cultivos forrajeros a partir del agua en la Sabana de Bogotá (Colombia). Tesis Doctoral. Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. España, 297 pp. <http://hdl.handle.net/10251/54133> (consultada: 24/04/2021).

Índices climáticos de precipitación y temperatura de San José de Metán, Salta, Argentina

Vázquez, V. N.; Vargas, S. M. y Visentini, E.

RESUMEN

El cambio climático está afectando a los patrones de precipitación, hay probabilidad de que aumenten en las latitudes altas, mientras que en las regiones subtropicales se prevé su disminución. El objetivo del trabajo es obtener índices climáticos de precipitación y temperatura propuestos por Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) y analizar sus tendencias en la localidad de San José de Metán, provincia de Salta, período 1982-2020, con datos diarios del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y, sensores remotos utilizando Google Earth Engine. El tratamiento de los datos del SMN revelan un alto porcentaje de faltantes. Los resultados confirman las tendencias detectadas regionalmente por otros investigadores. Para los índices de precipitación, no se detectan tendencias significativas, sin embargo, se presentan pendientes con valores decrecientes. Los índices para 1 y 5 días de precipitación máxima en un mes (Rx1day y Rx5day) muestran valores altos de más de 100 mm; mientras que para cantidad de días húmedos y secos consecutivos (CWD y CDD) con disminución y aumento respectivamente. Los índices de temperatura confirman el incremento significativo de la temperatura con valores superiores a 36°C y un máximo de 42°C en la época estival, y disminución de días y noches frías.

Palabras clave: tendencias climáticas; ETCCDI; sensores remotos

Vázquez, V. N.; Vargas, S. M. and Visentini, E. 2022. Climatic indexes of precipitation and temperature of San José de Metán, Salta, Argentina. RADA XIII: 39-46

SUMMARY

Climate change is affecting precipitation patterns, there is a probability that they will increase in high latitudes, while in subtropical regions their decrease is expected. The objective of the work is to obtain climatic indexes of precipitation and temperature proposed by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) and analyze their trends in the town of San José de Metán, province of Salta, period 1982-2020, with daily data from the National Meteorological Service (SMN) and remote sensors using Google Earth Engine. The treatment of the data from the SMN reveals a high percentage of missing. The results confirm the trends detected regionally by other researchers. For the precipitation indexes, without significant trends, however, slopes with decreasing values are presented. The indexes for 1 and 5 days of maximum

precipitation in a month (Rx1day and Rx5day) show high values of more than 100 mm; while for the number of consecutive wet and dry days (CWD and CDD) with decrease and increase respectively. The temperature indexes confirm the significant increase in temperature with values above 36°C and a maximum of 42°C in the summer season, and a decrease in cold days and nights.

Key words: climate trends; ETCCDI; remote sensors

Vázquez, V. N.: *Cátedra de Climatología. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. Sede Regional Orán. Rudecindo Alvarado 751, A4530, San Ramón de la Nueva Orán, Salta, Argentina.*
Vargas, S. M.: *Cátedra de Clima y Suelos. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. Sede Regional Metán-Rosario La Frontera (UNSa-SRMRF). Coronel Vidt 346, A4440, San José de Metán, Salta, Argentina.*
Visentini, E.: *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Agencia de Extensión Rural Metán (INTA AER- Metán), Leandro N. Alem Este 10, A4440, San José de Metán, Salta, Argentina.*
Correspondencia a: ingverovazquez@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Por cambio climático se entiende al cambio en las condiciones climáticas atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, alterando la composición de la atmósfera y que se suma a la variabilidad natural del clima observada a lo largo de la historia de nuestro planeta (CMNUCC, 1992; IPCC 2012). Esto está afectando los patrones de las precipitaciones, con un incremento en las latitudes altas, mientras que en las regiones subtropicales se prevé su disminución. En relación a las precipitaciones monzónicas, se esperan cambios que variarán según la región analizada. El aumento de los extremos meteorológicos y climáticos ha provocado algunos impactos irreversibles a medida que los sistemas naturales y humanos se ven empujados más allá de su capacidad de adaptación (IPCC, 2022). Estas transformaciones tienen un fuerte impacto en las actividades económicas, el bienestar social y los ecosistemas Bárcena *et al.* (2020). Los impactos sobre la producción agrícola prevén una disminución en los rendimientos de los cultivos agudizando la seguridad alimentaria (Ortiz, 2012). Los patrones de precipitación y temperatura en Argentina y el NOA en particular, han sido estudiados por diferentes autores. Minetti *et al.* (2004), encontraron en el NOA seis tipos básicos de variabilidad en las precipitaciones que cubren a regiones meso climáticas importantes. Hurtado *et al.* (2008), analizan el comportamiento de las precipitaciones de la región NOA y la probabilidad de existencia de cambios persistentes, junto con periodos de retorno de eventos extremos. Belmonte (2017), analiza las tendencias anuales y estacionales de temperatura y precipitación mediante índices de

cambio climático de Anguil, región central de Argentina, hallando tendencias anuales positivas en la cantidad de noches cálidas y tropicales, periodos calientes, temperatura mínima diaria, días con lluvia más intensa y cantidad de precipitación anual. Tendencias negativas se encontraron en cantidad de días con heladas y noches frías, en amplitud térmica diaria y, en cantidad de días secos consecutivos (Belmonte, 2017). La variabilidad de la precipitación en el Altiplano Argentino ha sido estudiada por Barrera y Maggi (2018) que verifican la ocurrencia de saltos climáticos en la precipitación relacionados con la Transición Climática del Pacífico de 1976 y/77, con tendencias decrecientes de la precipitación a partir de la década de 1990 en el NOA. Hurtado *et al.* (2019) analizan eventos extremos de temperatura mínima en el NOA, observan una pendiente creciente anual en todas las localidades, con los mayores incrementos en La Quiaca y Jujuy UNJu, con un porcentaje de noches frías (TN10p) que marca una disminución anual de días en toda la Región y con mayor incremento para La Quiaca, Orán y Salta, respectivamente. Asimismo, índices climáticos de precipitación en las provincias de Jujuy y Salta fueron analizados por Alabar *et al.* (2020), observando la tendencia en seis estaciones, con tendencias positivas para los índices de lluvia máxima en un día (Rx1day) y cantidad máxima de lluvia en cinco días consecutivos en un año (Rx5day) para las estaciones Orán Aero y La Quiaca Aero. Los eventos extremos de precipitación y temperatura se repiten más asiduamente en los últimos años en el NOA. En el sur de la provincia de Salta, un temporal en 2016 generó una tragedia con la muerte de 4 personas, debido a una precipitación

extraordinaria que provocó la crecida del río Metán (Infobae, 2016). El objetivo del presente trabajo es obtener índices climáticos de precipitación y temperatura propuestos por ETCCDI y analizar sus tendencias en la localidad de San José de Metán, provincia de Salta durante los períodos 1995-2020, 1982-2020, a partir de datos diarios del SMN, estación Meteorológica de Metán 25° 29'S, 64° 48'O y, de sensores remotos utilizando Google Earth Engine.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplearon datos diarios de precipitación y temperatura proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional de la Estación Climatológica de San José de Metán (Figura 1). Los datos satelitales de precipitación se obtuvieron a partir del producto Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS), conjunto de datos geospaciales de precipitaciones diarias, quasi-global (50°S-50°N), de alta resolución espacial (0,05°) (Funk *et al.*, 2015). Datos satelitales de temperatura mínima y máxima se obtuvieron a partir del producto ERA5, conjunto de productos globales para el clima del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF). Se utilizó la plataforma GEE (Gorelick *et al.*, 2017) para automatizar la extracción de las series temporales de datos de precipitación y temperaturas. Se desarrolló un algoritmo empleando Java Script, que permite la

aplicación de una secuencia de procesos sobre los productos satelitales descriptos, para el área de estudio seleccionada. Se creó un área buffer de 30 km alrededor de la ubicación de la estación meteorológica y se procedió a su procesamiento para lograr el formato de entrada de datos requerido por el software libre RCLimDex (1.0), desarrollado por expertos del Departamento de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá (Zhang and Feng, 2004) y ejecutado a través del software R versión 4.1.2. Los índices calculados para la localidad de Metán se detallan en Tabla 1.

Se efectuó el control de calidad y se establecieron

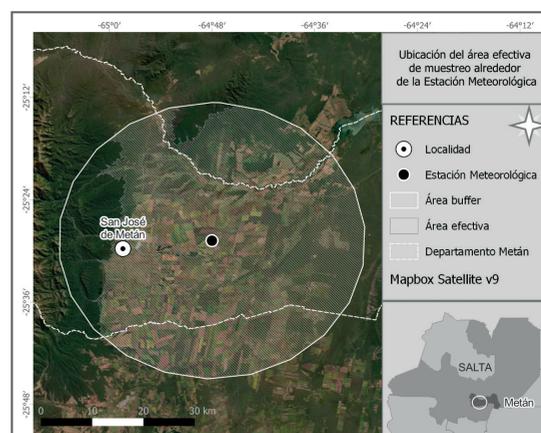


Figura 1. Ubicación de la estación meteorológica y área buffer, en el departamento de San José de Metán. Salta, Argentina.

Tabla 1. Índices climáticos de precipitación y temperatura calculados para San José de Metán, Salta.

ID	Nombre del Indicador	Definición	UNIDAD
Rx1day	Cantidad Máxima de precipitación en un día	Máximo mensual de precipitación en 1 día	mm
Rx5day	Cantidad Máxima de precipitación en 5 días	Máximo mensual de precipitación en 5 días consecutivos	mm
R10	Número de días con precipitación intensa	Número de días en un año en que PRCP ≥ 10mm	Días
CDD	Días secos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con RR < 1mm	Días
CWD	Días húmedos consecutivos	Número máximo de días consecutivos con RR ≥ 1mm	Días
PRCPTOT	Precipitación total anual en los días húmedos	Precipitación anual total en los días húmedos (RR ≥ 1mm)	mm
Tmáxmean	Temperatura máxima media	Valor mensual medio de las temperaturas máximas	°C
Tmínmean	Temperatura mínima media	Valor mensual medio de las temperaturas mínimas	°C
SU25	Días de verano	Número de días en un año cuando TX (máximo diario) > 25°C	Días
TR20	Noches tropicales	Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) > 20°C	Días
TXx	Máx Tmáx	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	°C
TN10p	Noches frías	Porcentaje de días cuando TN < 10th percentil	Días
TX10p	Días fríos	Porcentaje de días cuando TX < 10th percentil	Días
TN90p	Noches calientes	Porcentaje de días cuando TN > 90th percentil	Días
TX90p	Días calientes	Porcentaje de días cuando TX > 90th percentil	Días

critérios referidos a datos faltantes, estos fueron codificados como -99,9 para ambas variables; para la variable precipitación, los datos con valores menores a 0,1 mm o iguales a 0 mm como 0,09. Se calculó el porcentaje de datos faltantes para ambas series temporales de datos, obteniendo en la serie proveniente del SMN un valor elevado (Tabla 2). Se calcularon índices climáticos con los datos de ambas series detectando que, debido al gran porcentaje de datos faltantes existente en la información provista por el SMN, RClimDex (1.0) presentó problemas en el cálculo de algunos de los índices seleccionados, mientras que los calculados mostraron resultados incoherentes. Los datos provenientes de sensores remotos, debido al bajo porcentaje de datos faltantes (Tabla 2), permitió la determinación de la totalidad de los índices climáticos seleccionados. A los índices obtenidos se les aplicó el Test no paramétrico de Mann Kendall para determinar la tendencia y significancia estadística (), sugerido para evaluar tendencias en series hidrometeorológicas y otras series ambientales (Muñoz Marín, 2008). Los niveles de confianza utilizados fueron del 90, 95, 99 y 99,9%. Se graficaron las series anuales, junto con las tendencias calculadas por regresión lineal de mínimos cuadrados (Belmonte, 2017; Alabar, 2020)

Tabla 2. Datos según origen, porcentaje de datos faltantes y períodos analizados.

Localidad	Porcentaje datos faltantes (%)	Período			Cantidad de años	
		Datos	Pp	Tmax Tmin		
San José de Metán	Estación	12,3	30,2	20,0	1995-2020	25
	Imagen satelital	0,0	1,4	1,4	1982-2020	38

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La información proporcionada por el SMN evidenció un alto porcentaje de datos faltantes, en contraposición a la obtenida por el procesamiento de las imágenes satelitales, que ofrece un ínfimo porcentaje de faltantes (Tabla 2). Por esta razón, solo se trabajó con los datos provenientes de las imágenes satelitales, debido a que RClimDex (1.0) no puede realizar el cálculo de algunos de los índices climáticos, porque requiere menos de 25 % de datos faltantes para las variables analizadas (Armenta Porras, 2016). Para la OMM (2018) el umbral recomendado es < 20 %, debido a que un faltante superior al 15% genera reducciones significativas en la confiabilidad de los resultados, debido a que en este período faltante puede haber señales importantes de cambio en las variables

climáticas y/o eventos climáticos extremos no registrados. En la región NOA, Alabar *et al.* (2020), sugieren un período mínimo de 30 años y menos de 10% de datos faltantes en coincidencia con Núñez González y García Suárez (2018).

Índices de precipitación

En la Tabla 3, se muestran los valores de pendiente para los índices climáticos de precipitación y su significancia estadística. Para los índices climáticos de precipitación, no hay tendencias significativas. Todos presentan valores de pendientes negativas, a excepción de CDD con pendiente positiva y una significancia estadística del 90%, lo que indica una disminución en las precipitaciones y aumento de cantidad de secos consecutivos (Tabla 3).

Tabla 3. Pendientes de las tendencias lineales de los índices climáticos de precipitación (Pp) para San José de Metán, Salta y su significancia estadística al +90%, **95%, ***99% y ****99,9%.

Índice	Pendiente
Rx1day - Cantidad Máxima de precipitación en un día (mm)	-0,04
Rx5day - Cantidad Máxima de precipitación en 5 días (mm)	-0,24
R10 - Número de días con precipitación intensa (días)	-0,05
CDD - Días secos consecutivos (días)	0,51 +
CWD Días húmedos consecutivos (días)	-0,01
PRCPTOT - Precipitación total (mm)	-1,1

Para Rx1day, se observa un máximo de 102,4 mm en el año 1982 y de 119,2 mm en el año 2008, ambos extremos para el mes de marzo, (Figura 2, a). Para Rx5day, cantidad máxima de precipitación en 5 días, no se observa tendencia significativa con pendiente negativa de -0,24 (Tabla 3). Para R10, los años 1984, 1987, 2001 y 2015 muestran períodos de más de 30 días de precipitación intensa (Figura 2, b).

CDD muestra valores en aumento de cantidad de días secos consecutivos, siendo el 2017 el año con el mayor valor con 112 días sin lluvias (Figura 3, c). Para CWD, mayor número de días consecutivos en un año con precipitación mayor o igual a 1 mm, se obtiene una pendiente negativa de -0,01 para el período 1982-2020 (Tabla 3) Para PRCPTOT, precipitación total, se obtiene una pendiente negativa de -1,10. Los valores máximos y mínimos para el período considerado oscilan entre 814,1 mm en el año 1984 y 517,9 mm en el año 2005 (Tabla 3, Figura 3, d).

Estos resultados están en coincidencia con lo

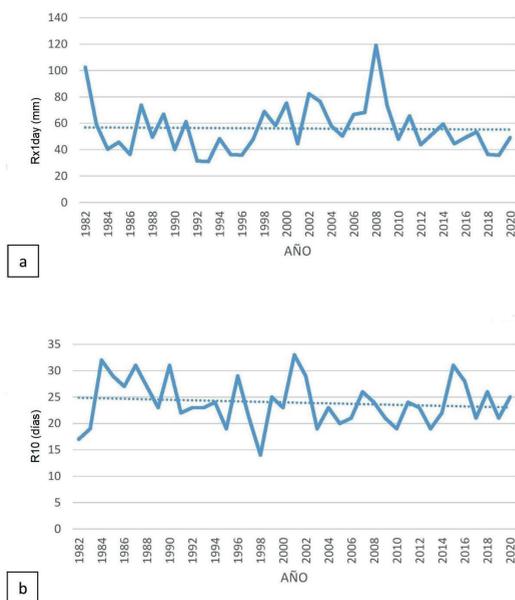


Figura 2. Índices climáticos de precipitación RX1day a) y R10 b), para San José de Metán. Período 1982-2020, tendencias calculadas por regresión lineal de mínimos cuadrados y pendientes (línea punteada).

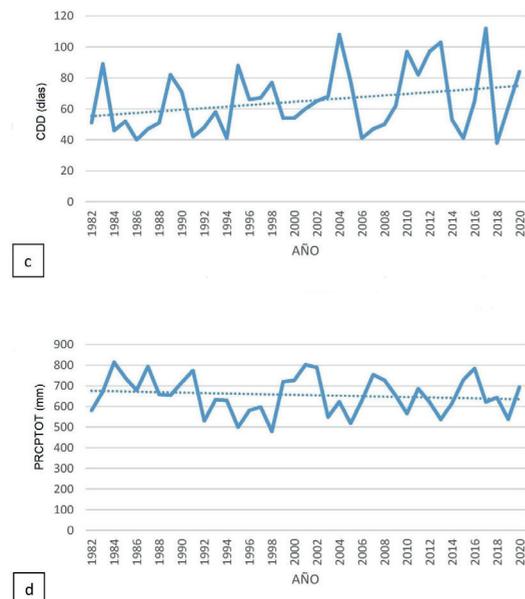


Figura 3. Índices climáticos de precipitación CDD c) y PCPTOT d), para San José de Metán. Período 1982-2020, tendencias calculadas por regresión lineal de mínimos cuadrados y pendientes (línea punteada).

encontrado por Hurtado *et al.* (2008), Belmonte (2017), Barrera y Maggi (2018) y Alabar *et al.* (2020). También, se debe tener en cuenta que la

variabilidad de las precipitaciones podría estar influenciada por la topografía, ya que San José de Metán posee hacia el oeste las Sierras Subandinas y se generaría un amparo húmedo sobre los valles interiores, como enuncia Minetti *et al.* (2004). Asimismo, los índices calculados revelan el incremento de intensidad y frecuencia de los fenómenos extremos acentuando la vulnerabilidad de la agricultura, viéndose afectadas las reservas de agua en el suelo con disminución del almacenaje según Ortiz (2012) y Toconás (2019).

Índices de temperatura

En la Tabla 4, se muestran los valores de pendiente para los índices climáticos de temperatura y su significancia estadística.

Tabla 4. Pendientes de las tendencias lineales de los índices climáticos de temperatura para San José de Metán, Salta y su significancia estadística al +90%, **95%, **99% y ***99,9%.

Índice	Pendiente
Tmáxmean - temperatura máxima media (°C)	0,03**
Tmínmean - temperatura mínima media (°C)	0,01+
SU 25 - Días de verano (días)	0,51*
TR 20 - Noches tropicales (días)	0,67***
TXx - Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria (°C)	0,05
TX10p - Días fríos (días)	-0,07*
TX 90p - Días calientes (días)	0,18**
TN10p - Noches frías (días)	-0,03
TN90p - Noches calientes (días)	0,18***

Para temperaturas máximas y mínimas medias se observan tendencias significativas y, las pendientes obtenidas son positivas con valores de 0,03 y 0,01 respectivamente (Tabla 4). Los valores van incrementándose en los últimos años de la serie, teniendo valores mayores a 30° C en los meses correspondientes al trimestre estival y, una mínima mayor a 4° C en el mes de junio. En el índice días de verano SU25, se obtiene una tendencia significativa y una pendiente positiva de 0,51 (Tabla 4), hacia la mayor cantidad de días con temperaturas mayores a 25°C, con períodos entre 180 días a más de 200 días. En TR20 noches tropicales, se presenta tendencia significativa y pendiente positiva (0,67) (Tabla 4), con períodos superiores a 40 días, con un máximo para el año 2013 y 2016 con 47 noches (Figura 4 a). Para el índice TXx, valor mensual máximo de temperatura máxima, se obtiene una tendencia significativa y pendiente positiva (Tabla 4). Se presentan temperaturas superiores a 36°C entre los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre y,

un valor máximo de 42°C para el año 2019 en los meses de octubre.

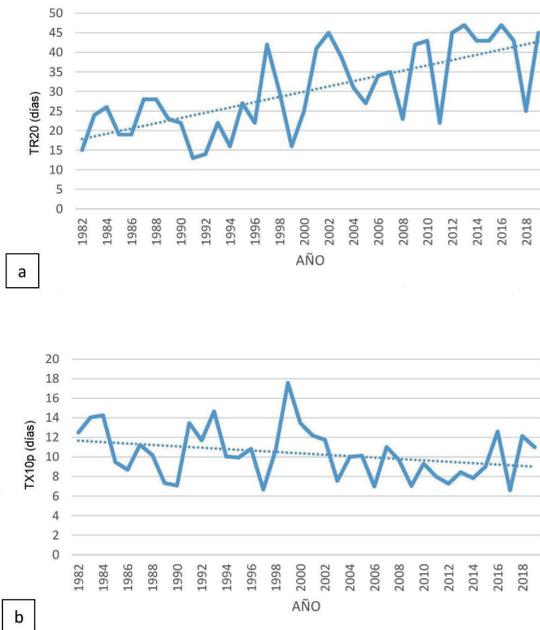


Figura 4. Índices climáticos de temperatura TR20 a) y TX10p b), para San José de Metán. Período 1982-2020, tendencias calculadas por regresión lineal de mínimos cuadrados y pendientes (línea punteada).

En el índice TX10p, días fríos, se obtiene tendencia significativa y una pendiente negativa de $-0,07$ (Tabla 4), es decir hacia una disminución de cantidad de días fríos (Figura 4, b). Al contrario, TX90p, con tendencia significativa positiva, evidencia un aumento en la cantidad de días calientes (Tabla 4, Figura 5 c). En TN10p, no existe tendencia significativa, sin embargo, se observa una pendiente negativa $-0,03$ (Tabla 4, Figura 5 d), lo que representa una disminución de las noches frías, mientras que TN90p, con una tendencia significativa y pendiente positiva de $0,18$, representa un incremento de las noches calientes (Tabla 4).

Para los índices climáticos de temperatura, prevalecen las pendientes positivas con significancia estadística entre 90 y 99,9%, indicando un incremento de los valores de temperatura tanto de día como de noche, y pendientes negativas que señalan una disminución de días y noches frías, acordes con los trabajos de Hurtado *et al.* (2008), Belmonte (2017) y Hurtado *et al.* (2019). Estas tendencias intensifican otras variables meteorológicas como la evapotranspiración favoreciendo la predisposición al estrés hídrico.

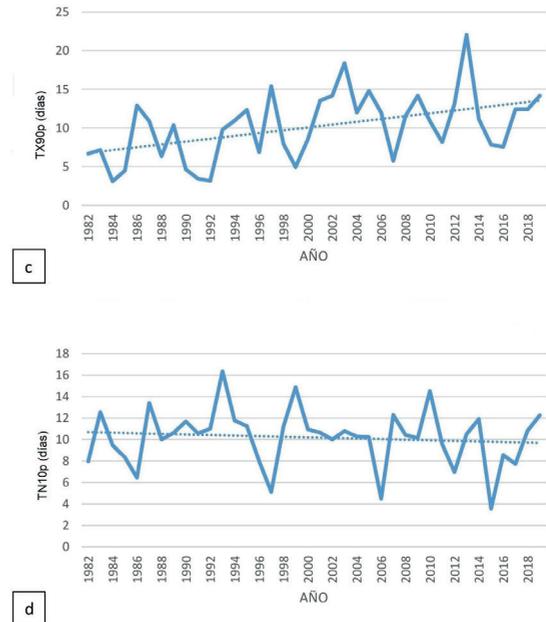


Figura 5. Índices climáticos de temperatura TX90p c) y TN10p d), para San José de Metán. Período 1982-2020, tendencias calculadas por regresión lineal de mínimos cuadrados y pendientes (línea punteada).

CONCLUSIONES

Si bien se pudo acceder a la información proveniente de la estación meteorológica de la localidad, perteneciente al SMN, ésta presentó inconvenientes para el cálculo de todos índices de cambio climático por RClmDex (1.0), debido al gran porcentaje de datos faltantes; los escasos índices obtenidos mostraron resultados incoherentes por lo que fueron descartados. Se encontró, que los datos provenientes del procesamiento de imágenes satelitales constituyen una herramienta valiosa a la hora de realizar análisis de variabilidad climática a través de la determinación de índices. Sería conveniente realizar, en estudios posteriores, un entrecruzamiento de los datos provenientes de ambas fuentes de información para analizar la robustez y comparar los análisis.

Para la localidad de San José de Metán se observa que los índices de cambio climático calculados, con datos provenientes de sensores remotos, relacionados con las precipitaciones no muestran tendencias significativas, sin embargo, las pendientes revelan un comportamiento decreciente de los valores. Los índices Rx1day y Rx5day muestran valores altos de precipitación con más de 100 mm, siendo evidencia de un aumento de la intensidad de las precipitaciones, lo que pudiera llegar a ocasionar crecidas

bruscas en el caudal de los ríos e inundaciones en áreas urbanas circundantes. A su vez, se encuentra una relación entre los índices CWD y CDD, con una disminución de días húmedos y aumento de días secos consecutivos, respectivamente.

En relación a los índices climáticos vinculados a la temperatura, se evidencia una clara tendencia al aumento de las temperaturas, aumentando los períodos de días calurosos y disminuyendo la frecuencia de días frescos. Los índices de ambas variables analizadas, muestran tendencia positiva en intensidad y frecuencia de los fenómenos extremos. Estas condiciones podrían afectar negativamente a rendimientos de los principales cultivos de la localidad, en particular soja (*Glycine max*), maíz (*Zea mays*) y trigo (*Triticum sp*), debido a que exacerbaría variables meteorológicas como la evapotranspiración, afectando las reservas de agua en el suelo, disminuyéndolas y haciendo vulnerable los cultivos al estrés hídrico, además cada uno de ellos presenta susceptibilidad crítica a alguna de las variables en algún momento de su ciclo productivo que se debería considerar a la hora de diagramar su producción.

Por lo expuesto, el aporte de estos resultados se podría correlacionar con estadísticas productivas de los cultivos de mayor importancia de la localidad, analizando además requerimientos de los mismos. Esto permitiría determinar su influencia en el rendimiento, posibilitando la toma de decisiones sobre su manejo, brindar apoyo técnico a productores locales y establecer medidas de adaptación y mitigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Alabar, F.; Hurtado, R.; M. Valdiviezo Corte y C. Moreno, 2020. Análisis temporal de índices climáticos de precipitación de las provincias de Salta y Jujuy. Revista Científica de la Facultad de Ciencias Agrarias – UNJu. Jujuy, Argentina. Vol 13 (2):7–13. http://www.fca.unju.edu.ar/media/revista_articulo/trabajo1_Alabar_y_otros.pdf. (Consultado, 12/01/2022).
- Armenta Porras, G.E., 2016. Análisis de tendencias climáticas y eventos climáticos extremos para Ecuador. 48 pp. <https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/ECU/13%20An%C3%A1lisis%20de%20tendencias%20clim%C3%A1ticas%20y%20eventos%20clim%C3%A1ticos%20extremos%20para%20Ecuador.pdf> (Consultado, 15/01/2022).
- Bárcena A.; J.L. Samaniego, W. Pérez y J.E. Alatorre, 2020. La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿Seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?. Libros de la CEPAL, N° 160 (LC/PUB.2019/23-P), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45677/1/S1900711_es.pdf (Consultado, 07/01/2022).
- Barrera D. y A. Maggi, 2018. Variabilidad de la precipitación en el Altiplano Argentino. Incidencia de la transición climática 1976/1977 y del fenómeno El Niño - Oscilación del Sur en el Noroeste Argentino. Revista Meteorológica. Vol 43 (1):41– 71.
- Belmonte, M.L., 2017. Índices de Cambio Climático en Anguil: tendencias del período 1961-2016. Revista Argentina de Meteorología. Editada por la Asociación Argentina de Meteorología. RADA, 2017, VOL. VIII:29–42. Córdoba, Argentina. https://www.siteaada.org/_files/ugd/cf1a17_b9a8c59753004d8984ef220a5439e3db.pdf. (Consultado, 19/12/2021).
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático Naciones Unidas, 1992. FCCC/INFORMAL/84/Rev.1 GE.14-20489 (S) 171114 181114. https://unfccc.int/sites/default/files/convention_text_with_annexes_spanish_for_posting.pdf. (Consultado, 12/11/2021).
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2012. Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Resumen para responsables de políticas. Informe de los Grupos de trabajo I y II del IPCC. ISBN 978-92-9169-333-7. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC_SREX_ES_web.pdf (Consultado, 10/01/2022).
- Hurtado R.; A. Faroni, L. Serio y H. Vich, 2008. Estudio de las precipitaciones en la región del Noroeste de la Argentina. XII Reunión Argentina de Agrometeorología, 8 al 10 de octubre de 2008. San Salvador de Jujuy – Argentina. Acta XII:35–36.
- Hurtado, R.; C. Moreno, F. Alabar, M. Valdiviezo Corte, S. Vilca Ochoa, M.R. Portal y V. Vázquez, 2019. Eventos extremos de mínimas en el Noroeste Argentino. VII Jornadas Integradas Facultad de Ciencias Agrarias – UNJu. 16 al 18 de octubre de 2019. Libro de Resúmenes, pp 54.
- Infobae. (9 de febrero de 2016) Temporal en Salta: una mujer y sus tres nietos murieron al ser arrastrados por la crecida. <https://www.infobae.com/2016/02/09/1788762-temporal-salta-una-mujer-y-sus-tres-nietos-murieron-al-ser-arrastrados-la-crecida/> (Consultado, 05/04/2022)
- Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change (IPCC), 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report

- of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/> (Consultado 07/07/2022).
- Minetti, J.L.; W.M. Vargas y A. Albarracín, 2004. La variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones en el Noroeste de Argentina; Universidad Nacional de San Juan. Instituto de Geografía Aplicada; Revista de Geografía; 8; 12-2004; 32-51. ISSN 1514-1942 <http://hdl.handle.net/11336/104426> (Consultado, 03/12/2021)
- Muñoz Marín, C., 2008. Análisis de la variabilidad en series hidrometeorológicas en una cuenca de cabecera del río Segura: Cuenca del río Mundo. Departamento de Ingeniería térmica y de fluidos. Universidad Politécnica de Cartagena. <https://core.ac.uk/download/pdf/60416059.pdf> (Consultado, 10/12/2021)
- Muñoz, Á., 2013. Análisis estadístico con ClimDex de índices climáticos para las provincias de Pichincha y Napo. Asistencia Técnica para la Generación de Escenarios de Cambio Climático para la Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático del Ecuador. <https://documents.in/document/analisis-estadstico-con-climdex-de-ndice-climticos-analisis-estadstico.html> (Consultado, 15/11/2021).
- Núñez González, G. y J. García Suárez, 2018. Análisis de la calidad de los datos y la tendencia de algunos índices de precipitación en el estado de Jalisco. Revista Internacional de Estadísticas y Geografía, Vol (IX), 14- 27. <https://www.inegi.org.mx/rde/2018/11/07/analisis-la-calidad-los-datos-la-tendencia-algunos-indices-precipitacion-en-jalisco/>. (Consultado, 12/09/2021).
- OMM, O.M., 2018. Guía de Prácticas Climatológicas (Vols. OMM-Nº. 100). Ginebra, Suiza. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10027 (Consultado, 19/11/2021).
- Ortiz, R., 2012. El cambio climático y la producción agrícola. Banco Interamericano de Desarrollo. Unidad de Salvaguardias Ambientales (VPS/ESG) NOTAS TÉCNICAS. # ESG-TN-383
- Toconás, P.J.A., F. D. Alabar; M.P. Arias y R. H. Hurtado, 2019. Estimación del agua en el suelo mediante el balance hidrológico operativo agrícola, para los departamentos Santa Catalina y Cochinoca, provincia de Jujuy. Revista Científica de la Facultad de Ciencias Agrarias – UNJu. Jujuy, Argentina. Vol XII (19):57 –71.
- Zhang, X. y F. Feng, 2004. RCLimdex (1.0). Manual de usuario. Climate Research Branch Environment Canada. Versión en español: Santos, J.L. 22pp.

NORMAS PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS EN LA REVISTA DE LA ASOCIACIÓN DE AGROMETEOROLOGÍA (RADA) EN FORMATO DIGITAL

Normas vigentes desde 2015

Se podrán remitir trabajos en idioma Castellano (Español), Portugués e Inglés

1. La Revista Argentina de Agrometeorología, publicación de la Asociación Argentina de Agrometeorología (AADA), es el órgano de difusión de los trabajos originales de investigación, comunicaciones, notas breves y revisiones de los distintos aspectos de la especialidad agrometeorológica.
2. Los manuscritos se deben enviar al Director de RADA, en un archivo elaborado con un procesador de texto Word, junto con una nota de solicitud de publicación. ([Bajar modelo aquí](#)). Ésta deberá ser llenada y firmada, luego escaneada y el archivo enviado junto con el del artículo.
3. Los trabajos deben estar redactados en forma clara y concisa, en letra Arial o Times New Roman, cuerpo 12, a espacio y medio, con las páginas y las líneas numeradas. Deberán ajustarse estrictamente a lo establecido en estas normas.

4. Los artículos tendrán estructura lógica, con la siguiente secuencia de las secciones:

Título (en castellano y/o portugués e inglés)

Autores (incluyendo lugar de trabajo y dirección postal)

Resumen (no debe superar las 200 palabras)

Palabras clave

(Incluir título en Inglés)

Summary

Key words

Introducción

Materiales y métodos

Resultados y discusión

Conclusiones (sólo si se consideran necesarias)

Agradecimientos (si los hubiere)

Bibliografía

Los títulos de las secciones se colocarán en el centro de la hoja y los subtítulos sobre el margen izquierdo.

5. En el texto, las menciones de autores se harán de la siguiente forma:

Sánchez, 2008 -si se trata de un solo autor.

López y Araya, 2011 -cuando sean dos.

Iglesias **et al.**, 2010 -para el caso de tres o más autores.

Cuando las citas sean más de una se ordenarán cronológicamente. Para el caso de distintos trabajos de un mismo autor en un mismo año, éstos deberán identificarse por el agregado secuencial de una letra: (Sánchez, 2008 a,b). Toda transcripción se pondrá entre comillas, citando al autor.

Las comunicaciones personales se incluirán sólo cuando aporten información esencial no obtenible en fuentes públicas. En tal caso aparecerán en el texto, entre paréntesis, el nombre y año. Ej. (Andrés Fermi, 2010, comunicación personal). Los autores que citen una comunicación personal deberán contar con una autorización por escrito de la persona mencionada.

6. Los nombres científicos completos deberán ser citados en su primera mención. En posteriores menciones podrá usarse solamente la inicial del género más la especie, sin agregar el clasificador.

De utilizar el nombre común, éste deberá ser acompañado por el nombre científico en su primera mención. Todas las locuciones latinas, como así también palabras en idioma extranjero que no tengan su equivalente en castellano, deberán ir en itálica o cursiva (Ej.: *et al.*, *in vitro*, etc.).

7. Los símbolos químicos podrán ser utilizados en el texto (Ej.: N por nitrógeno, C por carbono); en cambio no deberán emplearse las fórmulas químicas corrientes en reemplazo de las correspondientes palabras (Ej.: agua y no H₂O). Se podrán utilizar las abreviaturas de uso corriente, como ATP, ADN, ARN, etc.
8. Cuando en el texto se haga referencia a cantidades, del cero al nueve se expresarán en letras, excepto cuando vayan acompañadas de unidades de medida o la cita incluya números más grandes (por ejemplo: 3, 8 y 15 parcelas). En castellano los decimales llevan coma, y punto cuando es en inglés.
9. Los resultados de los trabajos podrán presentarse en tablas y figuras (se podrán presentar en color cuando lo crea necesario), las que irán al final del artículo con sus correspondientes leyendas, numeradas en forma independiente y correlativa con números arábigos. Conforme a la diagramación de la revista, las dimensiones de las figuras deberán poder adaptarse a 7 cm de ancho (equivalente a una columna) o 15 cm (doble columna); la altura nunca deberá sobrepasar los 20 cm. Las figuras deberán enviarse también en otro archivo separado en formato de imagen jpg o tif, con una resolución no inferior a 300 DPI. Las fotografías se presentarán en color y blanco y negro, y sus dimensiones también deberán ajustarse a 7 o 15 cm de base. No se aceptarán aquéllas que carezcan de una excelente definición o que no cumplan con los requisitos citados. Se podrán incluir figuras en color.
10. En la bibliografía sólo deben consignarse los autores citados en el texto, ordenados alfabéticamente por el autor principal. Cuando un autor(es) es citado varias veces, se repetirá el o los nombres tantas veces como sea necesario, y los trabajos se ordenarán por orden cronológico. Toda cita bibliográfica se iniciará con el apellido e iniciales del autor principal y luego iniciales y apellidos de los coautores. Tras el primer autor va punto y coma y a partir del segundo, los demás coautores van separados por coma; el último va separado por la conjunción en el idioma original. Antes del año va coma.
11. Las referencias bibliográficas deben incluir los siguientes datos:

- **Para artículos de publicaciones periódicas**

Autor/es

Año de publicación (sin paréntesis, en números arábigos)

Título del artículo

Nombre de la publicación periódica en la que apareció

Volumen y número de la publicación periódica

Página inicial y final del artículo

Ejemplo:

Ortega, R.J.; H. Garay, M.E. Orlando, D. Freytas y S. Montserrat, 2010. Efectos de los sistemas de labranza en el contenido de materia orgánica del suelo. *Acta Agrotécnica* 33:104-121.

- **Para publicaciones no periódicas**

Autor/es

Año de publicación (sin paréntesis, en números arábigos)

Título Número de edición (si no es la primera)

Editor

Lugar de publicación

Paginación (para expresar páginas consultadas anteponer p. al número si es una o pp. si son varias, o a posteriori si se trata de la paginación total)

Ejemplo:

Roland, J.L. y F.L. Scott, 2002. Cultivos bajo cubierta. 4ta. edición. Editorial Barayon, Barcelona, pp. 265-298.

Powell, B.; E. Johnson, G. McFarland and A. Gilbert, 2008. Applied statistics in biotechnology. Manne-Kessel, London, 333 pp.

- **Si se trata de capítulos de libro, con autores diferentes de los editores, se cita a aquellos de igual manera y se indica el nombre de los editores y el título de la obra.**

Ejemplo:

Palacios Allende, P.; G. Lancioni, T. García Araya, G. Salazar Coloma y B.M. Biondi, 2008. La familia Pentatomidae en cultivos del estado de Sinaloa. En Righetti, C. y G. De Mateo (Eds.): Plagas agrícolas en México. Mulligan Inc., pp. 215-256.

12. Las citas de Internet deberán incluir, además de la información básica solicitada para textos impresos, la dirección completa de la página citada y la fecha de consulta (Consultada el día/mes/año).

Ejemplo:

MAGyP, 2013, Estadísticas agrícolas. Sistema Integrado de Información Agropecuaria. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, Argentina. Cultivo de soja. Santiago del Estero. Departamento Moreno. <http://www.siaa.gov.ar/series> (Consultada el 31/05/2014).

13. Las **comunicaciones** contendrán título en castellano e inglés, resumen, palabras clave, summary y key words. El desarrollo posterior del artículo no tendrá formalmente estructura lógica, pero su texto deberá incluir las secciones solicitadas para los trabajos. Al cierre irán los agradecimientos (si los hubiere) y la bibliografía.
14. Se publicarán **revisiones** de investigadores destacados sobre el tema de su especialidad, las que serán solicitadas por RADA. Alternativamente, potenciales autores de revisiones deberán ponerse en contacto con el Director de RADA para sugerir temas y enfoques.
15. Ante dudas sobre cualquiera de estos aspectos, consultar al Director de la Revista.
16. Los artículos presentados pasan por una etapa de revisión inicial a fin de verificar que cumplan con las presentes normas y para evaluar su pertinencia, originalidad y calidad científica. Si cumplen con esto son receptados y enviados a consultores externos, nacionales o extranjeros, seleccionados entre investigadores de probada trayectoria y experiencia en el tema. La actuación de éstos es anónima, y de acuerdo a su dictamen se decide la aceptación o rechazo del artículo. Cualquiera sea esta decisión, las opiniones de los consultores serán remitidas al autor.
17. Previo a la publicación se enviará una prueba al autor. Las pruebas son sólo para correcciones de errores tipográficos.

INSTRUÇÕES PARA AUTORES SUBMETENDO ARTIGO À REVISTA DA ASSOCIAÇÃO ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGIA (RADA) EM FORMATO DIGITAL

Os trabalhos podem ser enviados em espanhol, português ou inglês

1. A Revista Argentina de Agrometeorologia, publicação da Associação Argentina de Agrometeorologia (AADA), é a média da disseminação da pesquisa original como trabalhos de pesquisa completos, comunicações, breves notas e revisões dos diferentes aspectos de disciplina.
2. Os manuscritos devem ser enviados ao Diretor da RADA, em um arquivo feito com processador de texto Word, juntamente com uma nota de solicitação de publicação.
3. As contribuições devem ser escritas de forma clara e concisa, na letra Arial ou Times New Roman, corpo 12, em um espaçamento e meio (1,5), com as páginas em linhas numeradas. Eles devem estar estritamente de acordo com as normas.
4. Os artigos terão uma estrutura lógica, com a seguinte sequência de seções: Título (em espanhol e/ou português e inglês); Autores (incluindo local de trabalho e endereço postal); Resumo (não deve exceder 200 palavras); Palavras-chave (Incluir título em inglês); Resumo;; Palavras-chave;; Introdução; Materiais e métodos; Resultados e discussão; Conclusões (somente se for necessário); Reconhecimento (se houver); Bibliografia.

Os títulos das seções serão colocados no centro da página e os sub-títulos na margem esquerda.

5. No texto, as menções dos autores serão feitas da seguinte forma:

Sanchez, 2008 – caso seja um único autor. Lopez e Araya, 2011 - quando há dois autores. Iglesias *et al.*, 2010 - para o caso de três ou mais autores. Quando as citações forem mais de uma, elas serão classificadas cronologicamente. No caso de diferentes publicações do mesmo autor no mesmo ano, estas devem ser identificadas pelo agregado sequencial de uma letra: (Sanchez 2008 a, b).

Todas as transcrições devem ser incluídas entre aspas, citando o autor. As comunicações pessoais só devem ser incluídas quando fornecerem informações essenciais não obtidas de fontes públicas. Neste caso, o nome e o ano aparecerão no texto entre parênteses. Por exemplo, (Andrés Fermi, 2010, comunicação pessoal). Os autores que citam uma comunicação pessoal devem ter uma autorização por escrito da pessoa mencionada.

6. Nomes científicos completos devem ser citados em sua primeira menção. Em menções posteriores, apenas a inicial do gênero mais a espécie pode ser usada, sem adicionar o nome de quem classificou. Se o nome comum for usado, deve ser acompanhado pelo nome científico em sua primeira menção. Todas as expressões em latim, bem como palavras em língua estrangeira que não têm seu equivalente em espanhol, devem ir em itálico (por exemplo: *et al.*, *in vitro*, etc.).
7. Símbolos químicos podem ser usados no texto (por exemplo, N para nitrogênio, C para carbono); fórmulas químicas comuns não devem ser usadas para substituir as palavras correspondentes (por exemplo, água e não H₂O). Podem ser usadas abreviaturas comuns como ATP, DNA, RNA, etc.
8. Quando o texto se refere a quantidades, de zero a nove, será expressa em letras, exceto quando acompanhado de unidades de medida ou a cotação inclui números maiores (por exemplo, 3, 8 e 15 parcelas).
9. Os resultados do artigo podem ser apresentados em tabelas e figuras (podem ser apresentadas em cores quando consideradas necessárias), que irão ao final do artigo com suas legendas correspondentes, numeradas independentemente e correlacionadas com numerais árabes.

De acordo com a diagramação da revista, as dimensões das figuras devem ser adaptadas a 7 cm de largura (equivalente a uma coluna) ou 15 cm (coluna dupla); a altura nunca deve exceder 20 cm. As figuras também devem ser enviadas em um arquivo separado no formato jpg ou tif image, com uma resolução não inferior a 300 DPI.

As fotos devem ser apresentadas em color ou preto e branco, e suas dimensões também devem ser ajustadas para 7 ou 15 cm. Aqueles que não possuem uma excelente definição ou não atenderem aos requisitos acima não serão aceitos. Figuras coloridas podem ser incluídas.

10. Apenas os autores citados no texto, ordenados alfabeticamente pelo autor principal, devem

ser lembrados na literatura. Quando um autor(s) é citado várias vezes, o nome(s) será repetido quantas vezes for necessário, e as obras serão ordenados em ordem cronológica. Qualquer citação bibliográfica será iniciada com o sobrenome e as iniciais do autor principal e, em seguida, iniciais e sobrenomes dos coautores.

11. As referências bibliográficas devem incluir os seguintes dados:

- Para artigos em revistas

Autor/s; ano de publicação (sem parênteses, em numerais árabes); título do artigo; nome da revista, volume, página de início e final do artigo.

Exemplo:

Ortega, R.J.; H. Garay, M.E.; Orlando, D.; Freytas and S. Montserrat, 2010. Effects of farming systems on soil organic matter content. *Agrotechnical Act* 33:104-121.

- Para publicações não-revistas

Autor/ano de publicação (sem parênteses, em números árabes); título; editor; local de publicação (para indicar páginas consultadas, p. antes do número, se for um ou pp. se fossem várias páginas ou o número total de páginas de livros)

Exemplo:

Roland, J.L. and F.L. Scott, 2002. *Crops under cover*. 4th edition. Editorial Barayon, Barcelona, pp. 265-298.

Powell, B.; E. Johnson, G. McFarland and A. Gilbert, 2008. *Applied statistics in biotechnology*. Manne-Kessel, London, 333 pp.

- No caso dos capítulos do livro, com diferentes autores dos editores, esses são citados da mesma forma e o nome dos editores e o título da publicação são indicados.

Exemplo:

Allende Palaces, P.; G. Lancioni, T. García Araya, G. Salazar Coloma and B.M. Biondi, 2008. The Pentatomidae family in crops in the state of Sinaloa. In Righetti, C. and G. De Mateo (Eds.): *Agricultural pests in Mexico*. Mulligan Inc., pp. 215-256.

12. As citações na Internet devem incluir, além das informações básicas solicitadas para textos impressos, o endereço completo da página citada e a data de consulta (dia/mês/ano).

Exemplo:

MAGyP, 2013, *Agricultural Statistics*. Integrated Agricultural Information System. Ministry of Agriculture, Livestock and Fisheries, Argentina. Soybean cultivation. Santiago del Estero. Moreno Department. <http://www.sia.gov.ar/series> (31/05/2014).

13. As comunicações conterão um título em espanhol e inglês, resumo, palavras-chave, resumo e palavras-chave. O desenvolvimento subsequente do artigo não terá formalmente uma estrutura lógica, mas o texto deve incluir as seções solicitadas para a obra. No final, o agradecimento ou financiamento (se houver) e a bibliografia.
14. Revisão dos principais pesquisadores sobre o tema de sua especialidade será publicada a solicitação pela RADA. Alternativamente, os potenciais autores de revisão devem entrar em contato com o Diretor da RADA para sugerir tópicos e abordagens de revisão.
15. Em caso de dúvidas em qualquer um desses aspectos, consulte ao Diretor da RADA.
16. Os artigos submetidos passarão por uma fase inicial de revisão para verificar se cumprem as normas de publicação e avaliarão sua relevância, originalidade e qualidade científica. Se cumprirem, são enviados a consultores externos, nacionais ou estrangeiros, selecionados entre pesquisadores de origem comprovada e experiência. Suas opiniões são anônimas e, de acordo com sua opinião, é decidido aceitar ou rejeitar o artigo. Seja qual fora decisão, as opiniões dos revisores serão encaminhadas ao autor.
17. Antes da publicação, a prova (pdf) deve ser enviada ao autor correspondente apenas para fixação de erros tipográficos.

INSTRUCTIONS FOR AUTHORS SUBMITTING PAPER TO THE JOURNAL OF THE AGROMETEOROLOGY ASSOCIATION (RADA) IN DIGITAL FORMAT

Papers may be submitted either in Spanish, Portuguese or English

1. The Argentine Journal of Agrometeorology, publication of the Argentine Association of Agrometeorology (AADA), is the mean of dissemination of the original research as full research papers, communications, brief notes and revisions of the different aspects of Agrometeorology.
2. Manuscripts must be sent to the Director of RADA, in a file made with Word MS processor, along with a publication request note (a model may be downloaded here). It must be filled out and signed, then scanned and the file sent along with the research paper.
3. All contributions must be written in a clear and concise manner, in letter Arial or Times New Roman, body 12, at one and a half spacing, with the pages and lines numbered. They must be strictly in accordance with the norms.
4. The articles shall have a logical structure, with the following sequence of sections: Title (in Spanish and/or Portuguese and English); Authors (including workplace and postal address); Summary (should not exceed 200 words); Keywords (Include title in English); Summary; Key words; Introduction; Materials and methods; Results and discussion; Conclusions (only if deemed necessary); Acknowledgement (if any); Bibliography.

The titles of the sections will be placed in the center of the page and the subtitles on the left margin.

5. In the text, the mentions of authors will be made as follows:

Sánchez, 2008 – in case it is a single author. Lopez and Araya, 2011 - when there are two authors. Iglesias et al., 2010 -for the case of three or more authors. When cites are more than one, they will be sorted chronologically. In the case of different publications of the same author in the same year, these must be identified by the sequential aggregate of a letter: (Sánchez 2008 a.b).

All transcripts shall be enclosed in quotation marks, citing the author. Personal communications shall be included only when they provide essential information not obtainable from public sources. In this case, the name and year will appear in the text in parentheses. E.g. (Andrés Fermi, 2010, personal communication). Authors who cite a personal communication must have a written authorization from the person mentioned.

6. Full scientific names shall be cited in their first mention. In later mentions, only the initial of the genus plus the species may be used, without adding the name of who has classified. If the common name is used, it must be accompanied by the scientific name in its first mention. All Latin expressions, as well as foreign language words that do not have their Spanish equivalent, must go in italics (e.g.: *et al.*, *in vitro*, etc.).
7. Chemical symbols may be used in the text (e.g. N for nitrogen, C for carbon); ordinary chemical formulas should not be used in return to replace the corresponding words (e.g. water and not H₂O). Common abbreviations such as ATP, DNA, RNA, etc. may be used.
8. Where the text refers to quantities, from zero to nine shall be expressed in letters, except where accompanied by units of measure or the quotation includes larger numbers (e.g. 3, 8 and 15 parcels). In Spanish decimal places carry commas, and period when it is in English.
9. The paper results may be presented in tables and figures (they may be presented in color when deemed necessary), which will go at the end of the article with their corresponding legends, numbered independently and correlated with Arabic numerals. According to the diagramming of the magazine, the dimensions of the figures must be able to be adapted to 7 cm wide (equivalent to one column) or 15 cm (double column); height should never exceed 20 cm. The figures must also be sent in a separate file in jpg or tif image format, with a resolution not less than 300 DPI. The photographs shall be presented in color or black and white, and their dimensions must also be adjusted to 7 or 15 cm. Those who lack an excellent definition or do not meet the above requirements will not be accepted. Color figures may be included.
10. Only the authors quoted in the text, sorted alphabetically by the lead author, should be recorded in

the literature. When an author(s) is quoted multiple times, the name(s) will be repeated as many times as necessary, and the works will be sorted in chronological order. Any bibliographic quotation will be initiated with the surname and initials of the lead author and then initials and surnames of the co-authors. After the first author goes semicolons and from the second, the other co-authors are separated by commas; the latter is separated by the conjunction in the original language; finally, comma goes before the year.

11. Bibliographical references should include the following data:

- For articles in journals

Author/s; year of publication (without parentheses, in Arabic numerals); title of the article; name of the journal in which volume appeared and number of the journal; start and end page of the article.

Example:

Ortega, R.J.; H. Garay, M.E. Orlando, D. Freytas and S. Montserrat, 2010. Effects of farming systems on soil organic matter content. *Agrotechnical Act* 33:104-121.

- For non-journal publications

Author/year of publication (without parentheses, in Arabic numerals); title; editing number (if not the first); editor; publishing place (to indicate pages consulted put p. before the number if it is one or pp. if they were several pages or the total number of book pages)

Example:

Roland, J.L. and F.L. Scott, 2002. *Crops under cover*. 4th edition. Editorial Barayon, Barcelona, pp. 265-298.

Powell, B.; E. Johnson, G. McFarland and A. Gilbert, 2008. *Applied statistics in biotechnology*. Manne-Kessel, London, 333 pp.

- In the case of book chapters, with different authors of the editors, those are quoted in the same way and the name of the editors and the title of the publication is indicated.

Example:

Allende Palaces, P.; G. Lancioni, T. García Araya, G. Salazar Coloma and B.M. Biondi, 2008. The Pentatomidae family in crops in the state of Sinaloa. In Righetti, C. and G. De Mateo (Eds.): *Agricultural pests in Mexico*. Mulligan Inc., pp. 215-256.

12. Internet citations must include, in addition to the basic information requested for printed texts, the full address of the cited page and the date of consultation (day/month/year).

Example:

MAGyP, 2013, *Agricultural Statistics*. Integrated Agricultural Information System. Ministry of Agriculture, Livestock and Fisheries, Argentina. Soybean cultivation. Santiago del Estero. Moreno Department. <http://www.siaa.gov.ar/series> (31/05/2014).

13. Communications will contain a title in Spanish and English, summary, keywords, summary and key words. The subsequent development of the article will not formally have a logical structure, but the text must include the requested sections for the work. At the end, the acknowledgement (if any) and the bibliography.

14. Review from leading researchers on the subject of their specialty will be published the the request by RADA. Alternatively, potential review authors should contact the RADA Director to suggest review topics and approaches.

15. In case of doubts in any of these aspects, consult the Director of RADA.

16. The articles submitted will go through an initial review stage to verify that they comply with the publication norms and to assess their relevance, originality and scientific quality. If they comply they are sent to external consultants, national or foreign, selected from researchers of proven background and experience. Their review are anonymous, and according to their opinion it is decided to accept or reject the article. Whatever their decision, the opinions of the reviewers will be forwarded to the author.

17. Prior to publication, a print proof shall be sent to the corresponding author only for fixing typographical errors.