

Estimación del coeficiente de cultivo Kc para los cultivos de invierno y pastizales en la cuenca alta del río Sauce Chico de la Provincia de Buenos Aires a partir de sensores remotos

**Estimation of the crop coefficient Kc for winter crops and pastures in the upper
basin of the Sauce Chico river of the Province of Buenos Aires from remote
sensors**

Esteban Sergio Manis*

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires,
Argentina

Raúl J. Rosa

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires,
Argentina

Gerardo Andrés Denegri

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires,
Argentina

Fernanda Julia Gaspari

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires,
Argentina

Revista de la Facultad de Agronomía

Universidad Nacional de La Plata, Argentina

ISSN: 1669-9513

Periodicidad: Continua

vol. 123, 2024

redaccion.revista@agro.unlp.edu.ar

Recepción: 7 de diciembre 2022

Aprobación: 6 de octubre 2023

Publicación: abril 2024

URL: <http://portal.amelica>

DOI: <https://doi.org/10.24215/16699513e136>

***Autor de correspondencia:** esteban.manis@agro.unlp.edu.ar; manisesteban@gmail.com

Resumen

La obtención precisa de los valores de evapotranspiración es una tarea compleja, sin embargo, las Tecnologías de Información Geográfica permiten aproximar algunos parámetros para su estimación precisa y ajustada a las condiciones locales. El objetivo de este trabajo fue estimar los coeficientes de cultivo a partir de los Índices Verdes Normalizados (NDVI) de las imágenes satelitales, para cultivos de invierno y pastizales de la cuenca alta del río Sauce Chico de la Provincia de Buenos Aires - Argentina, y compararlos con los Kc de referencia de la bibliografía. Se trabajó con valores mensuales de NDVI, a partir de los cuales se identificaron parcelas con cultivos de invierno y praderas; luego, mediante expresiones matemáticas se relacionó el NDVI con el Kc de los cultivos y praderas. Posteriormente se comparó los Kc obtenidos a partir de sensores remotos con los publicados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y de aplicación para el cálculo de evapotranspiración de cultivo. Los resultados de este trabajo aproximan valores de Kc específicos para el cultivo y condiciones zonales, lo que permitió la estimación de la evapotranspiración de los cultivos y pastizales para ser utilizados a nivel de la cuenca, y así contribuir con el estudio de la dinámica hidrológica regional.

Palabras clave: sensores remotos, coeficiente de cultivo, índice verde normalizado, evapotranspiración, cuenca alta del río Sauce Chico Buenos Aires Argentina

Abstract

Obtaining precise evapotranspiration values is a complex task, however Geographic Information Technologies allow us to approximate some parameters for their precise estimation adjusted to local conditions. The objective of this work was to estimate the crop coefficient from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the satellite images, for winter crops and pastures of the upper basin of the Sauce Chico river of the Province of Buenos Aires - Argentina, and compare them with the Kc of bibliography reference. Monthly NDVI values were used, from which plots with winter crops and meadows were identified; Then, through mathematical expressions, the NDVI was related to the Kc of crops and grasslands. Subsequently, the Kc obtained from remote sensors were compared with those published by Food and Agricultura Organization (FAO) and applied to the calculation of crop evapotranspiration. The results of this work approximate specific Kc values for the crop and zonal conditions, which allowed the estimation of the evapotranspiration of crops and pastures to be used at the basin level, and thus contribute to the study of regional hydrological dynamics.

Keywords: remote sensing, crop coefficient, normalized green evapotranspiration index, upper basin of the Sauce Chico river Buenos Aires Argentina

INTRODUCCION

La evapotranspiración (EVT) es un componente importante del ciclo del agua y representa la transmisión de agua de la tierra a la atmósfera por procesos de evaporación de la superficie del suelo y transpiración de las plantas. Es un indicador del agua removida por la vegetación, determina el estrés hídrico de los cultivos y por lo tanto presenta muchos usos en la agricultura, como por ejemplo el cálculo de las cuotas de riego que las plantas necesitan para un desarrollo óptimo, determinar las capacidades de absorción de humedad que posee un suelo, a nivel macro para la estimación de los rendimientos de la producción de un territorio y actividades de planeación en general (Segura Castruita y Ortiz Solorio, 2017).

Utilitariamente se especifican diferentes tipos de EVT. Para este trabajo se definen las siguientes:

Evapotranspiración máxima (EVT_x) es la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación, que se desarrolla en óptimas condiciones y sin limitaciones en el suministro de agua.

Evapotranspiración de referencia (EVT₀) es la cantidad de agua que evapora un cultivo de referencia en condiciones determinadas y sin limitaciones del suministro de agua.

Evapotranspiración del cultivo (EVT_c) se entiende a la cantidad de agua verdaderamente perdida por la superficie, que depende de las condiciones atmosféricas, el contenido de agua en el suelo y las características de la vegetación; es similar a la ETV_x, pero con la diferencia que se calcula con datos aplicados a un cultivo específico y a condiciones estándar específicas.

La estimación precisa de la EVT, no es una tarea simple, medirla a campo es difícil y costosa, requiere de equipo especializado y constituye un valor de uso local difícil de extrapolar. También se pueden utilizar procedimientos indirectos, pero requieren el control continuo de un gran número de parámetros físicos, meteorológicos y de la cubierta vegetal, entre ellos se pueden mencionar: radiación solar, temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, velocidad del viento, características particulares del suelo, el contenido y los niveles de salinidad del agua, y el tipo de vegetación o cultivos (Fang *et al.*, 2016). Por otra parte, las Tecnologías de la Información Geográfica permitieron estimaciones precisas en numerosos cálculos relacionados con la producción agropecuaria, una de ellas es la EVT; así, Sánchez, *et al.* (2005), obtuvieron un mapa de ETV diaria en bosques boreales ubicados en Finlandia a partir de imágenes Landsat que obtuvo una diferencia instantánea entre las temperaturas del aire y de la superficie. Usualmente el procedimiento de cálculo de EVT_c consiste en el producto del coeficiente de cultivo (Kc) por la evapotranspiración de referencia según la ecuación 1, metodología recomendada por la Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Allen *et al.*, 2006). El coeficiente Kc está tabulado a partir de numerosos ensayos a campo para los más importantes cultivos comerciales, la mayoría realizados en el hemisferio norte. Castañeda Ibáñez *et al.*, (2015), señalan que los sensores remotos son una alternativa económica viable que proveen información con alta resolución espacial y temporal útil para estimar la EVT. Otros trabajos han demostrado la posibilidad de estimar el Kc a partir del denominado índice de vegetación normalizado, NDVI. El Kc basado en reflectividad fue derivado mediante la transformación del NDVI, que es un parámetro que se obtiene desde imágenes multiespectrales mediante una combinación algebraica de las reflectividades en el rojo e infrarrojo cercano, midiendo el tamaño fotosintético relativo de la cubierta, y recoge cómo la cubierta vegetal absorbe la radiación solar fotosintéticamente activa (Cuesta *et al.*, 2005).

$$EVT_c = Kc * EVT_0 \quad \text{Ecuación 1}$$

La metodología propuesta por Wright (1982) para determinar la evapotranspiración del cultivo (EVT_c) consiste en definir el Kc a partir de dos coeficientes separados, uno para la transpiración del cultivo (K_{cb}=coeficiente del cultivo basal) y otro para la evapotranspiración del suelo (K_e). Cuando la capa del suelo está húmeda el K_e es máximo, en caso contrario comienza a disminuir (Ec. 2).

$$EVT_c = (K_{cb}+K_e)* EVT_0 \quad \text{Ecuación 2}$$

Los procedimientos para determinar la EVT_x están basados en los estudios de FAO (Steduto *et al.*, 2012). Para la estimación de la EVT_c, y la EVT_x, ambos componentes pueden ser igualados en la medida que haya agua fácilmente extraíble del suelo por parte del cultivo. En la medida que se alcance un nivel crítico de humedad del suelo, la transpiración disminuye por el cierre de los estomas (pequeñas aberturas en la epidermis de los vegetales, a través de las cuales se producen los cambios de gases entre la planta y el exterior) por lo que la ETV_c es menor a la ETV_x. La disminución del contenido de agua fácilmente utilizable por los cultivos alcanza niveles tales que impiden la

absorción radicular lo que provoca estrés a la planta producto de la retención del agua en el suelo. Este nivel de agua retenida varía según las características del suelo en la zona radicular, el tipo de cultivo y está relacionada con la EVT_c . El estrés hídrico se vincula con el K_c por la relación que existe entre la evapotranspiración máxima del cultivo (EVT_x) y la real del cultivo (EVT_c). Consecuentemente el estrés hídrico causa efectos negativos sobre el desarrollo de las plantas y sobre el rendimiento de los cultivos.

El estudio del K_c y de la evapotranspiración del cultivo adquiere mayor relevancia en zonas definidas (cuencas hidrográficas), donde existen limitaciones en la disponibilidad de agua en el suelo para el desarrollo de cultivos y pastizales. En estos ambientes el balance hidrológico puede presentar déficits en determinados momentos del año donde la EVT_c supera los aportes de agua utilizable y su almacenamiento en el perfil de suelo. Estos periodos se asocian con la factibilidad de ocurrencias de estrés hídrico y la consecuente afectación del desarrollo vegetal y los rendimientos de los cultivos.

El trabajo se realiza en la cuenca alta del río Sauce Chico localizada en la región Sudoeste de la provincia de Buenos Aires cuyo régimen de precipitaciones anuales y su distribución anual se encuentra en niveles que pueden ser limitantes para la demanda evapotranspirativa de los cultivos. A lo referido anteriormente se considera limitante la condición topográfica de la cuenca que condiciona el drenaje superficial con influencia en la dinámica del agua utilizable.

El Sudoeste de la provincia de Buenos Aires presenta aptitud de uso agrícola ganadero. Los cultivos principales son: de invierno trigo y cebada, y de verano girasol y soja; mientras que en la ganadería predomina la cría e invernada bovina.

La importancia de la estimación de K_c de cultivos para la zona en estudio radica en la consideración de variables locales específicas para este coeficiente. Su estimación a partir de sensores remotos relacionándolo a la EVT_c , resulta de utilidad para estudios que incluyen la demanda evapotranspirativa real a nivel de parcela, de cuenca y/o regional. A partir de la obtención de K_c locales (respecto a los K_c publicados por FAO), se pueden obtener resultados ajustados por la consideración de manejo de cultivos local, la variabilidad genética de los cultivos, características locales de suelo, fertilidad, limitación o exceso de agua y ecología del lugar. Es decir, la ocurrencia de condiciones no estándares en cultivos a campo determina ajustes de K_c para la cuantificación de la diferencia entre EVT_c en condiciones estándar y la evapotranspiración real del cultivo. El objetivo de este trabajo fue estimar los K_c a partir de los NDVI en cultivos de invierno y pastizales en la cuenca alta del río Sauce Chico de la Provincia de Buenos Aires como una primera aproximación, y compararlos con los K_c de referencia de la bibliografía.

METODOLOGIA

Se trabajó en la cabecera de la cuenca hidrográfica del río Sauce Chico ubicada en el Sistema Serrano de Ventania, 38° 01' y 38° 07' S y 61° 57' y 62° 08' O, partido de Tornquist, Buenos Aires, Argentina. Posee una superficie de 365,6 kilómetros cuadrados, y debido a sus características físico-ambientales y sociales modales, es representativa de las condiciones que presentan las otras cuencas serranas del sistema.

Las sierras de Ventania constituyen una serie de corrimientos imbricados con rumbos aproximados SE-NO, convergencia al noreste que incluyen las diferentes litologías paleozoicas fuertemente plegadas, en muchos casos con los pliegues volcados al noreste, típicas de ambientes compresivos. En los valles conformados se han depositado espesos mantos de loess, controlados por las rocas subyacentes. El macizo presenta las mayores alturas de la provincia de Buenos Aires (cerro Tres Picos (1239 m), La Ventana (1184 m), Destierro Primero (1172 m), Napostá Grande (1108 m), y Cura Malal Grande (1037 m). El drenaje muestra un marcado control estructural con cursos longitudinales y escasos cursos transversales que integran al drenaje a la vertiente atlántica o a las cuencas endorreicas (Pereyra y Tobío, 2018).

Según la clasificación de Thornthwaite, el clima es templado subhúmedo seco (Burgos, 1963). La temperatura media anual es de 14.5 °C y la precipitación media histórica de 909 mm, con una distribución temporal con marcada estacionalidad, concentrando el 64% del total en el semestre octubre a abril, siendo marzo y abril los que registran mayores valores mensuales de precipitación, según el Servicio Meteorológico Nacional.

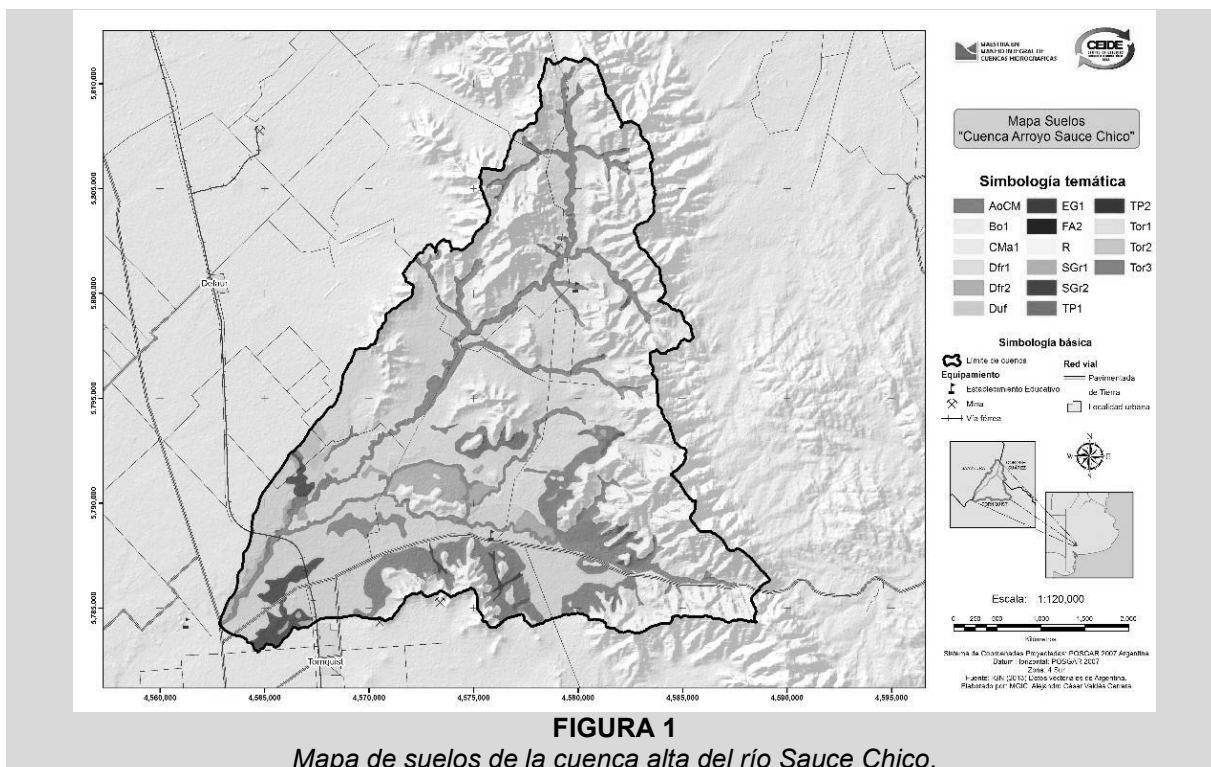


FIGURA 1
Mapa de suelos de la cuenca alta del río Sauce Chico.

Los suelos predominantes son Hapludoles líticos someros y Argiudoles profundos, cubiertos, principalmente, por pastizales. En la Figura 1 se presenta la distribución de las 16 unidades cartográficas de suelos, siendo la de mayor representación porcentual la R (afloramiento rocoso) con un 40% de la superficie de la cuenca (Carta de Suelos de la República Argentina, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-INTA, 2018). Las unidades cartográficas de interés por su capacidad de uso agrícola son la Bo1 que es una asociación de las series Bonete (50%), Estación Rivera (40%), Estancia Los Manantiales (10%), cuyo horizonte superficial es de textura franco arcilloso y CMa1 como complejo de las series Cura Malal (70%), Estancia Los Manantiales (20%), Estancia Ojo de Agua (10%), horizonte superficial de textura franco. Con capacidad de uso ganadera se encuentran las unidades cartográficas Dfr2 que es una asociación de las series Cerro del Chimango (60%), Estancia Ojo de Agua (30%), Alta Vista (10%) con horizonte superficial de textura franco y TP que es un complejo con representación de las series Erize, Tornquist, Cerro del Chimango, Napostá y Bonete, con horizonte superficial Franco arcillosos. Estas unidades cartográficas de capacidad de uso agrícola y ganadera representan el 35,2 % de la superficie de la cuenca.

Los cultivos de invierno son los de mayor adopción en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires y en la Cuenca estudiada. Se utilizan como cultivos de cosecha por su adaptación edafo-climática, que permite acceder a rendimientos por hectárea económicamente viables. Ambos cultivos trigo *Triticum aestivum* Linneo y Cebada *Hordeum vulgare* Linneo, tienen una representación superficial dentro de la cuenca determinada por la presencia de suelos con capacidad de uso agrícola (36,21% de los suelos de la cuenca), y las limitantes para otros cultivos, como impedancias para el desarrollo radicular (horizontes petrocálcicos subsuperficiales). La denominación de cultivos de invierno surge de la necesidad de diferenciarlos de aquellos con fechas medias de siembra en períodos primavera-estivales (soja, girasol, maíz y sorgo). Los cultivos de invierno tienen un período de siembra que se inicia en el mes de mayo sobre fines del otoño y puede extenderse hasta el mes de junio según variedades utilizadas, ciclo de cultivo, cultivo antecesor y humedad del suelo al momento de la siembra, entre los principales factores. Transcurren su desarrollo vegetativo durante el período invernal, la floración en los meses primaverales, mientras que la cosecha se produce al final de la estación de primavera durante el mes de diciembre. El trigo en forma predominante y la cebada, son considerados como los principales cultivos de invierno a los fines de este trabajo por su difusión regional. Los mismos se utilizan como referencia para la consideración de los períodos fenológicos, su ubicación temporal y su duración. Las variedades utilizadas de ambos cultivos tienen una representación zonal basada en la mejora genética llevada a cabo por estaciones experimentales de

la región. La Estación Experimental Agropecuaria Bordenave (-37,762764; -63,085390) dependiente del INTA y la Chacra Experimental Integrada Barrow (-38.322998, -60.241894) Ministerio de Desarrollo Agrario de la provincia de Buenos Aires - INTA, son los centros experimentales con desarrollo de líneas de investigación para el mejoramiento de cultivos de invierno en la región sudoeste de la provincia de Buenos Aires. Estos centros experimentales cercanos a la cuenca en estudio, desarrollan cultivares de cereales de invierno adaptados a las condiciones ecológicas de la zona, en busca de calidad industrial (panadera y cervecera) y mejora de los rendimientos.

Por otra parte, los pastizales naturales (PN) que se utilizan para ganadería bovina y ovina extensivas en la cuenca, se caracterizan por la diversidad florística y una distribución superficial compleja según la existencia de ambientes geo-edáficos diferenciales. A nivel regional han sido identificadas y descritas 24 comunidades vegetales de sierra de la Ventana de las cuales 11 constituyen pastizales (Frangi y Bottino. 1995). Los ambientes geo-edáficos donde se desarrolla la producción ganadera son los serranos e intraserranos donde los PNs se utilizan como recurso forrajero (Lizzi et al., 2007). El estudio de la EVT de los PNs de la Cuenca es dificultoso por la composición vegetal heterogénea (a diferencia de las variedades, cultivares o híbridos de los cultivos de cosecha o pasturas implantadas) y la falta de referencia publicada en cuanto a la estimación de los Kc. Por otro lado, no es posible determinar etapas fenológicas definidas, como en los cultivos implantados, por los distintos pulsos de crecimiento dentro su composición florística a lo largo del año, a lo que se agrega el pastoreo continuo generalizado en la cuenca.

Para alcanzar el objetivo se procedió de la siguiente forma:

Se identificaron 12 parcelas de uso de suelo, siendo 5 con uso agrícola y 7 uso ganadero, para el período 2000-2021 en distintas unidades cartográficas de suelos (ver Tabla 1 y Figura 2). Las mismas se distribuyen en de suelos identificados como Bo1, Cma1, Dfr2 y TP.

Se definió el índice de vegetación de diferencia normalizada continua (NDVI) (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Ecuación 3), también denominado índice verde, que permite visualizar las áreas con mayor cobertura vegetal (Bhatti et al, 2014).

$$NDVI = \frac{(Banda\ IR) - (Banda\ R)}{(Banda\ IR) + (Banda\ R)} \quad \text{Ecuación 3}$$

A través del programa libre en línea SATVeg “Sistema de Análise Temporal da Vegetação” software desarrollado por “Empresa brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) Informática Agropecuária”, se estimaron en forma mensual los NDVI de las parcelas estudiadas. A través de la evolución de los valores mensuales del NDVI, se procedió a identificar en las parcelas los años en que se realizó cultivos de invierno (en la región las prácticas incluyen rotar cultivos con praderas implantadas). Al igual que Marini, (2008), no se pudo discriminar los diferentes cultivos de invierno por presentar similares fenologías de cultivo, razón por la que se trabajó con la categoría agrupada cultivo de invierno.

Siguiendo lo sugerido Cuesta et al. (2005) quien relaciona el NDVI con el Kc a través de relaciones matemáticas para la fase inicial y de desarrollo del cultivo (Ecuación 4) y la fase final (Ecuación 5):

$$Kc = 1,25 * NDVI + 0,2 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Kc = 1,5625 * NDVI - 0,05 \quad \text{Ecuación 5}$$

De esta forma se obtuvieron una serie de Kc mensuales, que luego fueron promediados. A estos promedios se les aplicó un análisis de varianza y el test de medias “diferencia mínima significativa irrestricta (LSD)” al 95% y 99%, para saber si existen diferencias, básicamente entre parcelas.

La metodología propuesta por FAO, establece 3 Kc (inicial, medio y final) que determinan 4 períodos fenológicos:

a. Etapa inicial del cultivo que llega hasta una cobertura del 10% de la superficie, quedando definida en días desde la siembra y aplicable con una curva sin pendiente y aplicable como media en toda su extensión.

b. Etapa de desarrollo cuando supera la cobertura del 10% y llega hasta la floración que se establece con una curva de pendiente positiva entre el Kc inicial y el Kc medio, donde la longitud en días lo define la magnitud de la pendiente.

c. Etapa media que va desde la floración hasta inicio de madurez, establecida por una meseta (sin pendiente) donde el valor medio de Kc queda determinado por el Kc medio.

d. Etapa final o de senescencia que culmina con la cosecha que presenta una curva de pendiente negativa cuya magnitud depende nuevamente de la longitud temporal del período a cosecha, donde se registra el Kc final.

TABLA 1
Localización de parcelas evaluadas.

Uso	Ref.	Unidad	Superficie	Longitud	Latitud
Agricultura	1	Bo1	15	-62,13285	-38,02147
Agricultura	2	CMa1	30	-62,10201	-38,99086
Agricultura	3	CMa1	44	-62,16552	-38,97198
Agricultura	4	CMa1	69	-62,14063	-38,97847
Agricultura	5	CMa1	57	-62,09494	-38,00195
Pradera	6	Dfr2	21	-62,11367	-38,04499
Pradera	7	Dfr2	25	-62,17111	-38,02662
Pradera	8	Dfr2	28	-62,17563	-38,02996
Pradera	9	TP	37	-62,19755	-38,07021
Pradera	10	TP	48	-62,08431	-38,07800
Pradera	11	TP	36	-62,17960	-38,06238
Pradera	12	TP	21	-62,15264	-38,05819

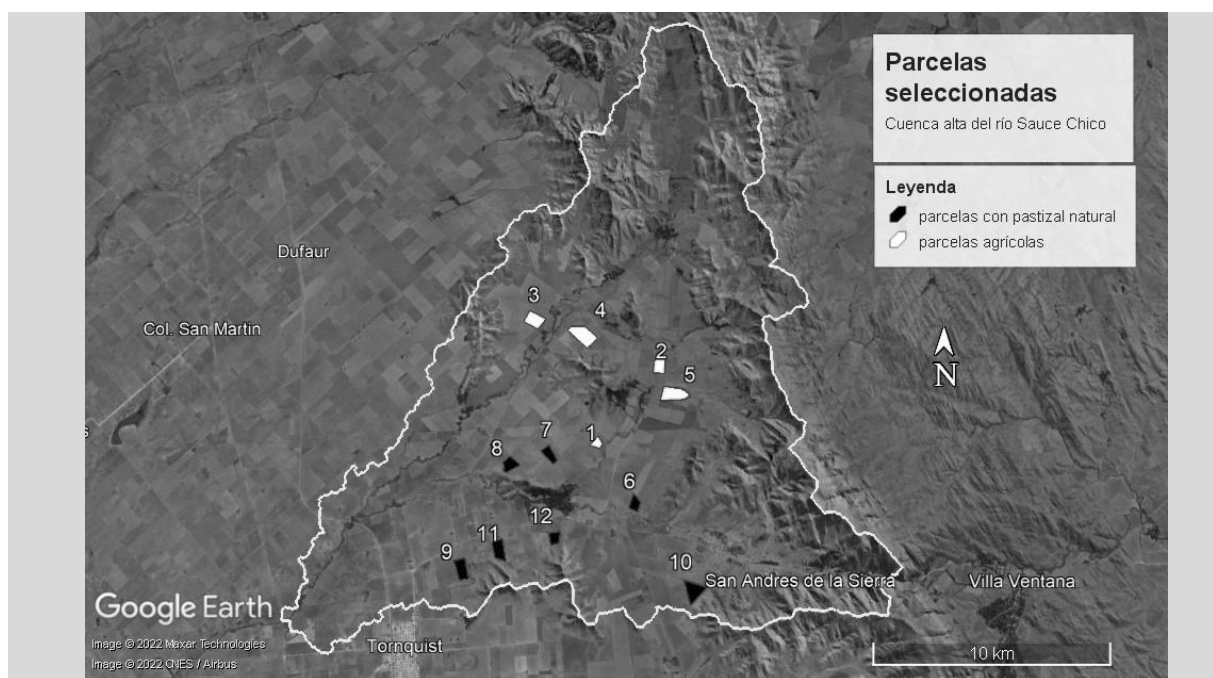


FIGURA 2
Croquis de ubicación de las parcelas evaluadas en la Cuenca.

Esta metodología se aplica en el programa CROPWAT 8.0 para Windows de FAO, que es un software para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos para riego, en función de los datos del suelo, el clima y la fenología de los cultivos. Además, el programa permite el desarrollo de cronogramas de riego para diferentes condiciones de manejo y el cálculo del suministro de agua para diferentes patrones de cultivo pudiéndose utilizar para evaluar las prácticas de riego de los agricultores y estimar el rendimiento de los cultivos en condiciones de riego y de secano.

Esta evolución de la curva de Kc queda registrada en el software CROPWAT a través de períodos decádicos. A los fines de su comparación con los Kc calculados a partir de NDVI se tomó una programación del software mencionado para el cultivo de Trigo con fecha de siembra el 25 de mayo y una longitud del ciclo de cultivo de 199 días.

Para hacer un análisis comparativo de resultados, se determinó EVTc en mm/mensuales, se procedió a calcularla a partir de los Kc obtenidos de forma remota y los utilizados por la metodología propuesta por FAO para el período anual estudiado. Para este cálculo se consideraron los valores de EVT₀ media mensual del año 2000 al 2018 publicado por el INTA Bordenave (Lat-37.76274 Long - 63.085390)

RESULTADOS

Los años donde se detectaron cultivos de invierno, a partir de la interpretación de los resultados gráficos NDVI fueron 2000; 2001; 2002; 2003; 2006; 2009; 2011; 2013; 2015; 2016; 2018; 2020 y 2021. Las parcelas donde se identificaron cultivos de invierno se corresponden con las unidades cartográficas CMa1 y Bo1 (5 parcelas).

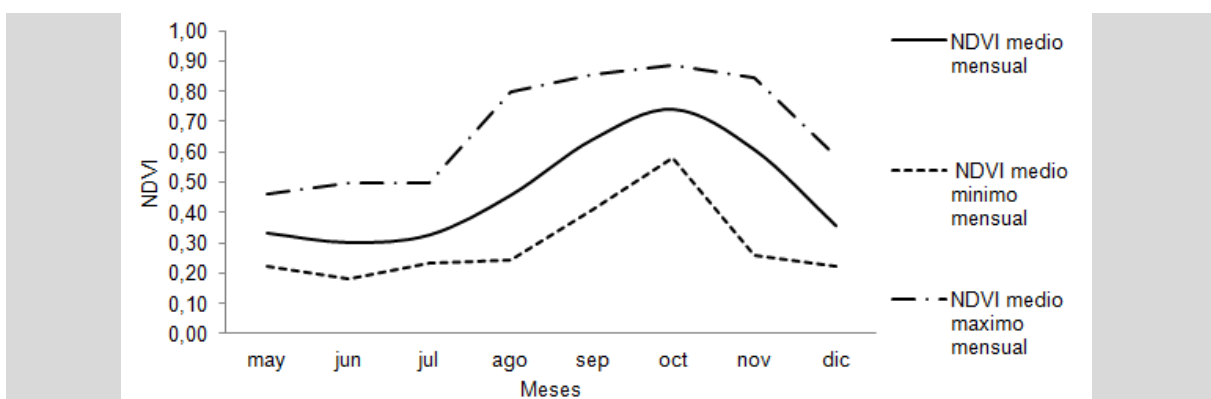


FIGURA 3

NDVI mensual para el ciclo de cultivos de invierno de las parcelas seleccionadas.

La evolución mensual del Kc calculado por NDVI en esos años se aprecia en la figura 4 para los meses de cultivo de invierno, donde se presentan los valores máximo, medio y mínimo del periodo considerado.

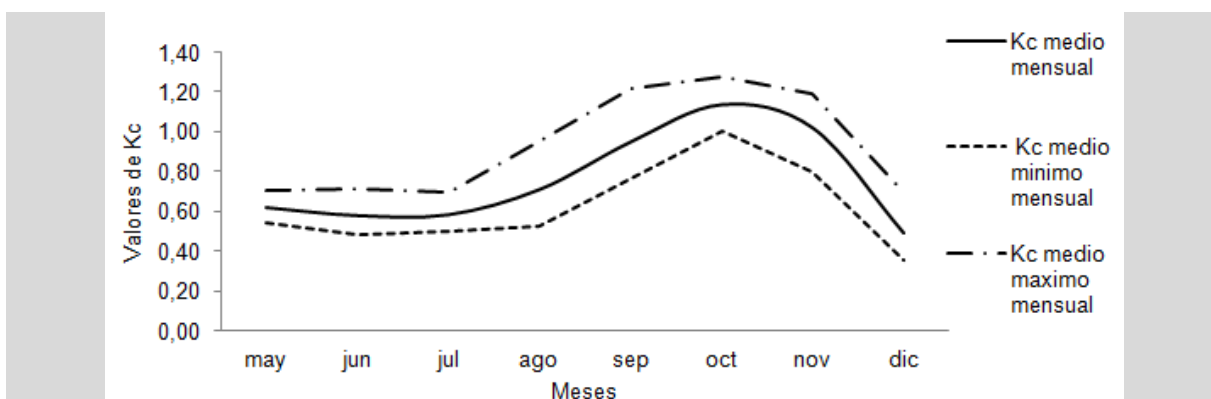


FIGURA 4

Valores de Kc para el ciclo de cultivos de invierno obtenidos a partir de NDVI para las parcelas seleccionadas de la cuenca.

Los resultados del análisis de varianza se presentan en la tabla 2, indicando que la diferencia entre meses es altamente significativa, mientras que entre las parcelas es significativa. En la tabla 3 se presenta el Test de medias.

TABLA 2
Análisis de Varianza de los Kc obtenidos por NDVI.

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	F	P-Valor
parcela	0,0280	4	0,0070	3,7500	0,0150
mes	2,0132	7	0,2876	154,1300	0,0000
residuos	0,0504	27	0,0019		
TOTAL	2,0826	38			

TABLA 3
Test de Medias LSD de los Kc Obtenidos por NDVI.

Parcelas	N	Media	Sigma	Grupos Homogéneos	
				99%	95%
2	7	0,7232	0,0166	X	X
1	8	0,7504	0,0153	X	XX
4	8	0,7582	0,0153	Xx	XX
3	8	0,7728	0,0153	Xx	XX
5	8	0,8063	0,0153	X	X

Las parcelas 1; 2; 3 y 4 constituyen un grupo homogéneo en cuanto a las medias, mientras que la 5 otro.

En cuanto a la comparación de los valores de Kc calculados y los publicados por FAO (Steduto et al., 2012) se presenta en la tabla 4.

TABLA 4
Comparación de Kc para las distintas etapas fenológicas de cultivos de invierno según metodología de obtención.

Fuente de obtención de Kc	Kc		
	Kc inicial	Kc medio	Kc final
Metodología FAO	0,7	1,15	0,25
Calculado por NDVI medio	0,62	1,02	0,49
Calculado por NDVI mínimo	0,52	0,85	0,36
Calculado por NDVI máximo	0,76	1,22	0,64

De la tabla 4 surge que el Kc del cultivo publicado (Metodología FAO) se encuentra entre los valores mínimos y máximos de los calculados por NDVI y más cercano al máximo valor. Así mismo al observar los valores de Kc comparados de la etapa final del cultivo, el Kc publicado (FAO) se encuentra fuera del rango de valores comprendidos por los Kc calculados por NDVI mínimo y máximo.

En la figura 5 se muestra la evolución de la EVTc mensual calculada según la ecuación 1 a partir de Kc mensuales obtenidos por CROPWAT para los publicados (EVTc FAO) y Kc mensuales calculados a partir de NDVI (ecuación 3 y 4). De este modo la EVT acumulada en el ciclo de cultivo resulta ser de 347 mm utilizando la metodología propuesta por FAO y 345 mm para valores medios de Kc calculados por medio de NDVI, mientras que el acumulado para valores mínimos y máximos fue de 277 mm y 425 mm respectivamente para esta última metodología.

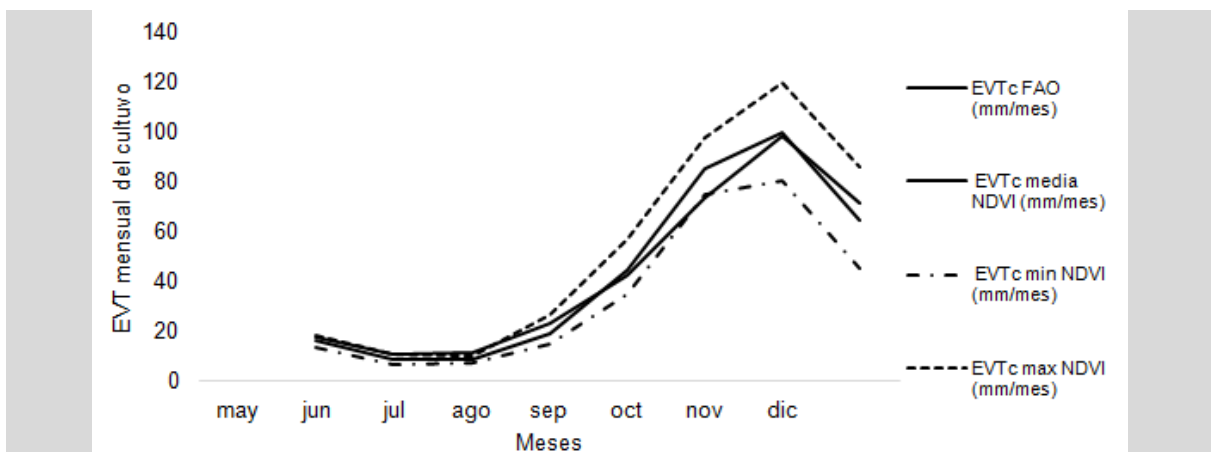


FIGURA 5

Evapotranspiración mensual del cultivo obtenida por el método de FAO y a través de NDVI.

En la Figura 6 se presentan los resultados de la determinación de Kc para las parcelas seleccionadas de pastizales naturales (praderas) a través de sensores remotos (NDVI) considerando el ciclo anual. Se consideraron los años para el período 2000 a 2021 donde se detectaron pastizales naturales, a partir de la interpretación de los resultados gráficos NDVI. Las parcelas donde se identificaron pastizales naturales se corresponden con las unidades cartográficas TP y Drf2 (7 parcelas). Como muestra la figura, las curvas de Kc son coincidentes con los pulsos de crecimiento de las comunidades vegetales presentes en los pastizales naturales. Tomando el promedio anual de los valores máximos de Kc mensuales obtenidos por NDVI es de 1,02.

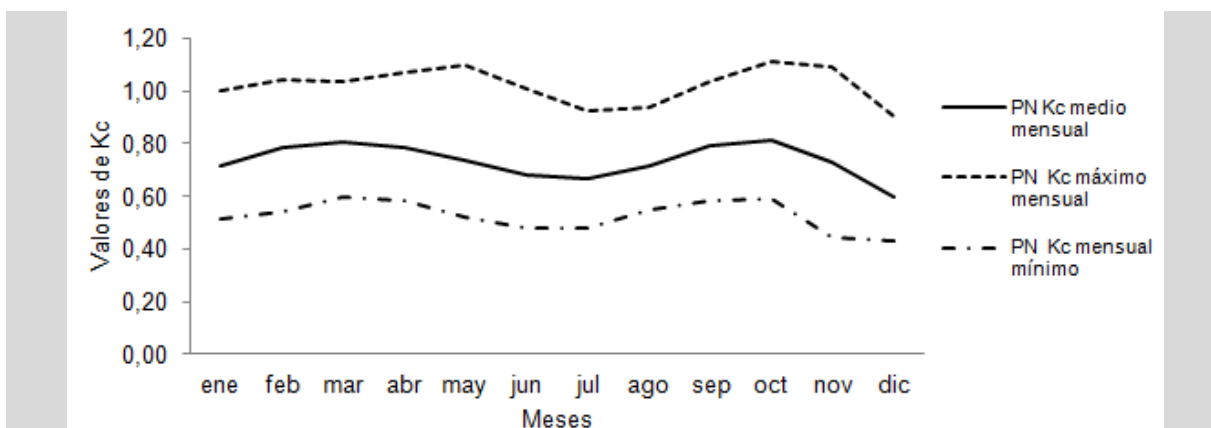


FIGURA 6

Evolución de Kc mensual de pastizal natural a través de NDVI.

En tal sentido la media de EVTc de las parcelas consideradas en el período de años estudiado arroja un resultado de 599 mm/año, siendo los valores máximos de 851 mm/año y los mínimos de 408 mm/año.

DISCUSION

En cuanto a los resultados obtenidos de Kc a partir de NDVI de sensores remotos para cultivos de invierno, si bien se encontraron diferencias entre parcelas (test de medias), no se encontraron factores climáticos y edáficos relacionados con la descripción de suelos que puedan explicar esa diferencia, por lo que es muy probable que se deban a factores locales como diferencias topográficas, de exposición, profundidad real del suelo, entre otras. El Kc publicado FAO por etapa fenológica de los cultivos de invierno coincide con el rango entre mínimo y máximo de los Kc calculados por NDVI, siendo menor a ese rango en la etapa final. Los Kc publicados por etapa fenológica parten de condiciones estándar de los cultivos, o sea que se desarrollen en campos extensos, bajo condiciones agronómicas y sin limitaciones de humedad en el suelo. Por otra parte, definen que la evapotranspiración de un cultivo será diferente a la del cultivo de referencia en la medida en que sus características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y resistencia aerodinámica difieran respecto de este. Siendo estos factores determinados por condiciones específicas y de manejo de cultivo. Tomando los valores medios de Kc calculado por NDVI, la EVTc mensual de ambas metodologías guardan similitud, aunque presentan diferencias en las etapas de desarrollo del cultivo de invierno principalmente, mientras que los milímetros de EVT acumulada arrojan igual resultado. Los valores de Kc calculados por NDVI para pastizales naturales encuentra limitaciones para su comparación con los Kc publicados por FAO por tratarse de comunidades vegetales con cierta diversidad florística y por el hecho de no poder definirse sus etapas fenológicas. La definición de pradera en crecimiento de los valores de Kc publicados, difiere de las comunidades vegetales presentes en la cuenca. Las etapas de inicio y desarrollo se producen durante todo el ciclo anual según los pulsos de crecimiento de las distintas especies que componen el pastizal natural. Los Kc están además influenciados no solo por la composición florística sino también por el método de pastoreo utilizado que para la cuenca que es de tipo continuo por lo que hace más dificultoso determinar ciclos de crecimiento. Aun considerando las diferencias respecto de la estandarización de valores de Kc publicados, el promedio anual de los Kc máximos mensuales obtenidos por NDVI, es coincidente con el Kc de referencia para praderas (valor = 1 de Kc). La principal utilidad de aplicar esta metodología en pastizales naturales de la cuenca es la estimación de demanda evapotranspirativa anual media como resultado de la composición vegetal y el manejo productivo relacionado con su utilización como recurso forrajero.

CONCLUSIONES

Este trabajo aproxima un resultado de Kc para cultivos de invierno y pastizales, obtenidos a partir de una metodología que permite la estimación de la demanda evapotranspirativa de los cultivos para la escala estudiada, como así también contribuir con información para el desarrollo de balances hidrológicos y utilización de agua a nivel regional. Los resultados presentan diferencias con los datos estándares obtenidos a partir de tablas publicadas. Las principales diferencias se originan a partir de cuantificar la variable Kc por medio de mediciones directas (NDVI). Esta estimación por medio de sensores remotos implica un cálculo de Kc que contempla las especificidades de nivel local, en contraposición con la utilización de Kc surgidas de ensayos realizados en países del hemisferio norte. Cabe aclarar que las estimaciones realizadas tienen escaso trabajo de campo, por lo que para generalizar este tipo de información a nivel de cuenca es necesario un muestreo y seguimiento de variables climáticas, edafológicas y fenológicas de los cultivos y pastizales. Las principales variables que tendrían que relevarse en futuros estudios, son las relacionadas con la misma cuantificación del Kc y el cálculo de EVT como, ubicación temporal de ciclos de cultivos, sus etapas fenológicas y técnica de cultivo a nivel de lote o parcela. Y por otro lado las relacionadas con la estimación de evapotranspiración desde el cálculo de balances hidrológicos puntuales con mediciones de humedad de suelo, drenaje y precipitaciones. Para la cuenca estudiada el uso del agua revierte una especial consideración por tratarse de una de las zonas de la provincia de Buenos Aires con precipitaciones medias que pueden limitar la siembra económica de cultivos y la oferta forrajera para ganadería. La cuantificación a nivel de cuenca requiere de un relevamiento por campaña de superficies sembradas con mayores precisiones que el muestreo realizado en este trabajo. La EVTc estimada por Kc

obtenidos a través de sensores remotos, por ciclo de cultivo o por período anual para el caso de los pastizales naturales, tiene un significado de importancia para la confección de balances hidrológicos regionales o estimaciones de indicadores de uso del agua en el contexto del manejo productivo local. De este modo, el volumen demandado de agua por los cultivos de invierno por hectárea es de 3.454 m³ por ciclo, mientras que para la superficie muestreada (215 hectáreas) es de 0,74 hm³ considerando valores medios. En igual sentido el volumen anual de agua demandado por hectárea de pastizales naturales es de 5.590 m³ y para la superficie muestreada (216 hectáreas) es de 1,21 hm³. El Kc calculado a partir de NDVI se vincula a la EVT real de la cobertura vegetal dado que las variables vinculadas a condiciones de campo y manejo, constituyen limitantes no comprendidas en los Kc publicados. Por otro lado, la importancia de la estimación de Kc calculados para periodos de tiempo fijos (mensuales) permite una definición más ajustada a la demanda EVT del cultivo. Este hecho se pone en relieve dado que la metodología publicada por FAO infiere la aplicación de Kc para etapas del cultivo definidas por eventos fenológicos y asume una progresión lineal de la curva de Kc entre tres valores establecidos para la etapa inicial, media y final del cultivo.

La estimación de Kc a partir de sensores remotos para ciclos de cultivo o por período anual para el caso de los pastizales naturales, implica un significativo aporte para la determinación de demanda de agua de la cobertura vegetal que contempla especificidades de manejos productivos locales, toda vez que se relaciona con la EVT real. Por tratarse de una estimación requiere del relevamiento de variables determinantes, para ajustar los resultados.

BIBLIOGRAFIA

- Allen R., Pereira L., Raes D. y Smith M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio de Riego y Drenaje 56*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Bhatti, Saad Saleem y Nitin Kumar Tripathi. (2014). Built-up area extraction using Landsat 8 OLI imagery. *GIScience & Remote Sensing*, 51(4), 445-467. <https://doi.org/10.1080/15481603.2014.939539>
- Burgos, J.J. (1963). *Las heladas en la Argentina*. Colección Científica, 3. INTA, Buenos Aires.
- Castañeda-Ibáñez, C.R., Martínez-Menes, M., Pascual-Ramírez, F., Flores-Magdaleno, H., Fernández-Reynoso, D.S. y Esparza-Govea, S. (2015). Estimación de coeficientes de cultivo mediante sensores remotos en el distrito de riego río Yaqui, Sonora, México. *Agrociencia*, 49(2), 221-232.
- Cuesta, A., Montoro, A., Jochum, A. M., López, P. y Calera, A. (2005). Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *ITEA Información Técnica Económica Agraria*, 101 (3), 212-224.
- Fang, Y., Sun, G., Caldwell, P., McNulty, S., Noormets, A., Domec, J.C., King, J., Zhang, Z., Zhang, X., Lin, G., Zhou, G., Xiao, J. y Chen, J. (2016). Monthly land cover-specific evapotranspiration models derived from global eddy flux measurements and remote sensing data. *Ecohydrology*, 9 (2), 248-266. <https://doi.org/10.1002/eco.1629>
- Frangi, J. y Bottino, O. (1995). Comunidades vegetales de Sierra de la Ventana, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 71, 93-133.
- Lizzi, J., Garbulsky, M., Golluscio, R. y Deregibus, A. (2007). Mapeo indirecto de la vegetación de Sierra de la Ventana, Provincia de Buenos Aires. *Ecología Austral. Asociación Argentina de Ecología*, 17, 217-230.
- Marini, M. F. (2008). El avance de la frontera agrícola en el área adyacente al sistema Sierras de la Ventana (Buenos Aires, Argentina). *Investigaciones Geográficas (España)*, 47, 111-121. <https://doi.org/10.14198/INGEO2008.47.06>
- Pereyra, F. y Tobío, M. (2018). *Geomorfología de la Provincia de Buenos Aires*. Buenos Aires Argentina Dirección de Geología Ambiental y Aplicada. Servicio Geológico-Minero Argentino (SEGEMAR). Recuperado en diciembre de 2022 de <https://repositorio.segemar.gob.ar>
- Sánchez, Tomás J., Caselles Miralles, V., Niclòs Cortés, R., Valor Micó, E. y Coll Company, C. (2005). Cálculo de la evapotranspiración real diaria en la zona norte de Finlandia empleando técnicas de teledetección. *GeoFocus*, (5), 278-300.
- SATVeg “Sistema de Análise Temporal da Vegetação”, Recuperado en diciembre de 2022 de <https://www.satveg.cnptia.embrapa.br>
- Segura-Castruita, M.A. y Ortiz-Solorio, C.A. (2017). Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud. *Tecnología y Ciencias del agua*, 8(3), 93-110. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-03-06>

- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., y Raes, D.** (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Roma. Estudio FAO: Riego y Drenaje. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Recuperado en diciembre de 2022 de <https://www.fao.org>
- Zajac, C., Galantini, J., Zajac, E., Vallejos, A. y Córdoba, M.** (2013). *Análisis del rendimiento y el NDVI en cereales de invierno en el Sudoeste Bonaerense. Ciencia y experiencia para una siembra directa sustentable en los ambientes frágiles del S y SO Bonaerense*. Galantini.