

Análisis comparativo del balance de agua en el suelo en cultivos de maíz,
soja y doble cultivo para los departamentos de Unión y Marcos Juárez,
Córdoba

*Trabajo final presentado para optar al título de
Especialista en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al
estudio de los recursos naturales y la producción agropecuaria*

María Paula Valania
Licenciada en Sistemas - UBA - 1987

Lugar de trabajo: Centro de Estudios Sociales de América Latina - Facultad de Ciencias
Humanas - Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires



TUTOR

Tutor

María Eugenia Beget

Ingeniera Agrónoma – Universidad de Buenos Aires

Magister en Recursos Naturales - Universidad de Buenos Aires

JURADO DE TRABAJO FINAL

Marcelo Daniel Nosetto

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de Entre Ríos

Doctor en Ciencias Agropecuarias – Universidad de Buenos Aires

Pablo Baldassini

Licenciado en Ciencias Ambientales – Universidad de Buenos Aires

Doctor en Ciencias Agropecuarias – Universidad de Buenos Aires

Fecha de defensa del Trabajo Final: 22 de mayo de 2024

Agradecimientos

A Julieta Straschnoy sin cuyo enorme acompañamiento, cariño, sostén y perseverancia nada de esto hubiera sido posible.

A mi Directora María Eugenia y al Profesor Carlos Di Bella, quienes con su predisposición, tiempo e infinita paciencia, me orientaron en la concreción de este trabajo, permitiéndome darle un cierre a esta fascinante etapa de formación.

Al equipo docente de esta Especialización, que gracias a su elevada calidad académica, pero sobre todo a su inocultable pasión por lo que hacen, logran fascinar irremediabilmente a sus alumnos.

A mis compañeros de cursada con los que fue y aún hoy es, un verdadero placer compartir entre todos nuevos conocimientos e inquietudes.

Finalmente a mis hijos que me alentaron siempre a transitar nuevos desafíos!

"Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original, producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no ha sido presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución."

Resumen

La disponibilidad de agua en el suelo condiciona fuertemente el rendimiento de las actividades agrícolas de secano. Esta disponibilidad hídrica está básicamente determinada por tres factores: las precipitaciones (PPTs), la evapotranspiración real (ETR) y las características propias del suelo en cuanto a su capacidad para retener humedad. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el balance de agua en distintas coberturas agrícolas, a partir del uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica, para un Área de Estudio (AE) de la zona núcleo de la región Pampeana. Los datos evaluados correspondieron al sudeste de la provincia de Córdoba, departamentos de Marcos Juárez y Unión, para la campaña 2018-2019. Las tres coberturas en análisis, específicamente seleccionadas por su prevalencia, fueron cultivos únicos de maíz y soja y doble cultivos (cultivo de invierno y cultivo de soja de segunda). La identificación de los distintos cultivos de interés se llevó a cabo a partir de un producto de clasificación supervisada de coberturas. Además, se emplearon datos espectrales para estimar tanto las PPTs ocurridas como la ETR y para determinar el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). A partir de ellos se pudo realizar una descripción feno-espectral de las coberturas, considerando la evolución de su fenología y los atributos funcionales derivados de la marcha estacional del NDVI. Se calcularon también los balances hídricos mensuales seriados para cada muestra, junto con la valoración de estos balances en momentos de interés: inicio del mes crítico (máximo NDVI) y final de campaña. A su vez se analizó una posible correlación entre los niveles de carga hídrica de los perfiles al inicio de sus respectivos meses críticos y diferentes niveles de NDVI integral (NDVI-I). Los lotes del AE destinados al doble cultivo evapotranspiraron al cabo de la campaña completa, en promedio, un 10,18% más que el cultivo único de soja y un 13,4% más que el cultivo único de maíz. Similares porcentajes se presentaron al considerar los consumos promedio de los lotes de Marcos Juárez y Unión de forma independiente. La campaña analizada ha resultado especialmente húmeda, con PPTs aproximadamente un 18% superiores a la media histórica anual, siguiendo éstas su habitual régimen estival. El promedio de las cargas mensuales de los perfiles, para los lotes del AE y los de cada uno de los departamentos considerados individualmente, ha resultado superior al 90% de la capacidad de agua útil para los cultivos únicos y de, aproximadamente, un 82% para el doble cultivo. Pudo concluirse que los distintos niveles de consumo estuvieron asociados de forma distintiva a las diferentes coberturas en análisis. Los balances hídricos seriados, para el AE y para cada departamento en particular, dan cuenta de cierta holgura del recurso hídrico, probablemente determinado por la abundancia de lluvias registradas. Dada esta característica meteorológica peculiar de la campaña en estudio, resultaría de interés analizar múltiples campañas con diversidad de condiciones meteorológicas, para arribar a conclusiones más amplias.

Abstract

Soil water availability strongly conditions the yield of rainfed agricultural activities. This water availability is primarily determined by three factors: precipitations (PPTs), actual evapotranspiration (ET) and soil characteristics regarding its moisture retention capacity. In this context, the aim of this work was to evaluate the water balance in different agricultural coverages, using remote sensing and Geographic Information Systems for a study area (SA) in the core zone of the Pampean Region. The evaluated data corresponded to the southeast of the province of Córdoba, in the Marcos Juárez (MJ) and Unión (U) departments, for the 2018-2019 campaign. The three analyzed cover types, specifically selected for their prevalence, were single crops of maize and soybean, and double cropping (winter crop and summer soybean crop). The identification of different crops of interest was carried out using a supervised land cover classification product. Additionally, spectral data were used to estimate both occurred PPTs and ETR, and to determine the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Based on them, it was possible to perform a phenospectral description of the vegetation coverages, considering the evolution of their phenology and the functional attributes derived from the seasonal variation of NDVI. Monthly serialized water balances were also calculated for each sample, along with the assessment of these balances at key moments of interest: the beginning of the critical month (maximum NDVI) and the end of the campaign. Furthermore, a potential correlation between the water content levels and different levels of integral NDVI (I-NDVI) was analyzed. Throughout the campaign, double cropping fields evapotranspired, on average, 10,18% more than single soybean crops and 13,4% more than single maize crops. Similar percentages were observed when considering the average water consumption of the plots in Marcos Juárez and Unión independently. The analyzed campaign has been notably wet, with PPTs approximately 18% above the historical annual average for the area, following its typical summer pattern. The average monthly soil moisture levels for the SA plots and for the plots of each individual department, have exceeded 90% of the available water capacity for single crops and approximately 82% for double cropping. It could be concluded that different levels of consumption were distinctively associated with the different analyzed vegetation coverages. The serialized water balances, both for the entire SA and for each department individually, indicate a certain surplus of water resources, likely determined by the abundance of PPTs. Given this peculiar meteorological characteristic of the studied campaign, it would be of interest to analyze multiple campaigns with a diversity of meteorological conditions to arrive at broader conclusions.

Índice general	Pág.
1. Introducción	7
2. Materiales	9
2.1. Área de Estudio (AE)	9
2.2. Datos satelitales	12
2.3. Datos de fuentes no satelitales	13
3. Metodología	13
3.1. Selección de lotes de muestreo	13
3.2. Extracción e integración de datos	15
3.3. Procesamiento de datos extraídos/integrados	15
3.3.1. Descripción feno-espectral	15
3.3.2. Cálculo del balance de agua	16
3.4. Relación entre balances hídricos previos al mes de NDVI Máximo y valores de NDVI-I	18
4. Resultados y Discusión	18
4.1. Descripción feno-espectral	18
4.2. Balance de agua	22
4.3. Relación entre balances hídricos previos al mes de NDVI Máximo y valores de NDVI-I	42
5. Conclusiones	43
Referencias	45

Índice de Tablas

Tabla 1. Cantidad de lotes por cobertura	pág.14
Tabla 2. Atributos funcionales del NDVI	pág.21
Tabla 3. ETR (mm) promedio acumulada durante la campaña	pág.23
Tabla 4. Medias, tamaños de muestra (n) y errores estándar (E.E) de ETR (mm) total campaña. - Letras distintas corresponden a diferencias significativas ($p<0,05$).....	pág.23
Tabla 5. Medias, tamaños de muestra (n) y errores estándar (E.E) de ETR (mm) Promedio Mensual. - Letras distintas corresponden a diferencias significativas ($p<0,05$).....	pág.24
Tabla 6. Precipitaciones (PPTs) promedio (mm) total campaña	pág.27
Tabla 7. Promedio del contenido hídrico al final de cada mes, a partir del balance hídrico seriado. Porcentaje de carga (% Carga), Desvíos Estándar (SD) y coeficiente de variación (CV).....	pág.33
Tabla 8. Cantidad (Cant) y porcentaje (%) de lotes con diferentes porcentajes de carga de agua útil respecto del máximo–Previo NDVI Máximo, para el área de estudio. pág.36	
Tabla 9. Cantidad (Cant) y porcentaje (%) de lotes con diferentes porcentajes de carga de agua útil respecto del máximo – Previo NDVI Máximo, para Marcos Juárez ... pág.36	
Tabla 10. Cantidad (Cant) y porcentaje (%) de lotes con diferentes porcentajes de carga de agua útil respecto del máximo - Previo NDVI Máximo, para Unión	pág.37
Tabla 11. Cantidad (Cant) y porcentaje (%) de lotes con diferentes porcentajes de carga de agua útil respecto del máximo - Fin de campaña, para el área de estudio	pág.39
Tabla 12. Cantidad (Cant) y porcentaje (%) de lotes con diferentes porcentajes de carga de agua útil respecto del máximo - Fin de campaña, para Marcos Juárez	pág.40
Tabla 13. Cantidad (Cant) y porcentaje (%) de lotes con diferentes porcentajes de carga de agua útil respecto del máximo - Fin de campaña, para Unión	pág.40
Tabla 14. Porcentaje de lotes en cada uno de los diferentes niveles de carga de agua útil al inicio del mes de NDVI máximo, para cada categoría de valores de NDVI-I, para el área de estudio (AE)	pág.42
Tabla 15. Porcentaje de lotes en cada uno de los diferentes niveles de carga de agua útil al inicio del mes de NDVI máximo, para cada categoría de valores de NDVI-I, para Marcos Juárez.....	pág.42
Tabla 16. Porcentaje de lotes en cada uno de los diferentes niveles de carga de agua útil al inicio del mes de NDVI máximo, para cada categoría de valores de NDVI-I, para Unión	pág.43

Índice de Figuras

Figura 1. Localización del Área Estudio. (Fuente: elaboración propia)	pág.10
Figura 2. A. Tipos de suelos de la Provincia de Córdoba (Fuente: INTA, 2013). B. Distribución de suelos salinos, sódicos y salino-sódicos Marcos Juárez y Unión. (Fuente Aimetta et al., 2020)	pág.11
Figura 3. Distribución espacial de los lotes seleccionados (Fuente: elaboración propia)	pág.15
Figura 4. Evolución mensual del NDVI promedio por cobertura – Las barras representan 1 Desvío Estándar	pág.20
Figura 5. Categorización del NDVI-I – Histograma de frecuencias para el área de estudio, discriminado por departamento. A. Soja – B. Maíz – C. Doble cultivo – D. Cultivo de invierno – E. Soja de 2da	pág.22
Figura 6. Evapotranspiración real (VIIRS Suomi Npp) mensual promedio y Desvíos Estándar (mm) para el área de estudio	pág.24
Figura 7. Porcentaje mensual de la Evapotranspiración real de toda la campaña para cada cobertura para el área de estudio	pág.25
Figura 8. Evapotranspiración real (VIIRS Suomi Npp) mensual promedio y Desvíos Estándar (mm) para Marcos Juárez	pág.26
Figura 9. Evapotranspiración real (VIIRS Suomi Npp) mensual promedio y Desvíos Estándar (mm) para Unión	pág.26
Figura 10. Distribución espacial de precipitaciones estimadas por CHIRPS acumuladas jun-2018/may-2019. (Fuente: elaboración propia)	pág.27
Figura 11. Precipitaciones por cultivo estimadas por CHIRPS promedio mensuales y Desvíos Estándar (mm) para el área de estudio	pág.28
Figura 12. Precipitaciones estimadas por CHIRPS y evapotranspiración real (VIIRS Suomi Npp) para los lotes de soja – Promedios mensuales (mm) para el área de estudio	pág.29
Figura 13. Precipitaciones estimadas por CHIRPS y evapotranspiración real (VIIRS Suomi Npp) para los lotes de maíz – Promedios mensuales (mm) para el área de estudio	pág.29
Figura 14. Precipitaciones estimadas por CHIRPS y evapotranspiración real (VIIRS Suomi Npp) para los lotes de doble cultivo – Promedios mensuales (mm) para el área de estudio	pág.30
Figura 15. Precipitaciones por cultivo estimadas por CHIRPS promedio mensuales y Desvíos Estándar (mm) para Marcos Juárez	pág.31
Figura 16. Precipitaciones por cultivo estimadas por CHIRPS promedio mensuales y Desvíos Estándar (mm) para Unión	pág.31
Figura 17. Ajuste de las precipitaciones promedio mensuales: Pluviométricas EEA Marcos Juárez vs. CHIRPS (ubicación exacta)	pág.32
Figura 18. Comparación de las precipitaciones promedio CHIRPS vs. estación meteorológica EEA Marcos Juárez	pág.32
Figura 19. Balance hídrico mensual seriado para el área de estudio	pág.34

Figura 20. Balance hídrico mensual seriado para Marcos Juárez	pág.35
Figura 21. Balance hídrico mensual seriado para Unión	pág.35
Figura 22. Distribución espacial balances hídricos previos mes NDVI Máx - Cortes al 10%-30%-50%-70%-90% de Máximo de carga de agua útil del perfil. A. Soja (febrero) B. Maíz (enero) C. Cult. Inv. (septiembre) D. Soja de 2da (febrero). (Fuente: elaboración propia)	pág.38
Figura 23. Componentes del balance hídrico seriado para lotes de maíz (inicio 01/2019). A. Precipitaciones (PPTs) acumuladas B. Evapotranspiración Real (ETR) acumulada (Fuente: elaboración propia)	pág.39
Figura 24. Distribución espacial de balances hídricos por lote al fin de campaña A. Soja B. Maíz C. Doble Cult. (Fuente: elaboración propia)	pág.41
Figura 25. NDVI-I del cultivo de maíz para lotes con perfiles con cargas inferiores al Corte Máximo para el departamento de Unión. Inicio de enero 2019 (mes de máximo NDVI). (Fuente: elaboración propia)	pág.43

1. Introducción

El rendimiento de las actividades agrícolas en los sistemas de secano se ve fundamentalmente condicionado por la disponibilidad de agua en el suelo. Esta disponibilidad hídrica puede calcularse como un balance entre las precipitaciones (PPTs), la evapotranspiración (ET) y el almacenaje de agua en el suelo (Spescha, et al., 2001). Las **PPTs** constituyen el factor climático fundamental que condiciona el contenido de agua en el suelo de forma directa y por ende, el de mayor impacto en la agricultura de secano. Ellas definen, en parte, la distribución y rendimiento de los cultivos. Su impacto no sólo está relacionado a su aporte hídrico anual sino también a las características de su estacionalidad, distribución, variabilidad, cambios y eventos extremos (Casagrande et al., 2014).

La evapotranspiración real (**ETR**) es definida como la cantidad de agua efectiva, expresada en mm/día, originada por la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la cubierta vegetal. La evapotranspiración de un suelo cultivado se presenta casi en un 100% en forma de evaporación al momento de la siembra, mientras que cuando se llega a una cobertura vegetal completa, más del 90% se explica por la transpiración de dicha cobertura (Allen et al., 2006). Entre los diferentes factores que afectan a esta variable pueden mencionarse: a) factores climáticos (radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento, etc.), b) factores relacionados al cultivo (tipo de cultivo, variedad, estado fenológico, etc.) y c) factores relacionados al suelo: tipo, humedad, capacidad de retención de agua, salinidad, entre otros (Brisson et al., 1992).

La ETR es un componente fundamental del ciclo hidrológico a nivel planetario, ya que expresa el intercambio de masa y energía entre el sistema tierra-agua-vegetación y la atmósfera, y explica el 60% de las PPTs continentales (Brutsaert, 1986). Estas complejas interacciones provocan gran variabilidad espacial y temporal (Irmak et al. 2011). Por este motivo resulta fundamental poder estimarla de forma continua y en tiempo real a través de herramientas confiables, fácilmente accesibles y económicas. Básicamente existen dos tipos diferentes de métodos para estimar evapotranspiración: a) los basados en datos registrados en la superficie y b) los basados en datos obtenidos mediante percepción remota. Los primeros se dividen en directos, que obtienen mediciones de campo precisas a través de instrumental específico, e indirectos que utilizan ecuaciones empíricas o semi-empíricas basadas en datos meteorológicos. Entre los métodos basados en datos espectrales, se distinguen aquellos que utilizan los datos remotos para calcular la evapotranspiración como residuo a partir de la ecuación de conservación de energía en la superficie evapotranspirante y los modelos basados en las relaciones entre la evapotranspiración y determinadas características de la vegetación como las expresadas a través de ciertos índices espectrales, particularmente el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) o IVN (Índice de Vegetación Normalizado). Para el caso de los métodos de estimación basados en datos registrados en superficie se requiere realizar regularmente mediciones precisas, de alcance geográfico limitado, lo que los vuelve complicados, de alto costo (Marini et al., 2017) y no asequibles para alcances regionales (Irmak et al., 2011).

Los sensores remotos, particularmente, han sido la respuesta a estos requerimientos, ya que proveen información espectral apropiada para la estimación de la ETR a diferentes escalas temporales con alcance regional, a través de modelos empíricos estandarizados (e.g., Di Bella et al., 2000; Marchesini et al., 2015; Marini et al., 2017). La estimación de la ETR puede obtenerse en base a diferentes fuentes satelitales. Una alternativa es estimarla a partir de imágenes satelitales del sensor AVHRR-NOAA. Los datos espectrales provistos se relacionan con NDVI y temperatura de superficie (T_s), obtenida a partir de la temperatura de brillo del infrarrojo térmico. Estos datos alimentan a un modelo validado para la región Pampeana (Di Bella et al. 2000). Las limitaciones radiométricas y geométricas actuales del sensor AVHRR (Cocero et al., 2001) y la disponibilidad de nuevos sensores y plataformas satelitales, han llevado a recalibrar el modelo para la nueva generación de sensores VIIRS-Suomi Npp (Di Bella et al., 2019).

En cuanto al restante componente para estimar la disponibilidad de agua para los cultivos, el **suelo** propiamente dicho, constituye el reservorio del agua precipitada que luego será utilizada por las plantas. Si el almacenaje de agua en el suelo es abundante, constituye una suerte de seguro para el consumo de los cultivos en los días exentos de precipitación (Casagrande et al., 2014). Para estimar este almacenaje debe considerarse el concepto de agua útil. El agua útil en el suelo se refiere a la cantidad de agua que está disponible para las plantas en un suelo específico y que se encuentra entre dos puntos críticos: la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. Estos dos puntos son fundamentales para comprender la disponibilidad de agua en el suelo para el crecimiento de las plantas. La capacidad de campo se refiere al contenido de agua en el suelo después de que ha sido completamente saturado y ha drenado el exceso de agua. Ésta está relacionada con las características del suelo en cuestión. El punto de marchitez permanente, por su parte, se refiere al contenido de agua en el suelo en el que las plantas ya no pueden extraer agua con facilidad. El suelo retiene una cantidad mínima de agua que está fuertemente adherida a las partículas del suelo y no es accesible para las raíces de las plantas. Los excedentes hídricos serán retenidos en parte por el suelo hasta saturar su capacidad para eventualmente percolar en profundidad hacia la napa y/o generar una escorrentía superficial (Nosetto et al., 2012). Por el contrario, de presentarse valores de ETR superiores al agua precipitada, el faltante será tomado desde el contenido de humedad del suelo y/o desde la napa. Por tanto, el cómputo del balance hídrico del suelo permite estimar las necesidades de agua de riego en sistemas irrigados, o las expectativas de producción y detección de estrés hídrico en sistemas naturales o agrícolas de secano.

En el contexto de la utilización del nuevo modelo para la estimación de la ETR basado en productos de la nueva generación de sensores VIIRS-Suomi Npp (Di Bella et al., 2019), el presente trabajo tiene como objetivo general estimar, para la campaña 2018-2019, el balance de agua en el suelo de los cultivos de soja, maíz y doble cultivo (cultivo de invierno + soja de segunda) de la zona núcleo de la región Pampeana a partir del uso de sensores remotos y sistemas de información geográfica.

Al considerar los componentes que intervienen en el cálculo del contenido de agua en el suelo y las condiciones que pueden influir sobre estas variables, pueden plantearse como objetivos específicos:

- a. Analizar la fenología de cada cobertura a través de sus valores de Índice Verde Normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés). Para esta variable estimar además sus atributos funcionales: NDVI Integral (NDVI-I), Mes y valor de Máximo NDVI.
- b. Analizar la ETR mensual promedio para los distintos estadios fenológicos de cada tipo de cobertura.
- c. Calcular PPTs mensuales promedio provenientes tanto de datos satelitales como de la estación meteorológica del área y comparar los resultados obtenidos en cada caso.
- d. Estimar, para las coberturas de interés, un balance hídrico seriado simplificado.
- e. Analizar la variabilidad espacial y temporal de los balances hídricos de los lotes destinados a cada tipo de cobertura, tanto al final de la campaña como en el momento previo a su período crítico.

2. Materiales

2.1. Área de Estudio (AE)

El AE comprendió los departamentos de Unión y Marcos Juárez, al sudeste de la provincia de Córdoba, Argentina, entre los 32° y 34° de latitud sur. El departamento Unión ocupa una superficie de 1.094.716 ha mientras que el de Marcos Juárez, 924.532 ha, de acuerdo con el programa de Infraestructura de datos Espaciales Córdoba (IDECOR, 2018). Esta área está incluida dentro de la “Pampa Interior” según la clasificación de los pastizales naturales del Río de la Plata, según lo definido por León en Soriano (1991), prácticamente comprendida en su totalidad en la cuenca del río Carcarañá (**Figura 1**).

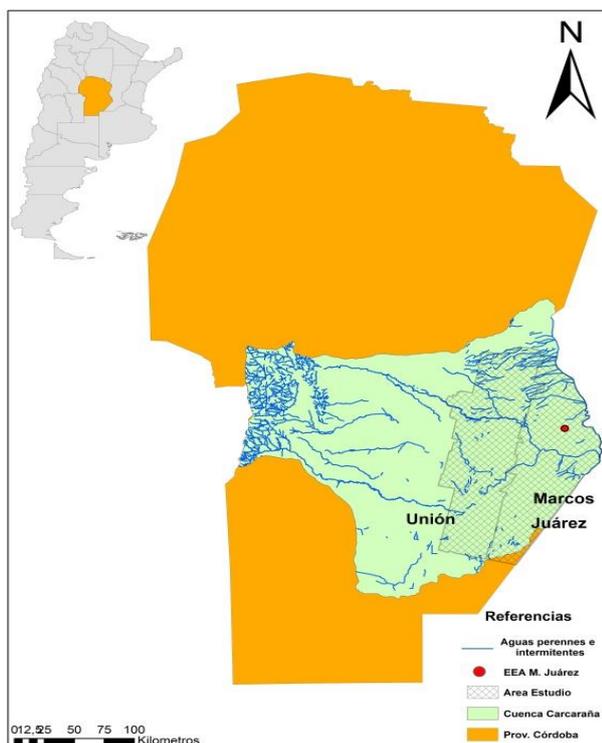


Figura 1. Localización del Área Estudio. (Fuente: elaboración propia)

En cuanto a las características climáticas, la zona presenta un régimen térmico templado con una isoterma media anual de 16,5°C. Las isohietas en el área de estudio disminuyen de E a O, entre 1000 a 700 mm aproximadamente. Esta región presenta un régimen de PPTs monzónico, dado que las lluvias se concentran en el semestre cálido (de octubre a marzo), evidenciando estacionalidad creciente hacia el oeste del área (Pérez et al., 2015). En cuanto a su magnitud, se consigna una media anual histórica registrada por la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) del área (Marcos Juárez) para el período 1948-2015, de 890,4 mm (Andreucci et al., 2015).

Los suelos son resultado de la sedimentación continua cuyos sedimentos superficiales son continentales y de procesamiento eólico. El tipo de suelo predominante corresponde a los Molisoles, suelos profundos, sin limitaciones y de muy alta productividad agrícola (**Figura 2A**). Por este motivo la mayor parte del área se destina a la producción de cereales y oleaginosas, principalmente maíz, trigo y soja (Daniele y Natenzon, 1994), (Ferrerías et al., 2015). Según datos presentados por la Bolsa de Cereales de Córdoba (BCCBA, 2023), el departamento de Marcos Juárez registró, como porcentaje de su superficie destinado a cada uno de estos tres cultivos para la campaña 2014-2015, el 13,4% para el maíz, 16,4% para el trigo y 59,4% para la soja, mientras que en la campaña 2018-2019 estos valores se correspondieron con el 21,2%, el 21,5% y el 54,5%, respectivamente. Para el departamento de Unión la campaña 2014-2015 presentó un 11% de su superficie destinada al cultivo de maíz, un 15,7 % destinado al trigo y un 45,7% destinado a la soja; en la campaña 2018-2019 estos porcentajes fueron de 21%, 21,5% y 35,4%, respectivamente. En ambos

departamentos la comparación entre ambas campañas indica un aumento de las superficies destinadas al maíz y al trigo, mientras que se registró una disminución de la superficie destinada al cultivo de soja. El desarrollo de esta actividad agrícola evidencia problemas de salinidad y sodicidad (Gorgas & Tassile, 2003; Aimetta et al., 2020, **Figura 2B**). En la zona se presenta el fenómeno de expansión agrícola, actividad que en estos casos se realiza sobre suelos con restricciones ambientales. El cambio en el uso del suelo, de ganadería o tambo a agricultura, ha sido muchas veces responsable de su degradación al generarse inundaciones y salinización por el ascenso de agua en el perfil (mayores PPTs / menor consumo de los cultivos anuales únicos) y su posterior retroceso en períodos secos (García et al., 2018). Esto podría mitigarse a través de una intensificación sustentable de las explotaciones agrícola-ganaderas de forma de utilizar más eficientemente los recursos ambientales, tales como el agua y la radiación solar, durante todo el año, especialmente considerando el alto potencial productivo de un AE con gran influencia de napa cercana (Bollatti & NAPAS). El manejo sustentable debería incluir el aumento de la frecuencia de cultivos (múltiples cultivos anuales) y planteos de rotación ganadera (para promover la implantación de pastizales con consumos de agua menos estacionales), en contraposición a los habituales cultivos anuales únicos ininterrumpidos (Caviglia & Andrade, 2010).

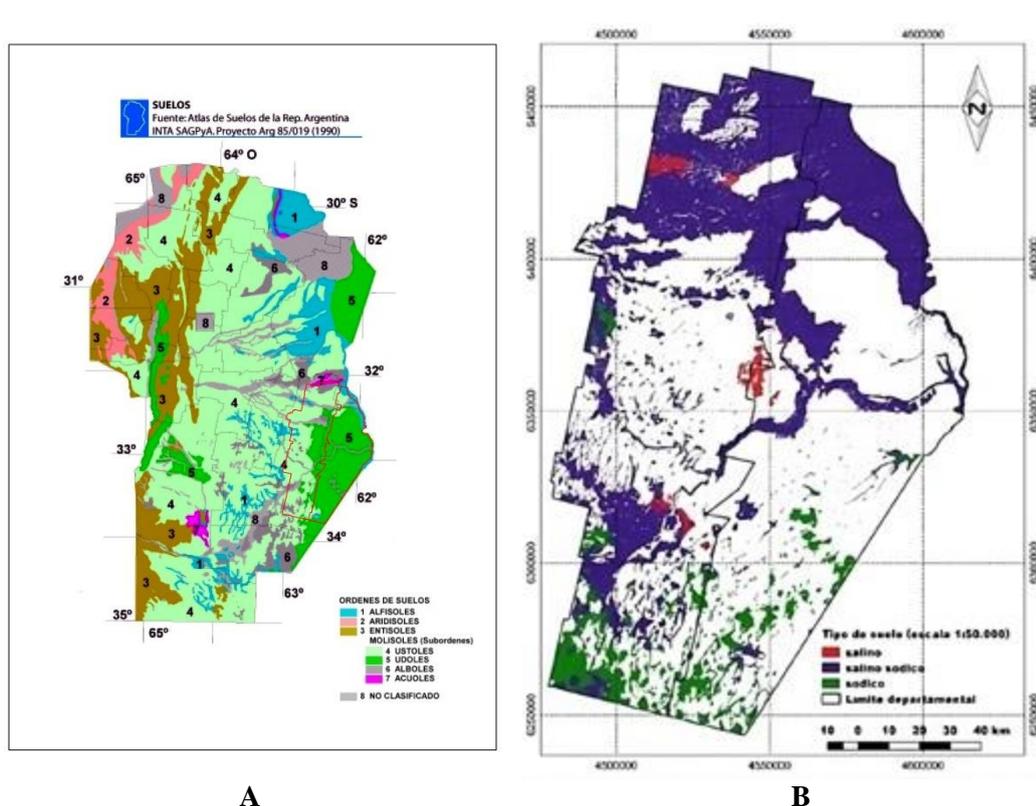


Figura 2. A. Tipos de suelos de la Provincia de Córdoba (Fuente: INTA, 2013). B. Distribución de suelos salinos, sódicos y salino-sódicos Marcos Juárez y Unión. (Fuente Aimetta et al., 2020)

Las napas freáticas de la zona se encuentran, en general, cercanas a la superficie dada la escasa pendiente regional y la presencia de cordones medanosos que dificultan la evacuación de los excesos hídricos ocasionales. Por ello estos excesos son mayormente evacuados en forma evaporativa, proceso que usualmente conduce a la acumulación de sales (Nosetto et al., 2010). Según un estudio realizado por Ovando y otros (2019), al analizar el período 2001-2018 se observa la disminución en la profundidad de la napa, acentuándose ésta para los períodos del 07/2009-01/2010 y el 07/2012-01/2013, coincidentes con baja ocupación del suelo e incremento de PPTs. Específicamente al inicio de la campaña 2018-2019, la napa freática en el AE presentaba escasa profundidad, aproximadamente de 1,5 m.

2.2. Datos satelitales

Para la identificación de las coberturas del suelo se utilizó un ráster de clasificación, el “Mapa Nacional de Cultivos – Campaña 2018-2019 – Colección 1, versión 1.” del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), elaborado por De Abelleira et al. (2019). Se trata de una clasificación supervisada realizada a partir de índices obtenidos de escenas Landsat y de muestras surgidas de relevamientos de campo. Esta clasificación general divide a los usos y coberturas en 15 clases, de las cuales resultaron de interés para este trabajo las clases: 0-Maíz (cultivo único sembrado en la campaña), 1-Soja 1era (cultivo único sembrado en la campaña), 2-CI+Soja (invierno: cultivo/verdeo/cobertura y soja de segunda) y 3-CI+Maíz (invierno: cultivo/verdeo/cobertura y maíz de segunda). La clasificación presentó para el AE, perteneciente a la Zona VI del Panorama Agrícola Semanal (PAS) de la Bolsa de Cereales de Buenos Aires (BCBA, 2024), una exactitud general de 0,83 y un índice Kappa de 0,77 sobre 6 clases.

En cuanto a la información de evapotranspiración real (ETR) se utilizaron imágenes generadas por Di Bella et al. (2019) a partir de la aplicación de un modelo de estimación basado en datos espectrales del sensor VIIRS-Suomi NPP. En él se consideraron los efectos lineales y aditivos del NDVI y la temperatura de superficie (Ts), resultando el siguiente modelo:

$$\sqrt{\text{ETR}(\text{mm/día})} = -1.37 + 9.52 \times \text{IVN} + 0.14 \times \text{Ts}$$

A partir de su aplicación se generaron 3 imágenes para cada mes, de 375 m de resolución espacial. Cada una de estas imágenes presentó estimaciones mensuales para el mes correspondiente. De esta forma, la campaña completa, desde el 01/06/2018 al 31/05/2019 totalizó un conjunto de 36 imágenes decádicas.

Para la descripción fenológica a lo largo de la campaña se utilizaron imágenes MODIS, producto MOD13Q1.006, que provee valores de NDVI normalizados a nivel píxel. Los mismos se calculan cada 16 días con una resolución espacial de 250 m, a partir de valores de reflectancia de superficie atmosféricamente corregidos, enmascarados para agua, nubes, aerosoles pesados y sombras de nubes.

Para contar con los datos de precipitaciones ocurridas en el AE y poder compararlos con los datos meteorológicos puntuales, se utilizaron imágenes

satelitales pentádicas a 0,05 grados de resolución espacial del producto CHIRPS (CHIRPS Pentad: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation With Station Data).

2.3. Datos de fuentes no satelitales

Se utilizaron datos provenientes de la EEA - Marcos Juárez, perteneciente al INTA. Esta estación está vinculada a la identificación interna NH0502; situada en la ubicación exacta correspondiente a una latitud de $-32,68^\circ$ y una longitud de $-62,12^\circ$ (**Figura 1**).

Los datos obtenidos corresponden a la ubicación puntual de la EEA y están relacionados a:

Datos meteorológicos: se obtuvieron valores de las PPTs mensuales registradas así como de la evapotranspiración potencial (ETP) mensual, ambos datos expresados en milímetros.

Datos edáficos: valor de la capacidad de agua útil del suelo en milímetros, correspondiente a la capacidad de carga menos el punto de marchitez permanente del suelo. Este dato puntual se generalizó como único valor de capacidad de agua útil por ser el único disponible para el AE al momento del procesamiento de los datos.

3. Metodología

3.1. Selección de lotes de muestreo

El ráster original de clases de coberturas fue inicialmente procesado para adecuarlo al área de interés y mejorar su “calidad”, considerando que el mismo es la resultante de un proceso de clasificación. Para ello se recortó el área de estudio asignada (departamentos de Unión y Marcos Juárez – Córdoba). Este recorte fue re proyectado al sistema de referencia POSGAR 2007, Faja 4. Sobre el recorte de interés re proyectado se aplicó un filtro de moda, Majority Filter (complemento SAGA), con un radio igual a 1 para suavizar el posible efecto “sal y pimienta”. A partir de esta imagen filtrada se creó una capa de polígonos categorizados de acuerdo con la clasificación original provista en la capa ráster.

Selección de polígonos en cada clase

A partir de la capa vectorial de clasificación se establecieron diferentes criterios para la selección de los polígonos a partir de los cuales se definirían luego las muestras en cada categoría. Considerando la gran cantidad de entidades y la distribución espacial homogénea que presentaban, como criterio de filtrado inicial se descartaron las de menor superficie. Para ello se consideró un valor umbral de 225 ha. Considerando que la posterior definición de cada uno de los lotes en cada categoría se realizaría en base a la selección de una única celda de una grilla MODIS de 500 m por polígono, se buscó descartar aquellas entidades en las que resultara imposible, por su tamaño, contener una ventana de 3x3 píxeles de 500 m de la misma categoría. Cada clase quedó así compuesta por el siguiente número de entidades: maíz (cult. único): 376 polígonos, soja (cult. único): 554 polígonos, cult. de invierno + soja de segunda (doble cultivo): 288

polígonos, cult. de invierno + maíz de segunda (doble cultivo): 11 polígonos; las entidades seleccionadas en cada una de esas clases representaron el 8,7%, 22,4%, 5,9% y 0,3% de la superficie del AE, respectivamente. Dada la escasa representatividad de la última clase, y su concentrada y exclusiva distribución geográfica en la zona sur del departamento de Marcos Juárez, la categoría fue descartada del análisis.

Definición de lotes en cada cobertura

Inicialmente se ejecutó un script de R para generar, en formato “kml”, una grilla MODIS con resolución espacial 500 m. La misma fue posteriormente convertida a capa vectorial de polígonos para realizar su intersección con cada una de las capas vectoriales de las 3 categorías de cobertura en estudio. En cada una de las capas de intersección resultantes sólo se seleccionaron las celdas de la grilla completamente contenidas en los “polígonos” de cada cobertura (píxeles MODIS puros desde el punto de vista de la clasificación). A través de un exhaustivo análisis de fotointerpretación se seleccionó manualmente, dentro de cada conjunto de estos píxeles puros, uno solo de ellos tal que el mismo resultará “central” (idealmente en una ventana de al menos 3x3) a la vez que completamente incluido en un lote real. Esta selección buscó asegurar la pureza del píxel/lote en cuanto a su pertenencia a una categoría específica. Se presentó tanto un buen número de casos en cada clase, como así también una homogénea distribución espacial en el área completa de estudio (**Tabla 1** y **Figura 3**). En todos los casos se buscó incluir la mayor variabilidad espacial posible dado que, en cuanto a la variabilidad temporal, los datos se limitan a una única campaña.

A partir de la definición de los centroides de los lotes/píxeles de cada categoría, se obtuvieron las capas de puntos de cada cobertura. Este formato adicional al de “lote/píxel” (polígonos) se utilizó para realizar la posterior extracción de demás datos de interés.

La elección de un tamaño de lote/píxel de 500 m para la extracción de datos se basó en la inclusión en el planteo original de este trabajo, del producto MOD16A2 (MODIS) de estimación de la ETR con esa resolución espacial. Sin embargo al realizar una comparación con los valores de ETR del producto VIIRS, se registró una subestimación del producto de MODIS (resultados no mostrados), concordante con lo expuesto por Degano y otros (2021). Esto motivó que el producto de MODIS fuera descartado. La resolución de lote así elegida proporciona un único valor de NDVI para el mismo, por lo que no se considera la variabilidad intra-lote que el producto MOD13Q1 podría brindar para este índice dada su resolución espacial.

	Soja	Maíz	Doble Cultivo
Marcos Juárez	211	208	124
Unión	164	180	114
Área de Estudio	375	388	238

Tabla 1. Cantidad de lotes por cobertura

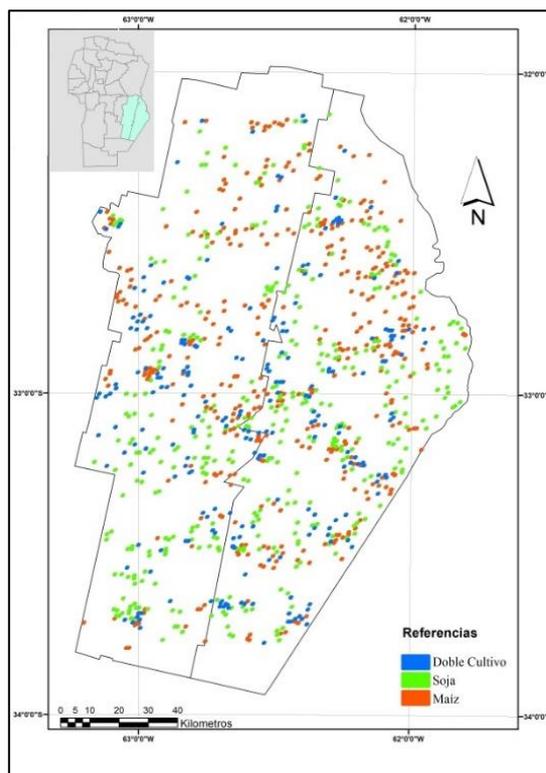


Figura 3. Distribución espacial de los lotes seleccionados (Fuente: elaboración propia)

3.2. Extracción e integración de datos

La extracción de datos de interés se realizó a través de la confección y ejecución de scripts en la plataforma Google Earth Engine (GEE) a los cuales se les incorporó la capa correspondiente de puntos de extracción (centroides de lote). A través de esta operatoria se obtuvieron los siguientes productos para cada lote de las 3 categorías en análisis:

- NDVI mensual promedio (producto MOD13Q1 - MODIS), llevados a escala mensual a través del cálculo del promedio aritmético de los valores correspondientes.
- PPTs mensuales (producto CHIRPS), valores llevados a escala mensual a través del cálculo de la sumatoria de los valores pentádicos correspondientes.

Se realizó la integración, a nivel lote, de los valores mensuales de estimación de ETR basada en imágenes del sensor VIIRS-Suomi NPP. Primeramente, utilizando la aplicación QGIS, se compusieron cada una de las 12 imágenes mensuales de estimación de ETR como el promedio de los correspondientes rásters decádicos provistos. En base a cada una de ellas, posteriormente se realizó para cada lote de cada cobertura, la integración del promedio de valores ETR de los píxeles contenidos en ese lote.

3.3. Procesamiento de datos extraídos/integrados

Los datos extraídos/integrados fueron posteriormente exportados en formato de planilla de cálculo para su procesamiento mediante las aplicaciones MS Excel e InfoStat de forma de obtener diferentes resultados:

3.3.1. Descripción feno-espectral

Para cada cobertura se calculó el valor promedio de NDVI mensual (incluyendo todos sus lotes), para obtener la firma fenológica de los promedios por cobertura.

Además se calcularon, para cada cobertura, sus siguientes atributos funcionales:

- **NDVI-I** (NDVI integral)

Para cada lote se consideró al valor promedio mensual de NDVI de toda la campaña como integral anual de NDVI, estimador de su ganancia de carbono o producción primaria neta (Paruelo 2008, Baldassini et al., 2024). Este índice, NDVI medio o integral, presenta una importante relación con la productividad primaria neta área, dada su fuerte vinculación con la fracción de radiación fotosintéticamente activa interceptada por los tejidos verdes (Paruelo 2008, Huete et al., 2002). Para el caso de doble cultivo, se calcularon dos valores de NDVI-I: para el cultivo de invierno calculado como el promedio de valores mensuales de NDVI considerando los meses de junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre; para el cultivo de verano, considerando el NDVI promedio de los restantes meses de la campaña. Los valores de NDVI-I calculados para cada lote se categorizaron para cada cobertura en “Bajo”, “Medio” y “Alto”. La categoría “Medio” incluyó los valores comprendidos entre la media de la muestra de la cobertura correspondiente menos/más un desvío estándar. La categoría “Bajo” incluyó los valores inferiores a la media menos un desvío estándar mientras que la categoría “Alto”, los superiores a la media más un desvío estándar. A partir del promedio de los valores obtenidos a nivel lote, se calcularon los correspondientes promedios de NDVI-I por cobertura.

- **Máximo NDVI**

Para cada lote se obtuvo el valor máximo NDVI, calculándose además el valor promedio de los máximos en cada cobertura.

- **Mes de Máximo NDVI**

Se obtuvo el mes de máximo NDVI promedio para cada cobertura.

3.3.2. Cálculo del balance de agua

3.3.2.1. Evapotranspiración real

Para toda la campaña se calcularon los valores mensuales promedio (mm) y desvíos estándar de ETR del conjunto de lotes en cada categoría. Además, para cada cobertura se obtuvieron los valores de ETR en milímetros promedio por lote para la campaña completa. Desde el punto de vista espacial, estos datos se calcularon para el AE completa así como para cada uno de los departamentos que la componen. Estos valores se obtuvieron a partir de las estimaciones basadas en imágenes VIIRS-Suomi NPP (Di Bella et al., 2019).

Para los valores de ETR promedio mensuales y totales de campaña como variables dependientes, se han realizado sendos ANOVAs en función de las variables de clasificación por tipo de cultivo, ambos con un nivel de significación de 0,05.

Además, se ha calculado para cada tipo de cobertura la evaporación total por campaña así como el porcentaje de ETR mensual de cada cultivo respecto de su total evapotranspirado.

3.3.2.2. Precipitaciones

A través de la programación de un script en GEE se realizó la exportación de datos de PPTs mensuales registradas para la campaña en análisis (jun-2018/may-2019). La exportación se realizó en dos formatos diferentes: valores separados por comas (posteriormente procesados en una planilla de cálculo Excel) y formato ráster (12 bandas, 1 por cada mes). Este ráster fue procesado para generar un ráster monobanda con los valores de la precipitación acumulada para la campaña completa.

Por otro lado, se analizó la relación entre los datos provenientes de la estación meteorológica de Marcos Juárez (INTA) y las PPTs pluviométricas registradas. Se compararon estos valores mensuales registrados por la estación y los valores correspondientes al producto CHIRPS para la ubicación exacta de la estación meteorológica (lat:-32,712°; long:-62,105°). La comparación se realizó a través de una regresión. Dado que se está validando, de alguna manera, el ajuste del producto de PPTs CHIRPS, ésta fue la variable elegida como predicha, de forma de permitir un mejor ajuste (Piñeiro et al., 2008).

3.3.2.3. Estimación del balance hídrico

Se calcularon 3 balances hídricos seriados; uno considerando todos los lotes de cada cobertura (AE completa), y dos balances más, uno para cada uno de los departamentos del AE.

Para realizar el cálculo del balance correspondiente, se consideraron los datos de ETR (Npp), PPTs CHIRPS y la capacidad de retención de agua útil del suelo, dato provisto por la estación meteorológica de Marcos Juárez.

Para cada lote de cada una de las categorías de cultivo en cada uno de los meses de la campaña, se calculó un “balance” como la diferencia entre las PPTs y la ETR. Este cálculo puede resultar:

- Positivo: las lluvias excedieron lo evapotranspirado por la cobertura, por lo que ese excedente podría recargar el perfil o percolar;
- Negativo: lo efectivamente evapotranspirado por la cobertura excedió el volumen llovido, por lo que ese déficit debe haber provenido del suelo o la napa.

Se consideró para toda el área de estudio, como almacenaje inicial al valor de capacidad de agua disponible (útil) en la estación meteorológica del

área, debido a las limitaciones ya señaladas. Este valor, de 172 mm (Di Bella et al., 2019), hasta 1 m de profundidad, pudo generalizarse para toda el área de estudio dado que en la misma la distribución espacial de lotes para las 3 coberturas estudiadas resulta muy homogénea, de forma que el análisis realizado puede considerarse, desde un punto de vista relativo, como aceptable.

Para cada lote de cada categoría se calculó entonces un balance mensual seriado, considerando esa resolución temporal para este cálculo en vistas de la naturaleza de promedio mensual decádico de las estimaciones de ETR de VIIRS. Dichos balances mensuales seriados se obtuvieron de la siguiente forma:

- En el mes de junio de 2018 se parte de un almacenaje inicial (contenido útil de agua) de 172 mm (máximo), acorde con el dato de “Porcentaje de Agua en el Suelo” (SEPA, 2023) al 31/05/2018. El mismo se correspondió, para esa fecha, con valores de carga en la categoría máxima para, prácticamente, la totalidad del AE.
- El almacenaje final de cada mes se calcula como su almacenaje inicial más el “balance” registrado en ese mes (de acuerdo a lo descrito en el párrafo anterior). Aclaración: si este cálculo arroja un valor mayor a 172, el resultado será 172 mm (no puede excederse la capacidad máxima de contenido de agua útil, por lo que se considera que el excedente respecto de este valor no puede retenerse y percola).

Como almacenaje inicial para los meses subsiguientes se considera el almacenaje final del mes anterior.

- **Balances hídricos al inicio del período crítico y al final de la campaña**

Para cada lote de cada cobertura se obtuvieron los valores del contenido de agua útil tanto al inicio de su mes crítico (valores de NDVI máximo) como al final de campaña. Los valores de estos balances hídricos para estos dos momentos de análisis diferentes fueron cartografiados para valorar su distribución espacial. En ambos casos, para cada muestra (cobertura) se utilizó una categorización basada en diferentes porcentajes alcanzados por el correspondiente balance respecto de su carga máxima de agua útil, considerando los siguientes porcentajes de corte: 90%- 70%- 50%- 30% y 10%.

3.4. Relación entre balances hídricos previos al mes de NDVI Máximo y valores de NDVI-I

Para cada lote de cada cobertura, se realizó una comparación de su NDVI-I o NDVI medio, respecto del contenido de agua útil acumulado en el perfil al inicio de su período crítico (NDVI Máximo). Estos datos pudieron analizarse tanto comparativamente respecto de las magnitudes para cada cobertura como en cuanto a su distribución espacial de los diferentes niveles de corte de carga de perfiles intra-cobertura.

Para cada cultivo se crearon capas independientes de Bajo, Medio y Alto NDVI medio, para combinarlas espacialmente con su correspondiente capa de balance hídrico al inicio del período crítico, en busca de relaciones que pudieran resultar de interés.

4. Resultados y Discusión

4.1. Descripción feno-espectral

- Fenología

Para cada una de las coberturas en análisis aproximadamente el 70% de sus lotes presentó valores de NDVI mensuales con poca variabilidad, comprendidos en un rango de sus medias más/menos el doble de sus desvíos estándar (SD), aproximándose a una distribución normal.

La evolución temporal del NDVI promedio mensual a lo largo de la campaña, permite identificar aquellos meses en los que las diferentes coberturas resultan más fácilmente distinguibles entre sí. Los cultivos de verano se diferenciaron con mayor claridad en los meses de diciembre y marzo, a pesar de la gran dispersión de valores en cada muestra (**Figura 4**). En enero, debido a valores de NDVI promedio similares, sumado a una importante variabilidad en cada muestra, la fenología no permitió diferenciar un cultivo de otro. Para el mes de febrero pudo diferenciarse con claridad el cultivo de maíz, resultando el comportamiento de ambas coberturas de soja no distinguible entre sí. En cuanto a los cultivos de invierno, a pesar de la gran variabilidad que presentó su curva fenológica, no había otra cobertura vegetal activa con la que pudieran confundirse.

Los cultivos de soja (tanto en cultivo único como en cultivo de segunda para el doble cultivo), presentaron la menor variabilidad en el mes de NDVI máximo (febrero), alcanzando ambas coberturas este pico de actividad fotosintética de manera casi simultánea. Sin embargo la fenología promedio para los cultivos únicos de soja sugiere una siembra anticipada (noviembre) en comparación con lo presentado en el caso del doble cultivo (diciembre), seguramente atribuible a la disponibilidad de los lotes en fechas más tempranas. Por otro lado, ambas coberturas de soja alcanzaron su máxima actividad fotosintética casi simultáneamente (02/2019), lo que indicaría el uso de variedades de ciclo más corto en el caso de la soja de segunda.

La fenología promedio de la cobertura de maíz presentó una marcada variabilidad a partir de la emergencia (octubre/noviembre 2018), igualmente atribuible a la heterogeneidad espacial de la muestra que obligadamente incluyó diferencias de manejo y variedades. Este cultivo pudo sembrarse más tarde (maíz tardío o de 2da) con ciclo más corto para optimizar el uso del agua, dado el régimen estacional (verano) de lluvias característico del AE.

Los cultivos de invierno presentaron gran dispersión de sus medias mensuales de NDVI, principalmente en octubre del 2018, coincidente con la abrupta caída del NDVI promedio. Dicha variabilidad podría atribuirse a diferencias de manejo, distintos momentos de siembra y de variedades sembradas con diferente duración de ciclos.

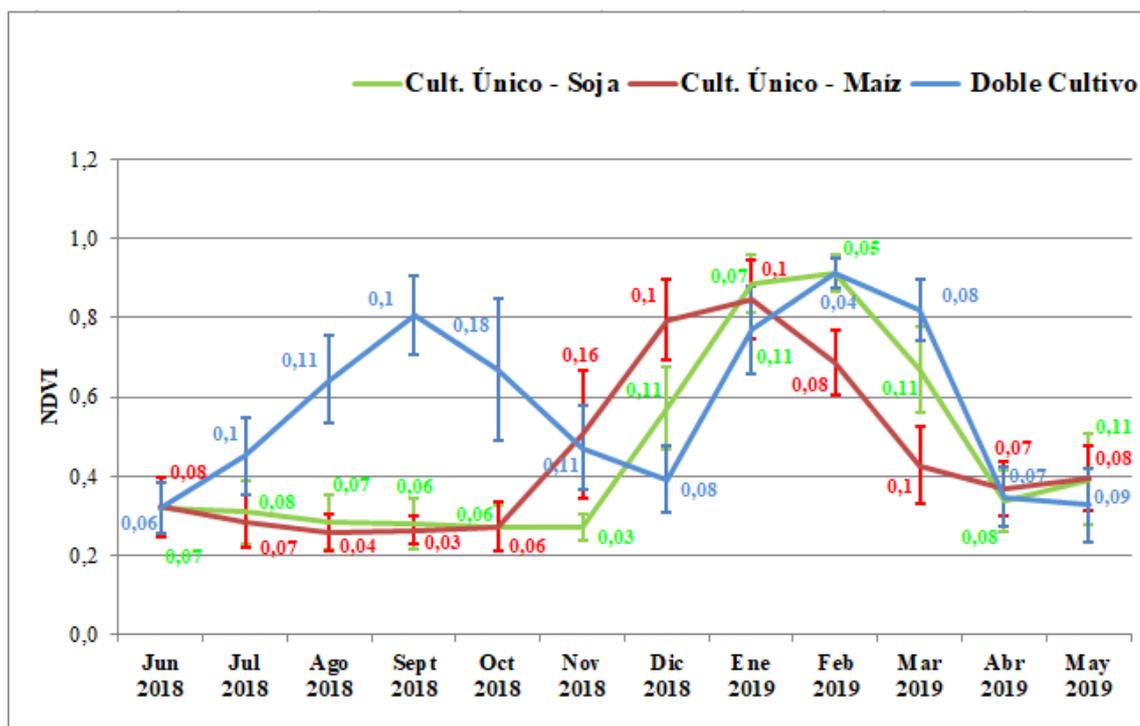


Figura 4. Evolución mensual del NDVI promedio por cobertura – Las barras representan 1 Desvío Estándar

- Atributos funcionales del NDVI

Los lotes en producción durante toda la campaña (doble cultivo) presentaron un valor de NDVI-I promedio un 20,7% superior respecto de los cultivos únicos de verano (**Tabla 2**), motivado por la presencia distintiva de cultivos “activos” durante los meses de invierno. Estos valores se correspondieron, para cada una de las tres coberturas, con los presentados por Nosetto et al. (2015) para los cultivos únicos de verano y los doble cultivos. Sin embargo, Baldassini et al. (2024) encontraron valores menores de promedios anuales de NDVI, para soja, maíz y doble cultivo, inferiores en 28%, 17% y 7% respectivamente. Estas diferencias podrían estar fundadas en que ambos trabajos analizaron campañas únicas, diferentes entre sí, por lo que sus respectivas condiciones climáticas particulares pudieron haber influido en los correspondientes resultados.

En cuanto a la categorización de valores de NDVI-I descrita en el apartado de Metodología, la mayoría de lotes que integraron las muestras en cada cobertura han presentado valores en la categoría “Medio” (**Figura 5**). Para el AE completa estos valores medios correspondieron al 74,4%, 66,1%, 70,6%, 71% y 76,1% de los lotes para las coberturas de soja, maíz, doble cultivo, cultivo de invierno y soja de segunda respectivamente. Para las tres coberturas básicas analizadas se asociaron valores de NDVI-I mayoritariamente superiores para el departamento de Marcos Juárez respecto del de Unión. Las mayores diferencias en este sentido se presentaron para las coberturas de maíz y para el doble cultivo (campaña completa). Para éste último, Marcos Juárez aportó el 66% de los lotes en la categoría “Alto” y sólo el 24% de los lotes en la categoría “Bajo”; el mayor peso en estas diferencias residió en los dispares niveles de

NDVI-I presentados por los cultivos de invierno de ambos departamentos. Los valores “Altos” para el cultivo de maíz se presentaron prevalentemente en el departamento de Marcos Juárez, mostrando una distribución espacial homogénea en el mismo (resultados no mostrados). Esto pudo deberse al tipo de suelo asociado a cada uno de los departamentos (**Figura 2A**), sumado al gradiente de PPTs, crecientes de Oeste a Este (**Figura 10**).

Los mayores valores de NDVI máximo se presentaron para la soja, como cultivo único y de segunda, mientras que el cultivo de maíz y el cultivo de invierno presentaron niveles menores (**Tabla 2**). Respecto del cultivo de maíz, este valor es concordante con lo presentado por Garelo (2023) para el AE en esta campaña específica. En términos generales, el maíz debería generar mayor índice de área foliar (IAF) que la soja, mayor biomasa, por lo que se esperaría entonces un NDVI máximo en maíz mayor que en soja. Sin embargo, a lo largo de esta única campaña analizada, probablemente estos cultivos hayan explorado ambientes diferentes. Particularmente, la soja pudo haber resultado más beneficiada que el maíz respecto a la acumulación de biomasa, con mayor temperatura y radiación. Éstas son variables importantes cuyo análisis excede el alcance de este trabajo. Por otro lado, el hecho de considerar una cobertura “promedio” de maíz a partir del Mapa Nacional de Cultivos 2018-2019 (De Abelleira et al., 2019), sin diferenciación entre maíces tempranos y tardíos, podría estar limitando las conclusiones.

	Soja	Maíz	Cult. Inv + Soja (camp. completa)	Cult. Inv	Soja de segunda
NDVI-I	0,46	0,46	0,58	0,56	0,59
MAX_NDVI	0,92	0,85	0,92	0,8	0,92
Mes MAX_NDVI	febrero	enero	sept/feb	sept	feb

Tabla 2. Atributos funcionales del NDVI

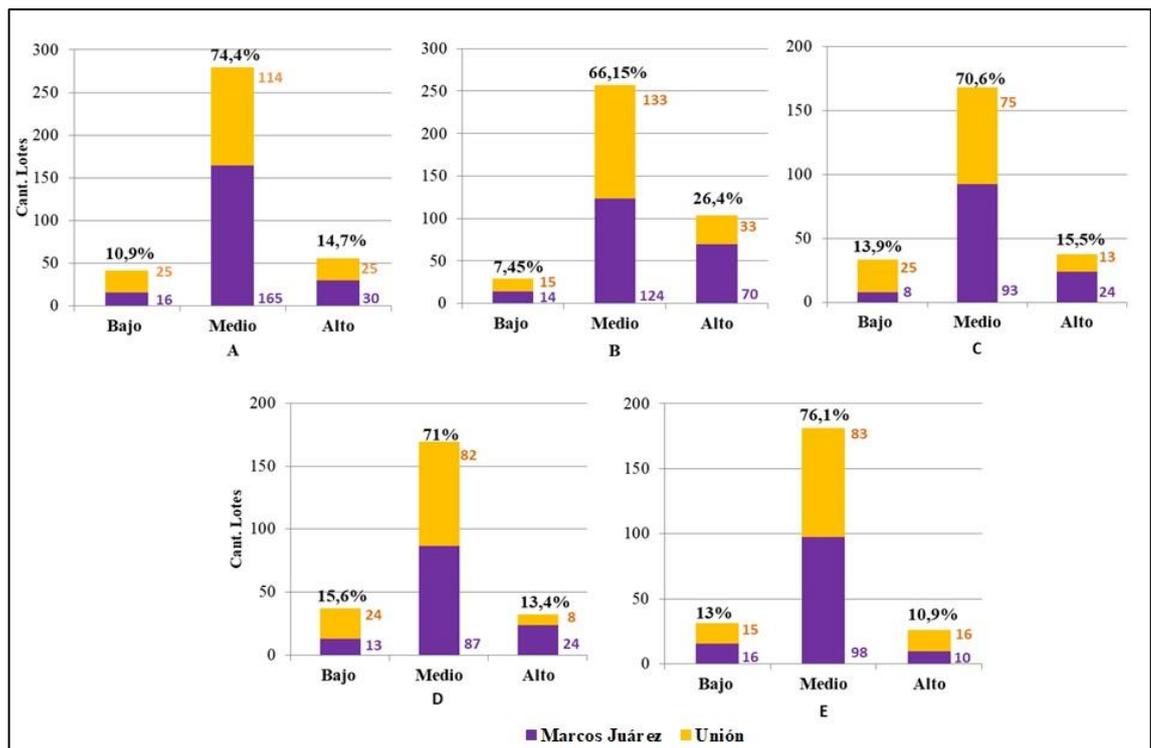


Figura 5. Categorización del NDVI-I – Histograma de frecuencias para el área de estudio, discriminado por departamento. A. Soja – B. Maíz – C. Doble cultivo – D. Cultivo de invierno – E. Soja de 2da

4.2. Balance de agua

- Estimación de variables

Al considerar la campaña completa para el AE, los valores resultantes muestran que en promedio un lote dedicado al doble cultivo evapotranspiró un 10,21% más que el cultivo único de soja y un 13,4% más que el cultivo único de maíz (**Tabla 3**). Al comparar los cultivos únicos entre sí, el volumen evapotranspirado por la soja resultó un 3% superior a los valores presentados por el maíz. Similar comportamiento se verifica al considerar los consumos totales promedio para los dos departamentos del AE en forma independiente. Para Marcos Juárez, se presentaron valores superiores en un 10,4% y un 13% para el doble cultivo respecto de la soja y el maíz como cultivos únicos, respectivamente. También en el departamento de Unión el doble cultivo presentó los mayores valores de consumo total promedio: 9,84% más que el cultivo único de soja y 13,85% más que el de maíz. El cultivo único de soja presentó consumos de un 2,26% más que el cultivo único de maíz en Marcos Juárez mientras que para Unión esta diferencia fue del 3,65%. Los menores niveles de evapotranspiración alcanzados por el maíz respecto de la soja, tanto en el AE completa como en cada uno de los departamentos, son concordantes con la relación entre los respectivos valores de NDVI máximo alcanzados por estas coberturas, y potencialmente podrían obedecer a las causas ya descriptas.

Los resultados de ETR anual obtenidos (**Tabla 3**) se encuentran dentro de los rangos descriptos por Nosetto et al. (2015), a excepción del cultivo de maíz que presenta valores apenas un 1% inferiores al mínimo señalado por el citado trabajo para los cultivos únicos de verano. Tal como lo plantean Baldassini et al. (2024), la evapotranspiración registrada para el doble cultivo resultó superior a la presentada en sistemas de único cultivo anual. Sin embargo, los niveles de ETR presentados en dicho trabajo resultaron superiores, un 36%, 46% y 52% para soja, maíz y doble cultivo respectivamente. Esto podría atribuirse al método distintivo de balance radiativo utilizado por Baldassini et al. (2024) para el cálculo de esta variable, sumado al hecho de tratarse de resultados provenientes del análisis de una única campaña, al igual que el presente trabajo, circunstancia que limita las conclusiones y las comparaciones entre los resultados de ambos, tal como ya se ha mencionado.

	Soja	Maíz	Doble Cultivo
Marcos Juárez	741,62	725,24	819,05
Unión	747,54	721,18	821,11
Área de Estudio	744,07	723,16	820,05

Tabla 3. ETR (mm) promedio acumulada durante la campaña

Un análisis de varianza (ANOVA), considerando la ETR total de campaña para el AE como variable dependiente, permitió verificar que la categorización de las tres coberturas a partir de esta variable resulta estadísticamente significativa (**Tabla 4**).

Categoría	Media	n	E.E
Maíz	723,16 a	388	2,11
Soja	744,21 b	375	2,15
Doble Soja	820,04 c	238	2,70

Tabla 4. Medias, tamaños de muestra (n) y errores estándar (E.E) de ETR (mm) total campaña. - Letras distintas corresponden a diferencias significativas ($p < 0,05$)

Al realizar un análisis de la evolución mensual de la variable ETR para el AE, resulta evidente que el consumo de agua estuvo asociado a la fenología (**Figuras 4 y 6**). La soja en cultivo único alcanzó más tempranamente valores mayores de ETR que la soja en lotes en los que se habían realizado cultivos de invierno. A su vez, ambas coberturas de soja alcanzaron sus máximos niveles de consumo simultáneamente. La evolución concordante de la fenología y la ETR para las tres coberturas, debe atribuirse al hecho de que el modelo utilizado para la estimación de ETR Npp se basa en el NDVI y la temperatura de superficie (Di Bella et al., 2019), por lo que tal concordancia era esperable.

Respecto de la dispersión de los valores de ETR que componen los promedios mensuales para las tres coberturas, se verifica que la mayor variabilidad espacial se presentó al inicio de la campaña, evidenciado por los mayores coeficientes de variación (CV) asociados (resultados no mostrados). Posiblemente esto esté motivado por las

diferentes condiciones en las que se encontraban los lotes que componen cada una de las muestras: en barbecho, recién sembrados, implantados, con mayor o menor nivel de crecimiento, etc. Por el contrario, la menor dispersión asociada a menores valores de CV (resultados no mostrados), se registró para las coberturas de verano en sus meses de NDVI máximo, cuando prácticamente la totalidad de la ETR se explica por el componente de transpiración de la cobertura vegetal en su máximo nivel de actividad fotosintética.

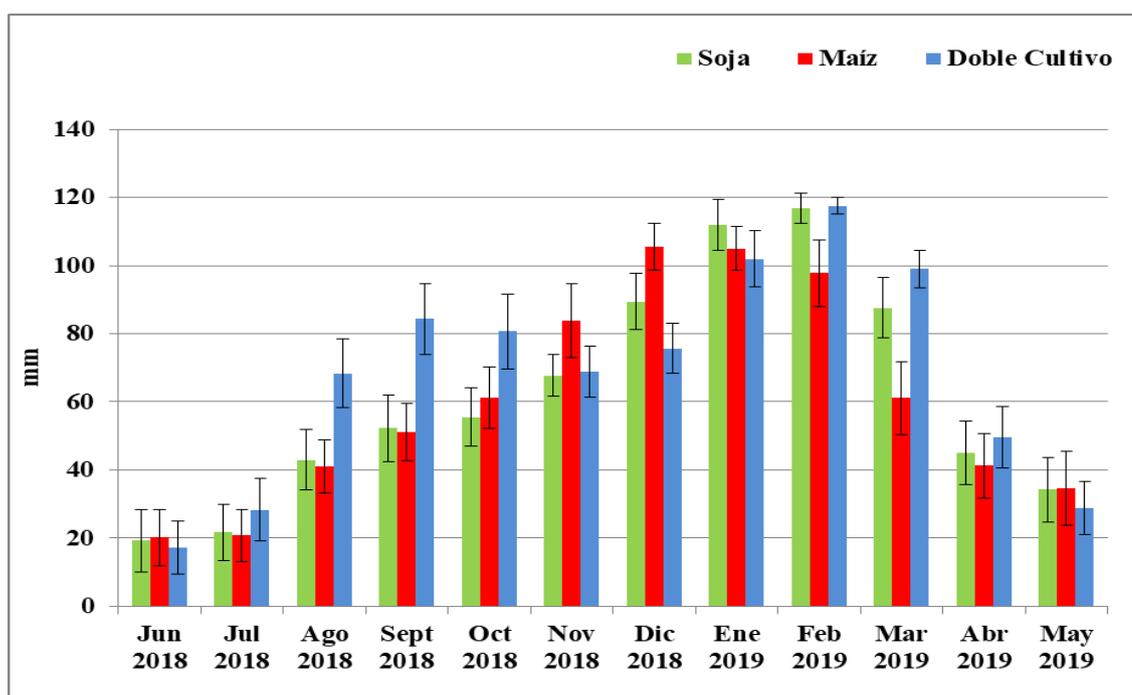


Figura 6. Evapotranspiración real (VIIRS Suomi Npp) mensual promedio y Desvíos Estándar (mm) para el área de estudio

La realización de un ANOVA, tomando como variable dependiente al promedio de las medias mensuales de ETR en cada cobertura del AE, permitió validar que la variable analizada posibilita estadísticamente distinguir que los casos provienen de poblaciones diferentes (**Tabla 5**).

Categoría	Media	n	E.E
Maíz	60,26 a	388	0,18
Soja	62,02 b	375	0,18
Doble Soja	68,34 c	238	0,22

Tabla 5. Medias, tamaños de muestra (n) y errores estándar (E.E) de ETR (mm) Promedio Mensual. - Letras distintas corresponden a diferencias significativas ($p < 0,05$)

En relación a los porcentajes mensuales de milímetros evapotranspirados por cada cobertura respecto a su total de campaña, para los tres cultivos del AE se verifica que el componente de transpiración, dominante en los meses de mayor desarrollo fenológico y cobertura total del suelo, superó ampliamente los niveles alcanzados de

evaporación dominantes en las etapas de pre-siembra, emergencia y post cosecha, (Figura 7). En el caso de la soja, tanto como cultivo único como en doble cultivo, si bien ambas coberturas presentaron niveles de ETR similares para el mes de mayor actividad, desde el punto de vista porcentual respecto de su ETR total, lógicamente este porcentaje es menor para la soja de segunda debido a que otro porcentaje importante de su ETR total se presentó en los meses activos para los cultivos de invierno.

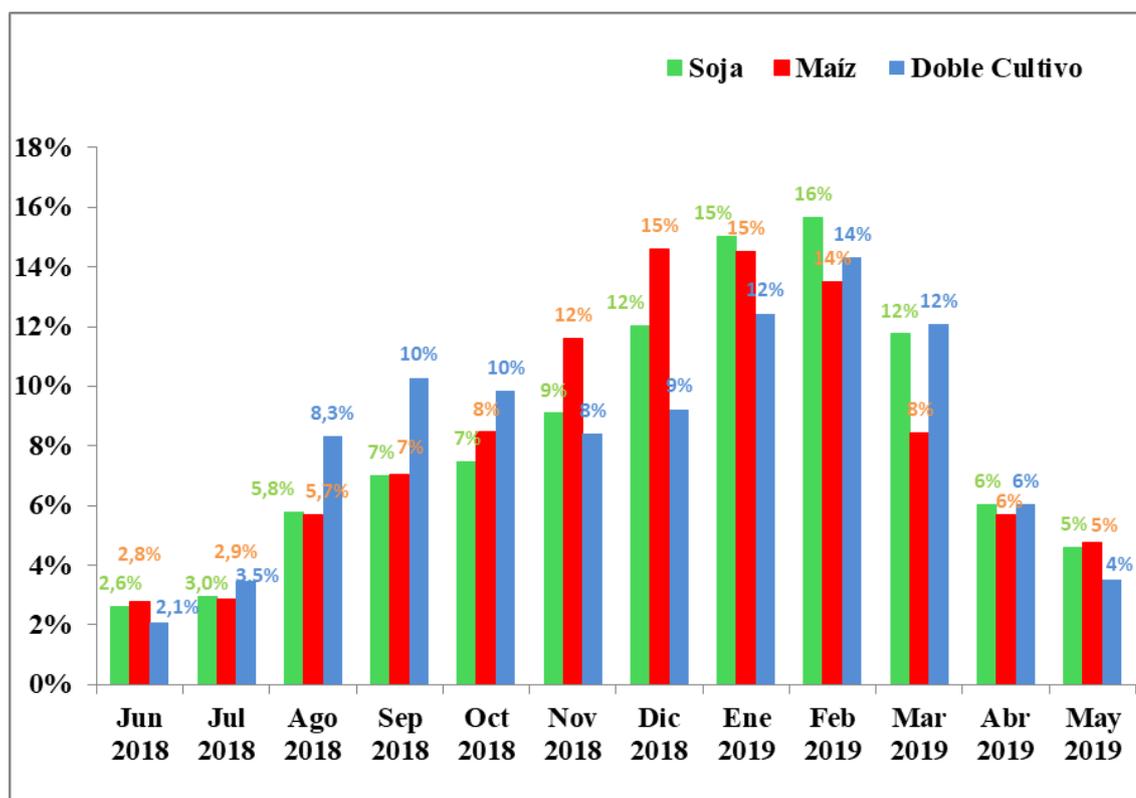


Figura 7. Porcentaje mensual de la Evapotranspiración real de toda la campaña para cada cobertura para el área de estudio

El análisis de la evolución mensual de los promedios de ETR diferenciados por departamento permitió identificar consumos más elevados para Marcos Juárez respecto de Unión a partir de la emergencia para los doble cultivos (cultivo de invierno y soja de segunda) y el cultivo único de soja, hasta alcanzar consumos similares a los de Unión en el momento de sus máximos, septiembre y febrero respectivamente (Figuras 8 y 9). A partir de ello, los consumos de Marcos Juárez cayeron más abruptamente. En el caso del cultivo de maíz, se presentó la situación inversa; a partir de la emergencia los consumos de Unión fueron más elevados hasta los meses de consumos máximos (diciembre – enero), cuando se presentaron consumos similares. A partir de ello, los niveles de consumo promedio en Unión cayeron más abruptamente que en Marcos Juárez.

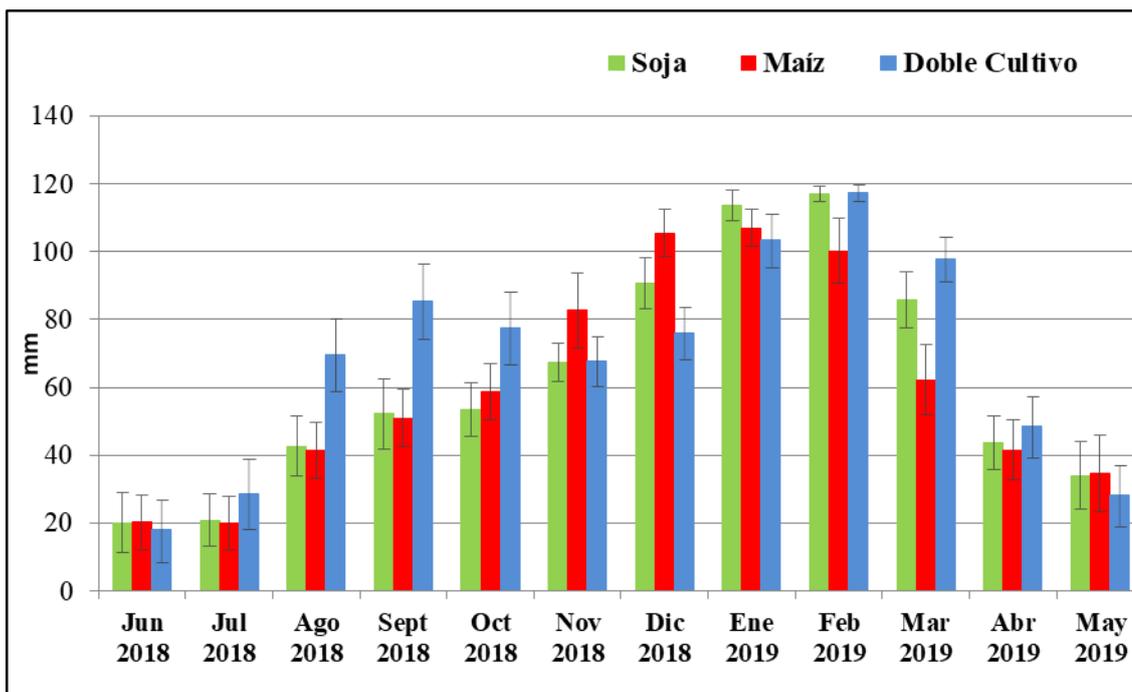


Figura 8. Evapotranspiración real (VIIRS Suomi Npp) mensual promedio y Desvíos Estándar (mm) para Marcos Juárez

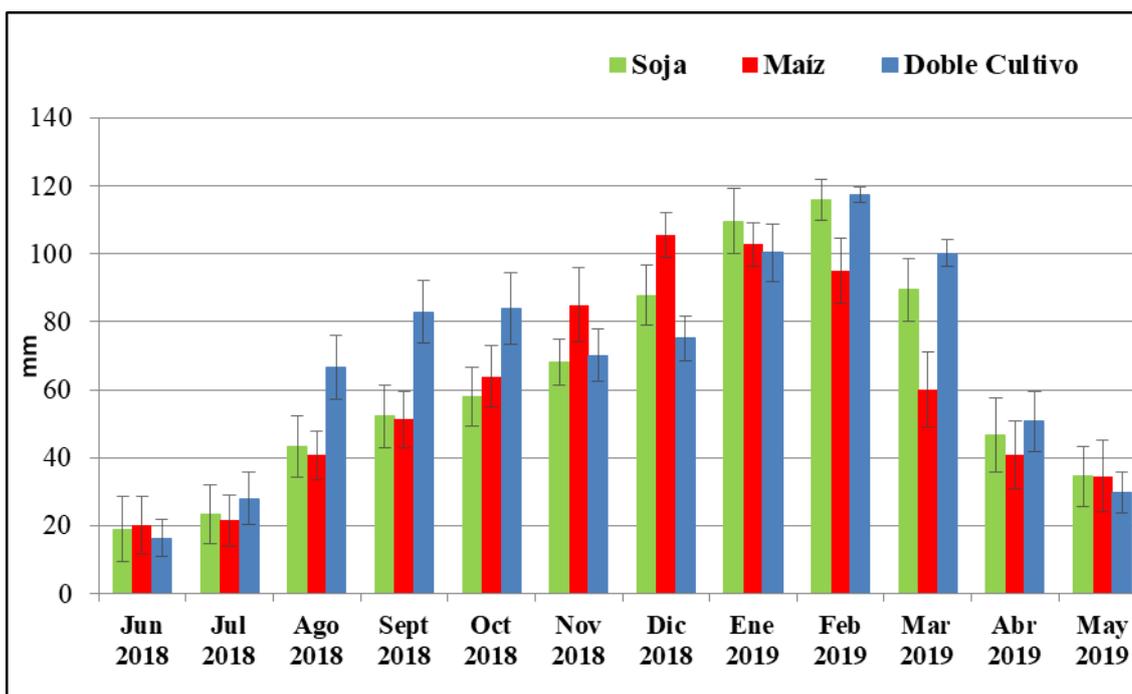


Figura 9. Evapotranspiración real (VIIRS Suomi Npp) mensual promedio y Desvíos Estándar (mm) para Unión

Las PPTs CHIRPS promedio por lote acumuladas durante toda la campaña, calculadas como la suma de los promedios mensuales de las distintas coberturas, resultaron para el AE completa, 18,44% superiores a la media anual histórica. Al comparar los departamentos incluidos en el AE, este acumulado de valores promedio resulta un 4,4% superior para los lotes de Marcos Juárez respecto de los de Unión

(**Tabla 6**). Por otro lado, el total de PPTs pluviométricas registradas en la campaña por la EEA en su ubicación exacta, resultó de 863,8 mm, un 3% inferior a la media anual histórica mencionada.

La distribución espacial de las PPTs totales permitió validar el comportamiento característico de lluvias para el área, mostrando isohietas que disminuyen de E a O, con valores puntuales entre los 900 a 1200 mm, superiores a la media descripta (**Figura 10**).

	PPTs promedio mm
Marcos Juárez	1075,08
Unión	1030,04
Área de Estudio	1054,61

Tabla 6. Precipitaciones (PPTs) promedio (mm) total campaña

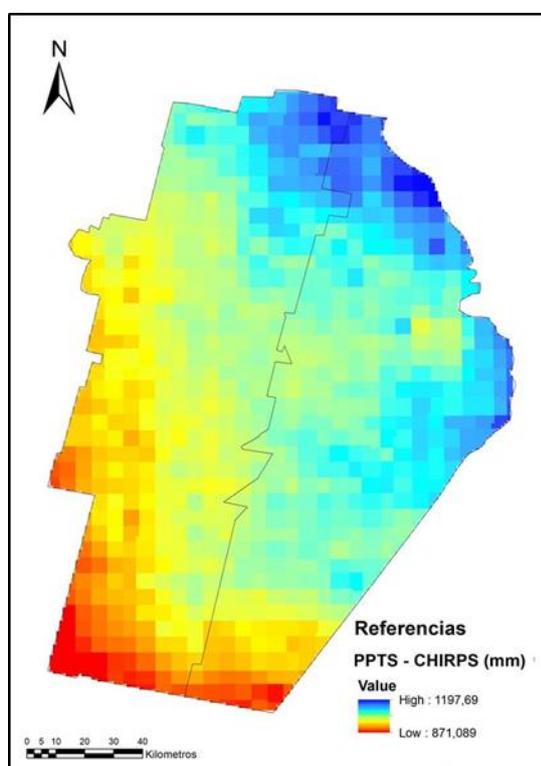


Figura 10. Distribución espacial de precipitaciones estimadas por CHIRPS acumuladas jun-2018/may-2019. (Fuente: elaboración propia)

La evolución mensual de las PPTs promedio en el AE, obedeció a los aspectos enunciados como característicos de la zona: régimen de precipitación monzónico con lluvias principalmente concentradas en el semestre cálido, de octubre a marzo (**Figura 11**). La alta variabilidad de los promedios mensuales registrada en cada cobertura se evidenció por sus altos coeficientes de variación (CV), resultados no mostrados. Esta situación se presentó de manera más marcada para los meses con menores niveles de PPTs: junio, julio, agosto, septiembre, diciembre y febrero, cuando el CV mensual

correspondiente fue superior al CV promedio. Esto se condice con la importante variabilidad espacial que presentó el total acumulado de PPTs de campaña (**Figura 10**).

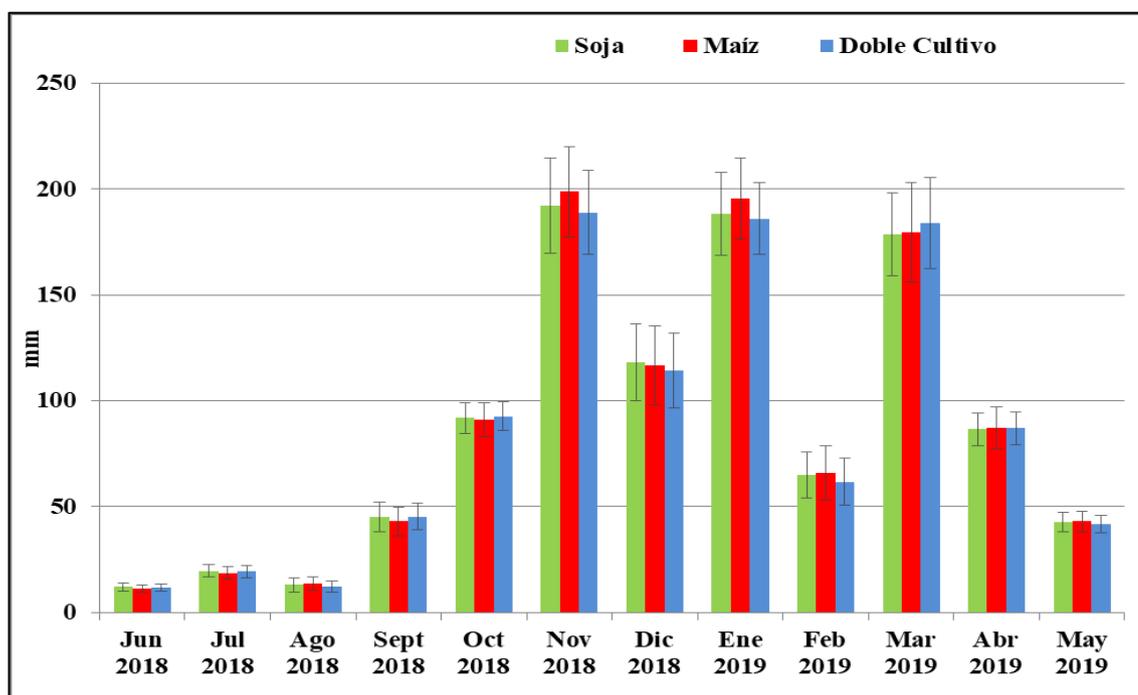


Figura 11. Precipitaciones por cultivo estimadas por CHIRPS - Promedios mensuales y Desvíos Estándar (mm) para el área de estudio

A partir del análisis conjunto de la evolución mensual de la ETR y las PPTs, se verificaron para los cultivos de verano, escasas PPTs en febrero que no abastecieron los consumos en su totalidad, lo que seguramente provocó consumos a partir del contenido de agua del suelo. La misma situación se presentó para los cultivos de invierno hasta superada su fase crítica (**Figuras 12, 13 y 14**).

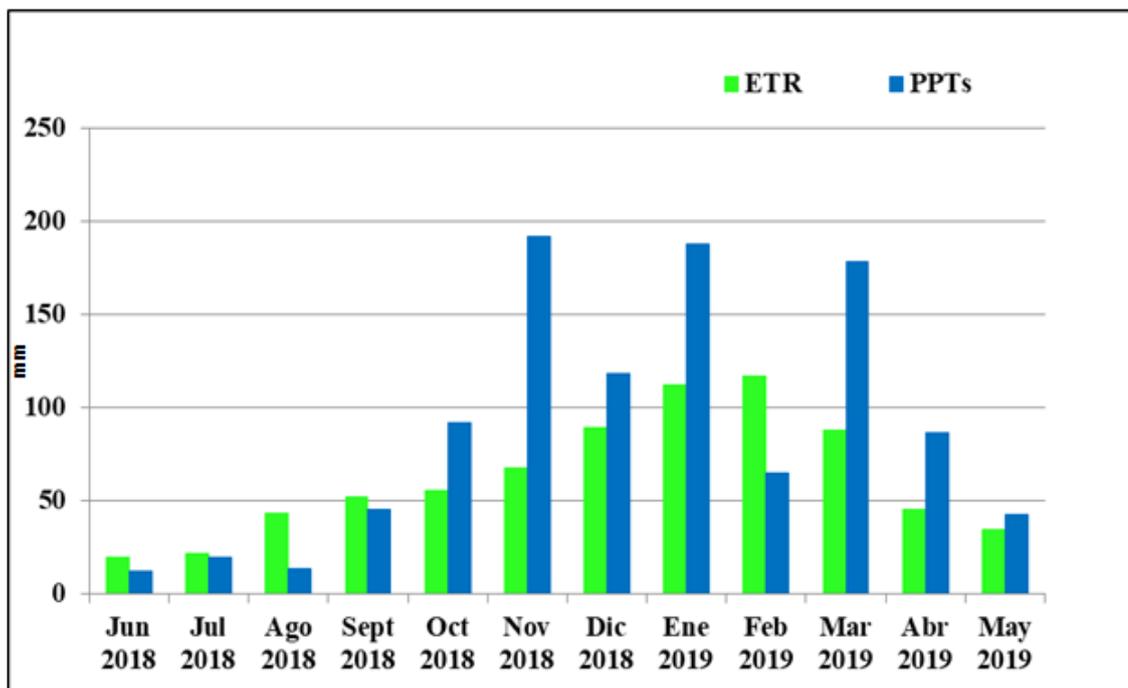


Figura 12. Precipitaciones estimadas por CHIRPS y evapotranspiración real (VIIRS Suomi Npp) para los lotes de soja - Promedios mensuales (mm) para el área de estudio

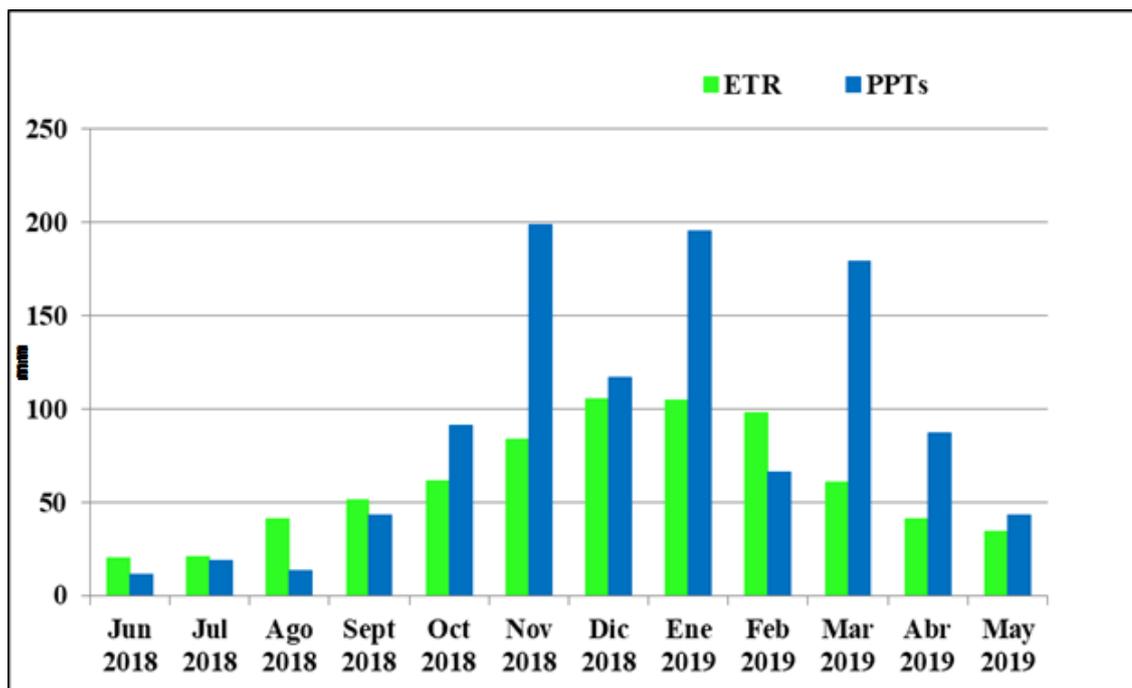


Figura 13. Precipitaciones estimadas por CHIRPS y evapotranspiración real (VIIRS Suomi Npp) para los lotes de maíz - Promedios mensuales (mm) para el área de estudio

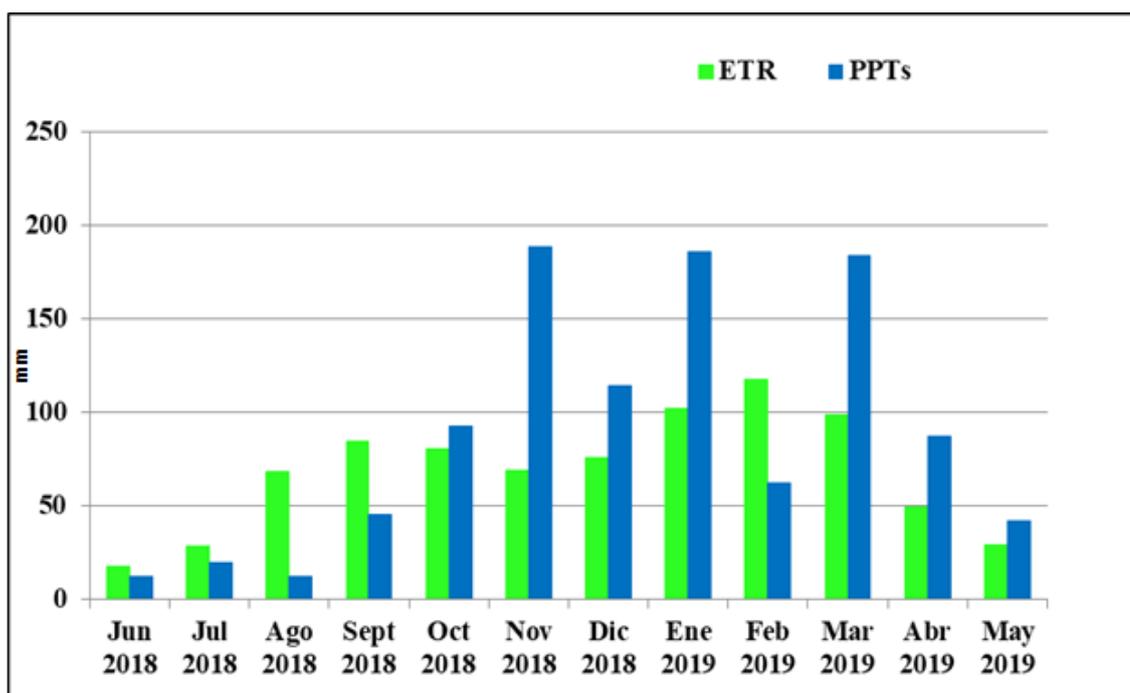


Figura 14. Precipitaciones estimadas por CHIRPS y evapotranspiración real (VIIRS Suomi Npp) para los lotes de doble cultivo - Promedios mensuales (mm) para el área de estudio

Las PPTs promedio mensuales registradas en Marcos Juárez y Unión para las diferentes coberturas mostraron el mismo comportamiento, en concordancia con una distribución espacial homogénea de los lotes de cada muestra. Se presentaron mayoritariamente registros superiores para Marcos Juárez durante la mayor parte de la campaña, hasta marzo, en relación con el comportamiento característico de PPTs del área (**Figuras 15 y 16**).

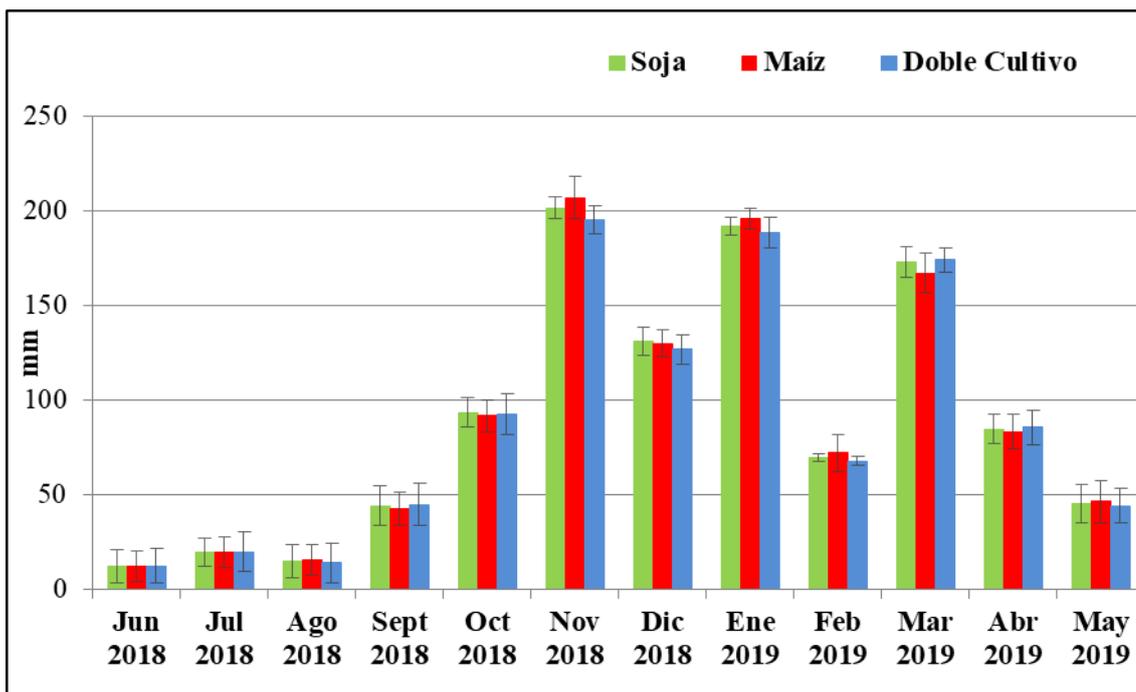


Figura 15. Precipitaciones por cultivo estimadas por CHIRPS - Promedios mensuales y Desvíos Estándar (mm) para Marcos Juárez

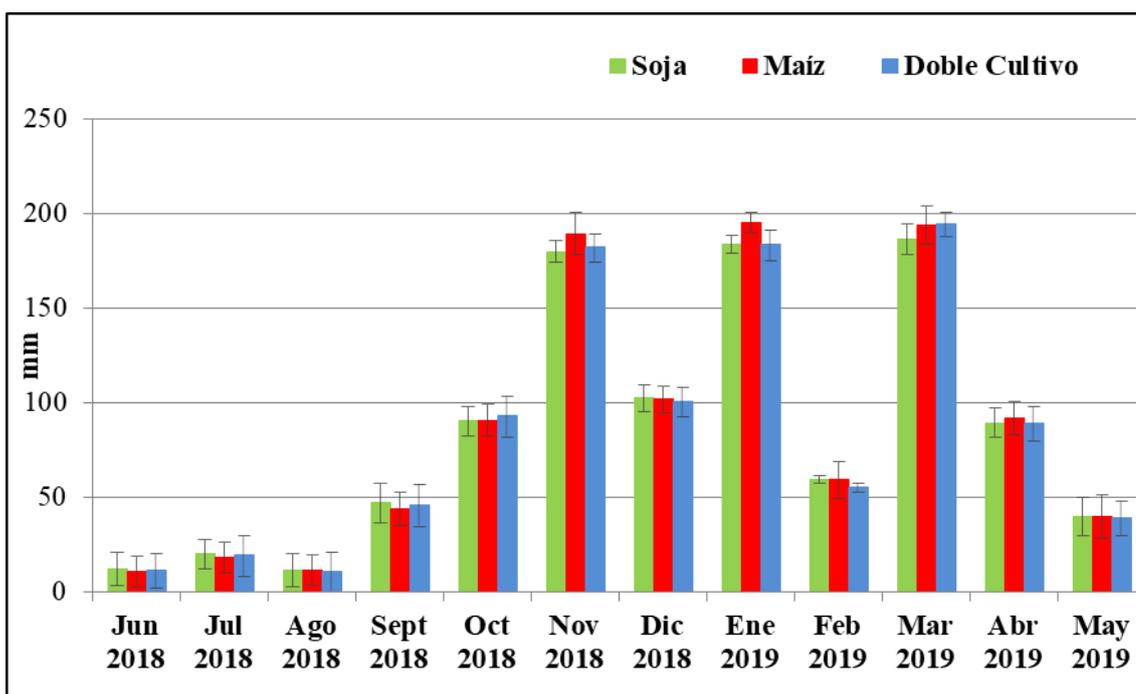


Figura 16. Precipitaciones por cultivo estimadas por CHIRPS - Promedios mensuales y Desvíos Estándar (mm) para Unión

El ajuste entre las PPTs pluviométricas mensuales registradas por la EEA de Marcos Juárez y las correspondientes PPTs CHIRPS para esa ubicación exacta evidencia que, en general, la fuente satelital no se ajustó a las mediciones de la Estación, con una tendencia predominante de sobreestimación, a excepción del mes de mayor

registro, noviembre, donde se observó un mejor ajuste a los datos pluviométricos reales (Figuras 17 y 18).

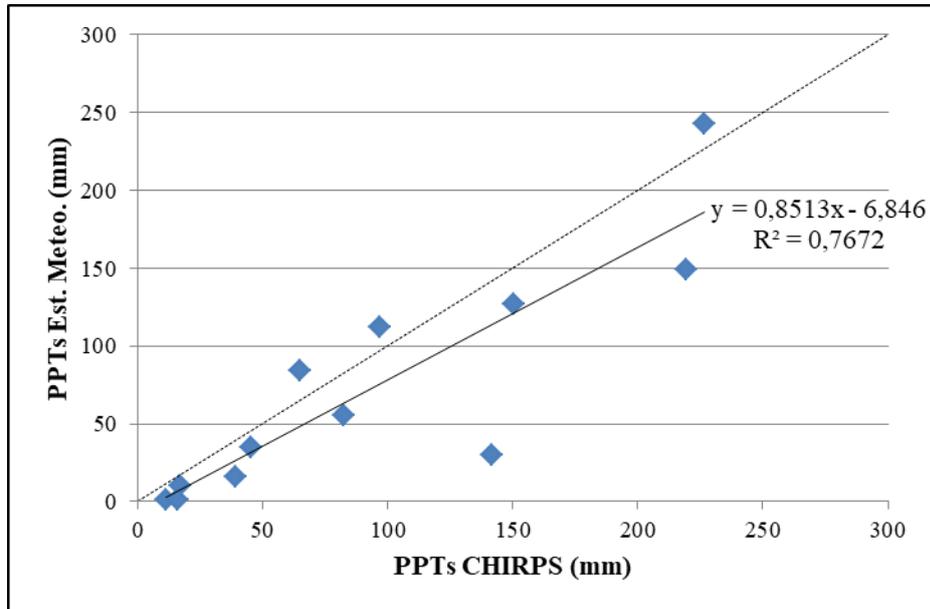


Figura 17. Ajuste de las precipitaciones promedio mensuales: Pluviométricas EEA Marcos Juárez vs. CHIRPS (ubicación exacta)

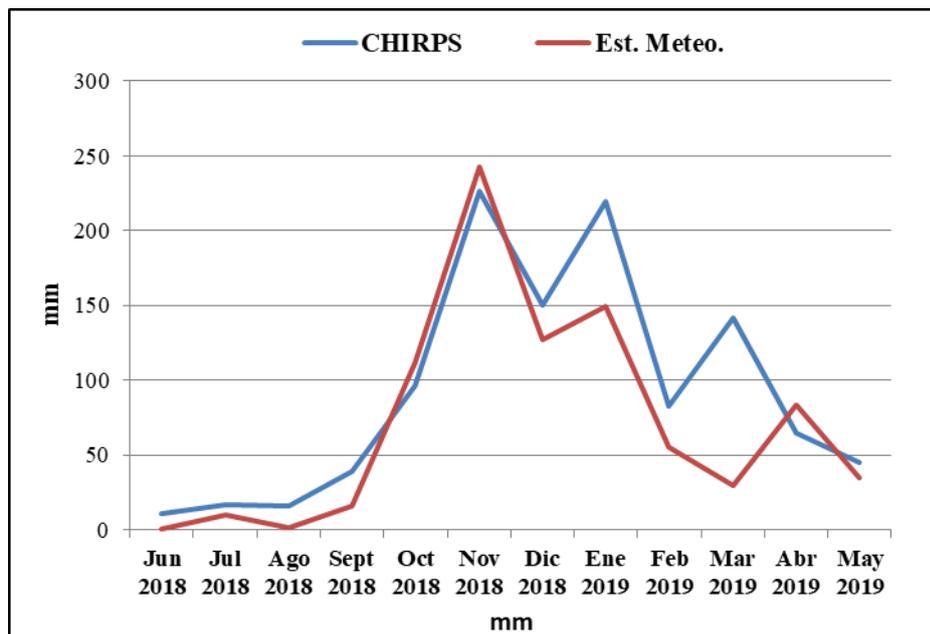


Figura 18. Comparación de las precipitaciones promedio CHIRPS vs. estación meteorológica EEA Marcos Juárez

- **Balance hídrico seriado**

Los valores promedio de los 12 cortes mensuales del balance hídrico seriado para el AE completa, arrojaron altos porcentajes de carga de agua útil en el suelo para las tres coberturas (Tabla 7). Especialmente para los cultivos únicos, que presentaron contenidos de humedad en el suelo de más del 90% respecto de su capacidad máxima.

El doble cultivo presentó, lógicamente, un promedio más bajo, cercano al 82%, debido a los mayores consumos registrados por dos cultivos activos durante la campaña. La variabilidad de estos promedios, evidenciada por los altos valores de los coeficientes de variación, estuvo relacionada tanto con la estacionalidad de las precipitaciones como por la variabilidad de los consumos, asociados a la fenología de las coberturas. Esto explica la dispersión considerablemente mayor en el caso del doble cultivo en comparación con los cultivos únicos. Del análisis independiente de cada uno de los departamentos surge que en términos generales los perfiles de Unión resultaron con valores de carga promedio inferiores a Marcos Juárez, en especial para los lotes de maíz. Esto está probablemente relacionado con las condiciones presentadas en el departamento de Unión de menores PPTs y consumos más “adelantados” de esta cobertura respecto a la ocurrencia de lluvias abundantes.

		Contenido hídrico promedio (mm)	% Carga	SD	CV
Marcos Juárez	Soja	157,56	91,61	19,32	12,26%
	Maíz	159,15	92,53	16,46	10,34%
	Doble Cultivo	141,88	82,49	42,1	29,67%
Unión	Soja	155,37	90,3	21,65	13,93%
	Maíz	155,79	90,57	18,68	11,99%
	Doble Cultivo	141,32	82,16	41,53	29,39%
Área de Estudio	Soja	156,57	91,03	20,3	12,97%
	Maíz	157,59	91,62	17,44	11,07%
	Doble Cultivo	141,62	82,33	41,77	29,5%

Tabla 7. Promedio del contenido hídrico al final de cada mes, a partir del balance hídrico seriado. Porcentaje de carga (% Carga), Desvíos Estándar (SD) y coeficiente de variación (CV)

La evolución mensual del balance hídrico seriado para el AE muestra en varios meses de la campaña contenidos hídricos cercanos a su capacidad de agua útil (**Figura 19**). Esto puede adjudicarse a las abundantes PPTs que se registraron principalmente durante el verano. Los menores volúmenes de agua en el suelo se registraron, de forma consistente, para los meses agosto, septiembre y octubre, donde los valores de ETR superaron a las PPTs, en especial para el doble cultivo que presentó valores más altos de ETR respecto de los cultivos únicos, asociado al componente de transpiración de los cultivos de invierno. Esta cobertura registró el mínimo contenido de agua en el suelo en septiembre, con cargas promedio del orden del 36% de la capacidad de agua útil. Para el caso de los cultivos únicos, los menores valores de reserva registrados en invierno/primavera son atribuibles principalmente a la evaporación en el caso de haber quedado suelo desnudo, dándole a este proceso mayor preponderancia en el balance debido a la escasez de lluvias.

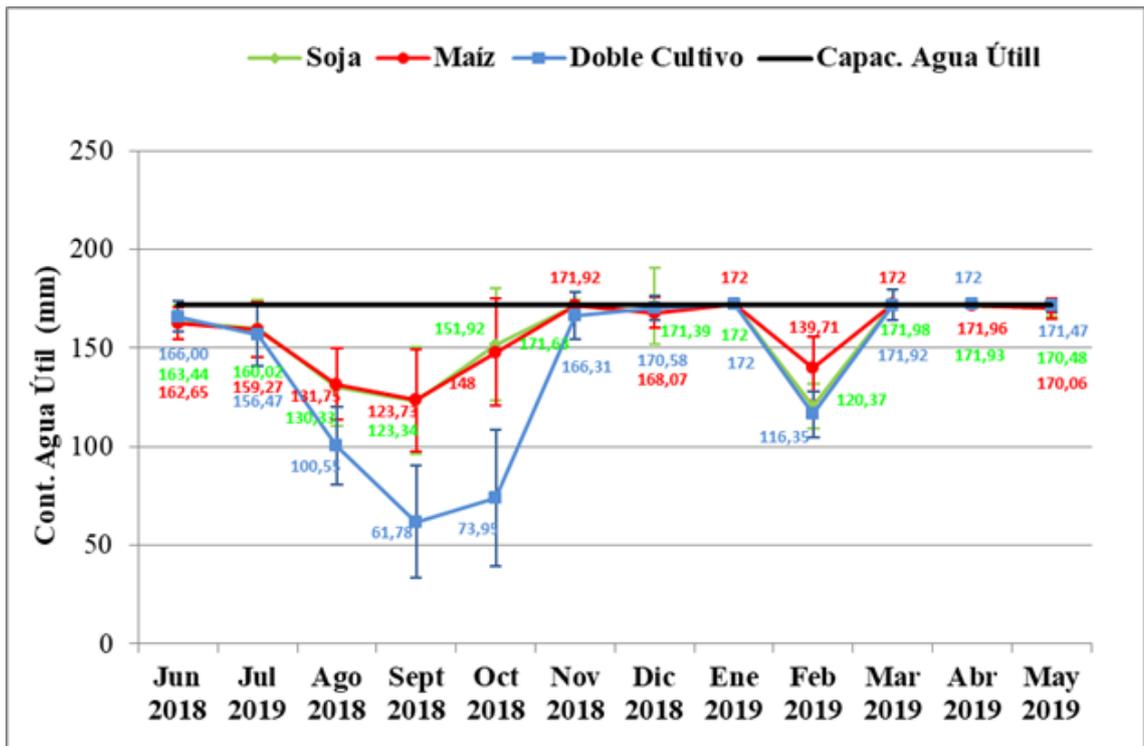


Figura 19. Balance hídrico mensual seriado para el área de estudio

Un análisis comparativo de los balances hídricos seriados por departamento, permite establecer en el caso de los cultivos de verano (únicos y soja de segunda) que, en líneas generales, las cargas de agua útil en los perfiles para Marcos Juárez resultaron superiores (Figuras 20 y 21). Esto se debe principalmente al factor ya mencionado de mayores lluvias para este departamento respecto de Unión, situación que al revertirse en marzo no impactó sobre el balance hídrico seriado dado que ya se habían alcanzado niveles de recarga de agua cercanos a la carga máxima.

Para el cultivo de maíz en Unión, aparece como destacable el menor nivel de reservas hídricas promedio de sus lotes para el mes de diciembre comparado con los de Marcos Juárez. Esto se debió a similares consumos en ambos departamentos pero muy inferiores PPTs para Unión.

Al igual que en el análisis general, los mínimos se presentaron en septiembre, para los cultivos de invierno. Respecto de la capacidad de agua útil, para Marcos Juárez este mínimo resultó del 34,4% y para Unión, del 37,6%.

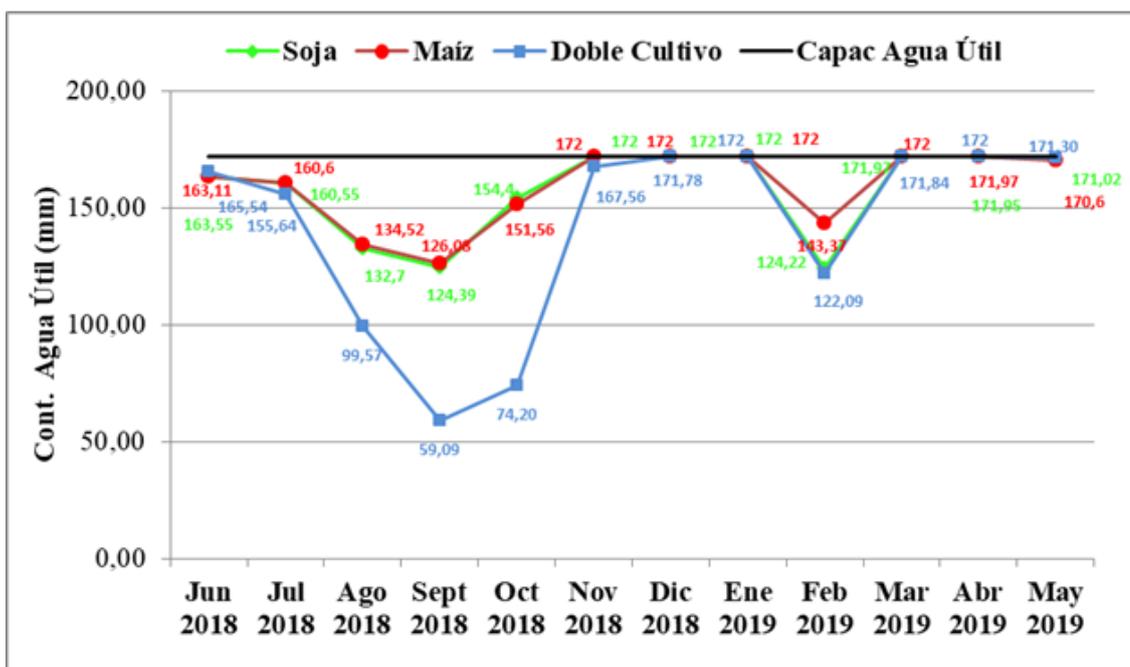


Figura 20. Balance hídrico mensual seriado para Marcos Juárez

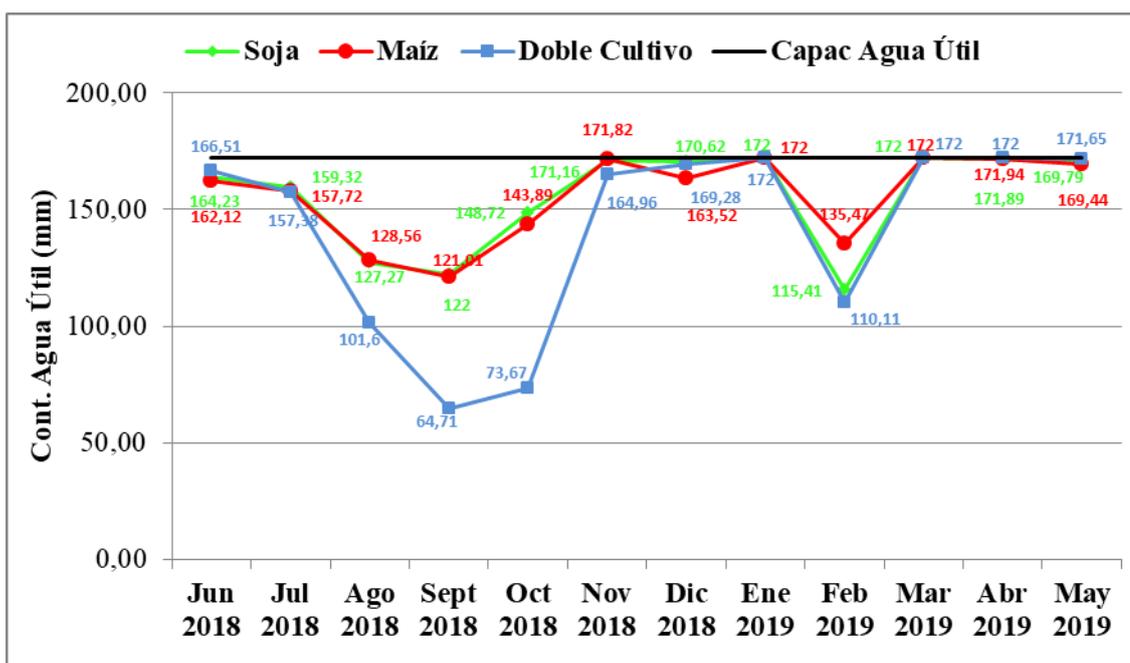


Figura 21. Balance hídrico mensual seriado para Unión

- **Balances hídricos al inicio del período crítico (mes de máximo NDVI)**

El cultivo de soja para el AE completa, tanto único como cultivo de segunda, presentó al inicio de su mes crítico, los perfiles de todos sus lotes cargados al nivel máximo, 90-100% de su capacidad (Tabla 8). Para este cultivo este mes crítico, de NDVI máximo, fue febrero 2018, por lo que se analizó el balance seriado hasta fines de enero. El nivel de carga de estos perfiles estuvo relacionado con las abundantes lluvias ocurridas justamente durante ese último mes, inmediatamente anterior al inicio del mes crítico.

En el caso del maíz, el balance seriado a considerar se extiende hasta fin de diciembre de 2018. Se presentaron aproximadamente un 11% de lotes con cargas inferiores al porcentaje de corte máximo.

En el caso de los cultivos de invierno se han considerado los balances seriados hasta fines de agosto. Estos cultivos afrontaron el inicio de su mes crítico (septiembre 2018) con cargas mayoritariamente medias.

El análisis diferenciado por departamento, permitió detectar para el maíz que todos los lotes que no presentaron cargas en el nivel máximo, estaban localizados en Unión (**Figura 22B, Tablas 9 y 10**). Para explicar esta situación se analizaron las distribuciones espaciales de los valores de PPTs y de ETR acumulados hasta el inicio del mes crítico para este cultivo. Los valores de ETR acumulados presentan una distribución espacial equilibrada de las categorías de corte para ambos departamentos (**Figura 23B**), mientras que la **Figura 23A** permite corroborar espacialmente la menor cantidad de PPTs ocurridas en Unión, inferiores al promedio. Ello valida la diferencia en los balances hídricos de ambos departamentos en el momento previo a alcanzar la cobertura su mayor actividad fotosintética (**Figuras 20 y 21**). Para ambos cultivos de soja, los dos departamentos presentaron idéntica situación: carga máxima de los perfiles para todos los lotes de las muestras (**Figuras 22A y 22D**). Para el cultivo de invierno la carga de perfiles, mayoritariamente en niveles medios de corte, presentó una distribución espacial homogénea en ambos departamentos (**Figura 22C, Tablas 9 y 10**). Estos menores niveles de carga de los perfiles obedecerían a la escasez de lluvias de la campaña en curso, motivada por la estacionalidad estival de las mismas.

	Cant. Lotes	Balance hídricos previo NDVI Max (% Carga útil Máxima)									
		90		70		50		30		10	
		Cant	%	Cant	%	Cant	%	Cant	%	Cant	%
Soja (Único)	375	375	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Maíz	388	348	89,7	38	9,8	0	0	0	0	2	0,5
Cult. Inv	238	0	0	31	13	158	66,4	45	19	4	1,6
Soja Segunda	238	238	100	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 8. Cantidad (Cant) y porcentaje (%) de lotes con diferentes porcentajes de carga de agua útil respecto del máximo – Previo NDVI Máximo, para el área de estudio

	Cant. Lotes	Balance hídricos previo NDVI Max (% Carga útil Máxima)									
		90		70		50		30		10	
		Cant	%	Cant	%	Cant	%	Cant	%	Cant	%
Soja (Único)	211	211	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Maíz	208	208	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Cult. Inv	124	0	0	17	13,7	80	64,6	24	19,3	3	2,4
Soja Segunda	124	124	100	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 9. Cantidad (Cant) y porcentaje (%) de lotes con diferentes porcentajes de carga de agua útil respecto del máximo – Previo NDVI Máximo, para Marcos Juárez

	Cant. Lotes	Balance hídricos previo NDVI Max (% Carga útil Máxima)									
		90		70		50		30		10	
		Cant	%	Cant	%	Cant	%	Cant	%	Cant	%
Soja (Único)	164	164	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Maíz	180	140	77,7	38	21,1	0	0	0	0	2	1,1
Cult. Inv	114	0	0	14	12,3	78	68,5	21	18,4	1	0,8
Soja Segunda	114	114	100	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 10. Cantidad (Cant) y porcentaje (%) de lotes con diferentes porcentajes de carga de agua útil respecto del máximo - Previo NDVI Máximo, para Unión

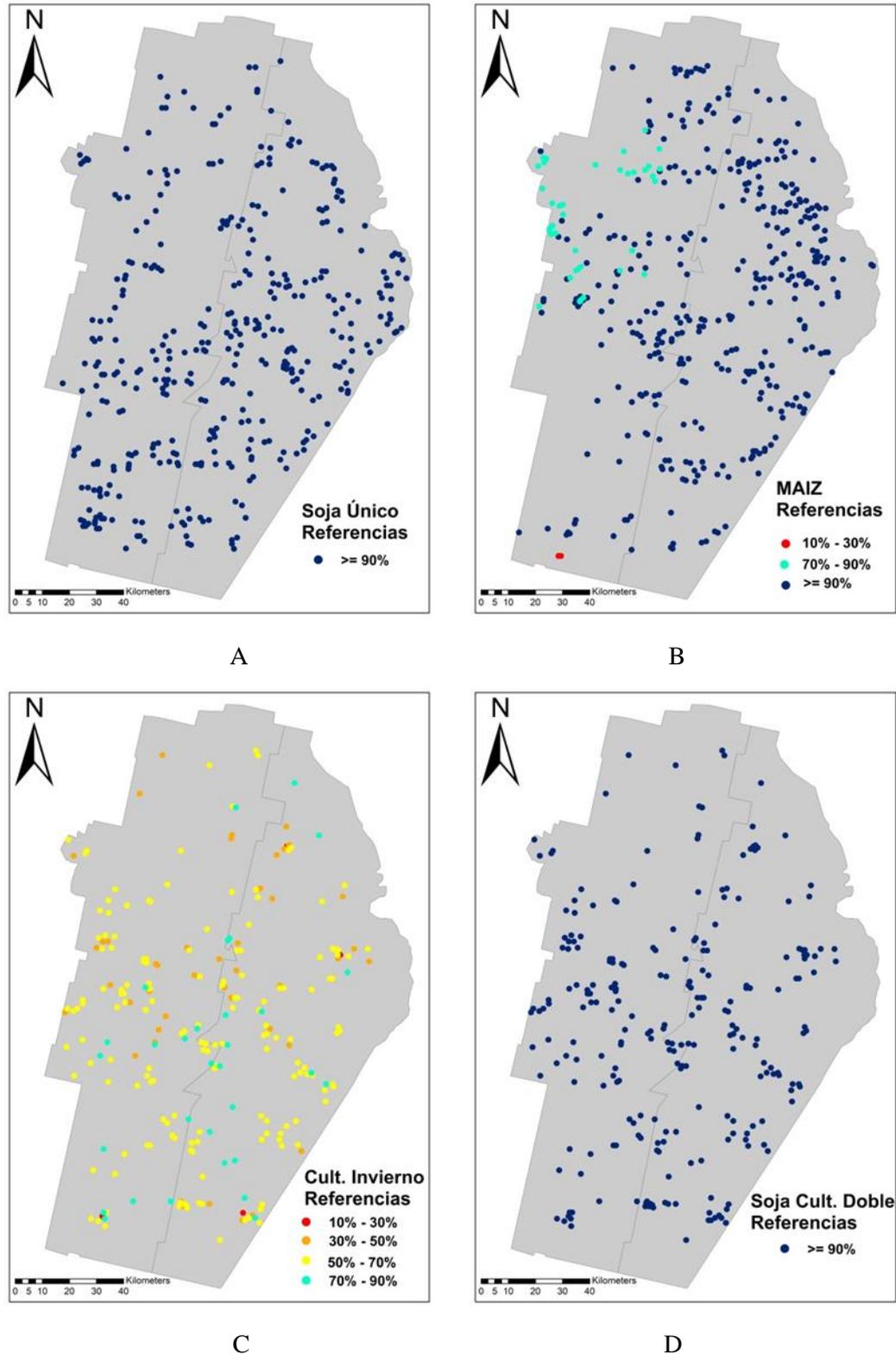


Figura 22. Distribución espacial balances hídricos previos mes NDVI Máx Cortes al 10%-30%-50%-70%-90% de Máximo de carga de agua útil del perfil. **A.** Soja (febrero) **B.** Maíz (enero) **C.** Cult. Inv. (septiembre) **D.** Soja de 2da (febrero). (Fuente: elaboración propia)

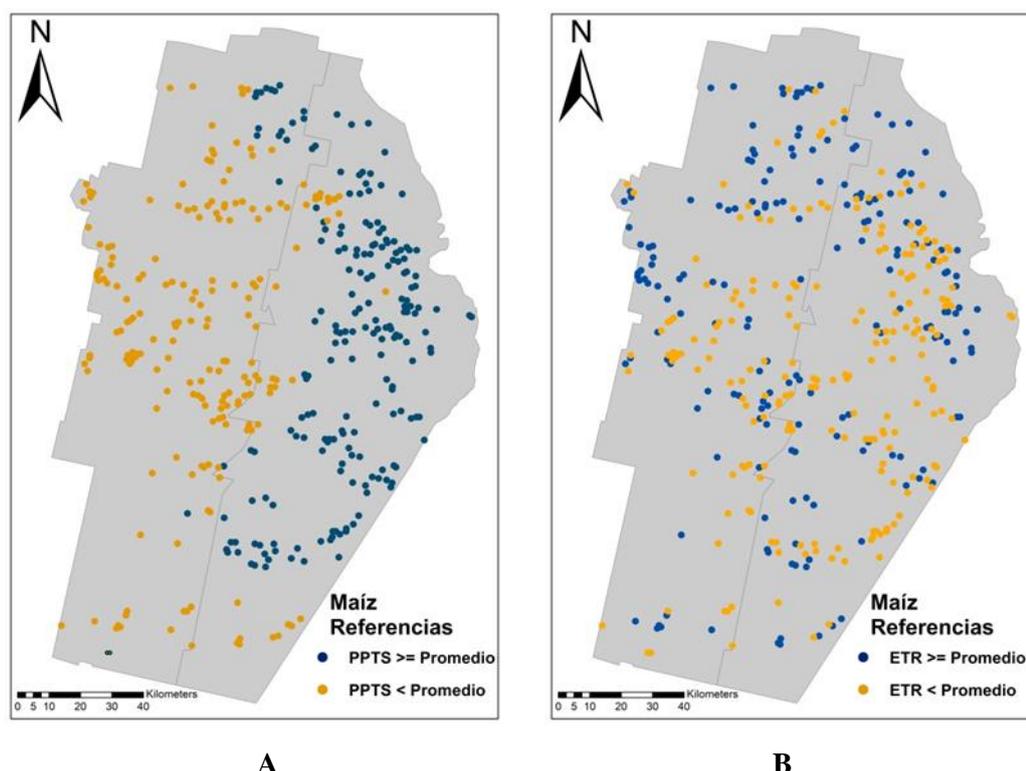


Figura 23. Componentes del balance hídrico seriado para lotes de maíz (inicio 01/2019).
A. Precipitaciones (PPTs) acumuladas **B.** Evapotranspiración Real (ETR) acumulada (Fuente: elaboración propia)

- **Balances hídricos al final de la campaña**

La carga de los perfiles hacia el final de la campaña se ubicó mayoritariamente en niveles máximos para toda el AE, motivado por las abundantes PPTs registradas en los meses de mayor demanda por parte de las coberturas de verano (**Tabla 11**). El análisis independiente de cada departamento permite sólo destacar el menor porcentaje de lotes de maíz en Unión, respecto de Marcos Juárez, con niveles máximos de carga hídrica (**Tablas 12 y 13**). La distribución espacial de estos datos no evidencia ningún patrón especial de interés dada la homogeneidad del nivel de carga de agua útil (**Figura 24**).

	Cant. Lotes	Balance hídricos fin de campaña(% Corte Carga útil Máxima)									
		90		70		50		30		10	
		Cant	%	Cant	%	Cant	%	Cant	%	Cant	%
Soja	375	370	98,66	5	1,34	0	0	0	0	0	0
Maíz	388	372	96	16	4	0	0	0	0	0	0
Doble Cultivo	238	235	98,74	3	1,26	0	0	0	0	0	0

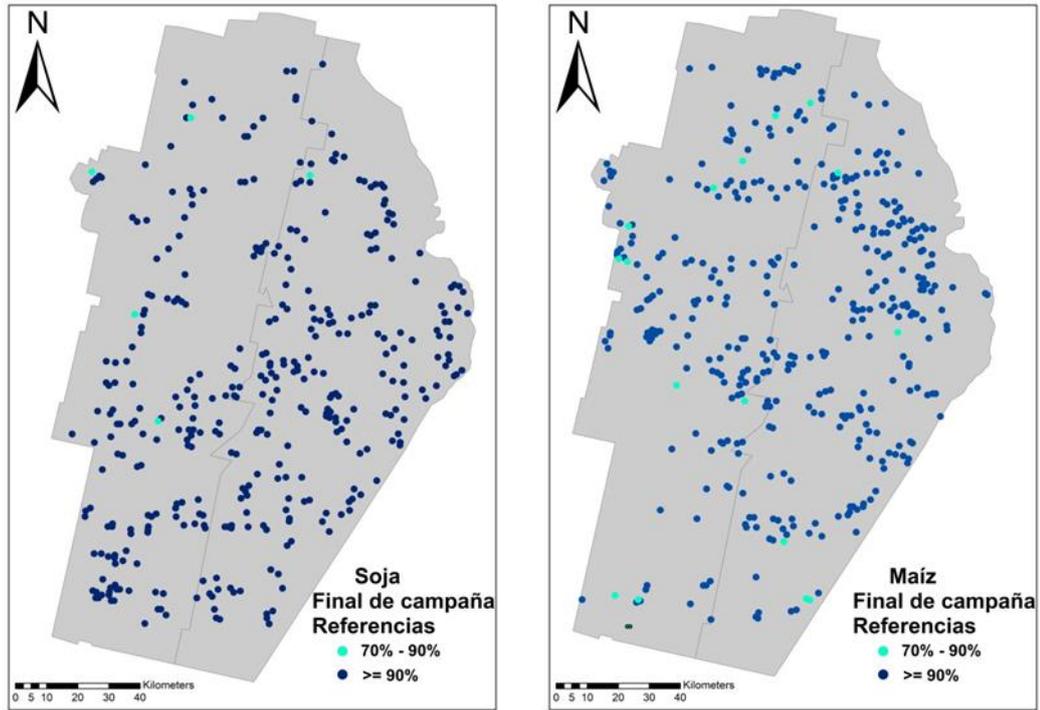
Tabla 11. Cantidad (Cant) y porcentaje (%) de lotes con diferentes porcentajes de carga de agua útil respecto del máximo- Fin de campaña, para el área de estudio

	Cant. Lotes	Balance hídricos fin de campaña(% Corte Carga útil Máxima)									
		90		70		50		30		10	
		Cant	%	Cant	%	Cant	%	Cant	%	Cant	%
Soja	211	210	99,5	1	0,5	0	0	0	0	0	0
Maíz	208	203	97,59	5	2,41	0	0	0	0	0	0
Doble Cultivo	124	121	97,58	3	2,42	0	0	0	0	0	0

Tabla 12. Cantidad (Cant) y porcentaje (%) de lotes con diferentes porcentajes de carga de agua útil respecto del máximo - Fin de campaña, para Marcos Juárez

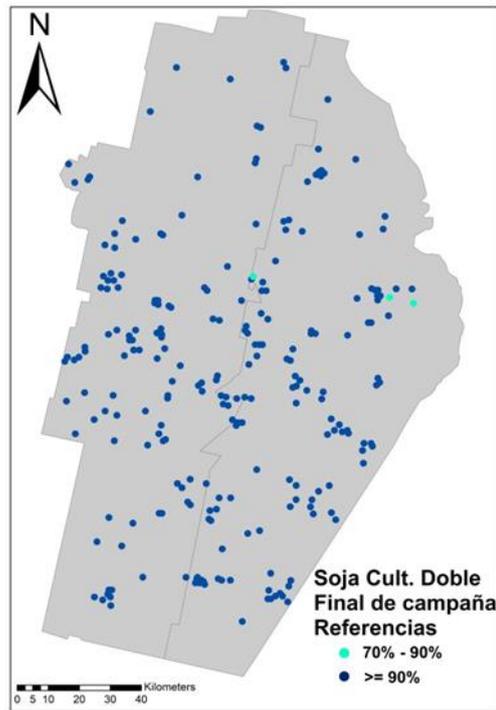
	Cant. Lotes	Balance hídricos fin de campaña(% Corte Carga útil Máxima)									
		90		70		50		30		10	
		Cant	%	Cant	%	Cant	%	Cant	%	Cant	%
Soja	164	161	98,17	3	1,83	0	0	0	0	0	0
Maíz	180	168	93,33	12	6,67	0	0	0	0	0	0
Doble Cultivo	114	114	100	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 13. Cantidad (Cant) y porcentaje (%) de lotes con diferentes porcentajes de carga de agua útil respecto del máximo - Fin de campaña, para Unión



A

B



C

Figura 24. Distribución espacial de balances hídricos por lote al fin de campaña
A. Soja **B.** Maíz **C.** Doble Cult. (Fuente: elaboración propia)

4.3. Relación entre balances hídricos previos al mes de NDVI Máximo y valores de NDVI-I

Para el AE completa, todas las coberturas han presentado lotes asociados a valores de NDVI-I altos, medios y bajos, siendo prevalentes los valores medios (**Tabla 14**). Para los cultivos de soja, dado que éstos presentaron niveles de carga máximos al inicio del mes crítico, no se detectó entonces una correlación directa de estas cargas con los valores de NDVI-I. El cultivo de maíz presentó cargas hídricas previas menores que la soja pero mayor proporción de lotes asociados a valores de NDVI-I superiores, probable indicio de diferencias en los niveles de consumo de ambos cultivos. Los cultivos de invierno registraron mayoritariamente lotes con cargas hídricas medias, asociadas a valores de NDVI-I también medios.

El análisis independiente de cada departamento presentó particularidades para el cultivo de maíz. Marcos Juárez presentó valores de NDVI-I superiores a Unión, mayor proporción de lotes asociados a la categoría “Alto” y menor proporción de lotes en la categoría “Bajo” (**Tablas 15 y 16**). Esto podría explicarse por la diferencias en la carga de perfiles con la que se afrontó el mes de más actividad del cultivo en cada departamento. Para los lotes del departamento de Unión que llegaron al inicio de su mes crítico con sus perfiles cargados por debajo del corte máximo (**Figura 25**), los valores de NDVI-I mayores se dispusieron espacialmente hacia el límite oeste del partido, posiblemente relacionado al tipo de suelo (Alfisoles) asociado a esa zona (**Figura 2A.**).

NDVI-I AE	Alto					Medio					Bajo				
	90	70	50	30	10	90	70	50	30	10	90	70	50	30	10
% Corte de Carga Útil Máxima															
Soja (% lotes)	14,7	0	0	0	0	74,4	0	0	0	0	10,9	0	0	0	0
Maíz(% lotes)	23,8	2,6	0	0	0	58,7	6,9	0	0	0,5	7,2	0,3	0	0	0
Cult. Inv (% lotes)	0	0,4	6	6,7	0,4	0	9,7	50,4	10,1	0,8	0	2,9	10,1	2,1	0,4
Soja 2da(% lotes)	10,9	0	0	0	0	76,1	0	0	0	0	13	0	0	0	0

Tabla 14. Porcentaje de lotes en cada uno de los diferentes niveles de carga de agua útil al inicio del mes de NDVI máximo, para cada categoría de valores de NDVI-I, para el área de estudio (AE)

NDVI-I Marcos Juárez	Alto					Medio					Bajo				
	90	70	50	30	10	90	70	50	30	10	90	70	50	30	10
% Corte de Carga Útil Máxima															
Soja (% lotes)	14,3	0	0	0	0	78,1	0	0	0	0	7,6	0	0	0	0
Maíz (% lotes)	33,9	0	0	0	0	59,5	0	0	0	0	6,6	0	0	0	0
Cult. Inv (% lotes)	0	0,8	9,7	8,9	0	0	10,5	50,8	7,2	1,6	0	2,4	4,1	3,2	0,8
Soja 2da (% lotes)	8	0	0	0	0	79	0	0	0	0	13	0	0	0	0

Tabla 15. Porcentaje de lotes en cada uno de los diferentes niveles de carga de agua útil al inicio del mes de NDVI máximo, para cada categoría de valores de NDVI-I, para Marcos Juárez

NDVI-I Unión	Alto					Medio					Bajo				
	90	70	50	30	10	90	70	50	30	10	90	70	50	30	10
% Corte de Carga Útil Máxima															
Soja (% lotes)	15,4	0	0	0	0	69,2	0	0	0	0	15,4	0	0	0	0
Maíz (% lotes)	12,5	5,6	0	0	0	57,6	14,9	0	0	1,1	7,6	0,6	0	0	0
Cult. Inv (%lotes)	0	0	1,7	4,4	0,9	0	8,7	50	13,2	0	0	3,6	16,7	0,8	0
Soja 2da (%lotes)	14	0	0	0	0	72,8	0	0	0	0	13,2	0	0	0	0

Tabla 16. Porcentaje de lotes en cada uno de los diferentes niveles de carga de agua útil al inicio del mes de NDVI máximo, para cada categoría de valores de NDVI-I, para Unión

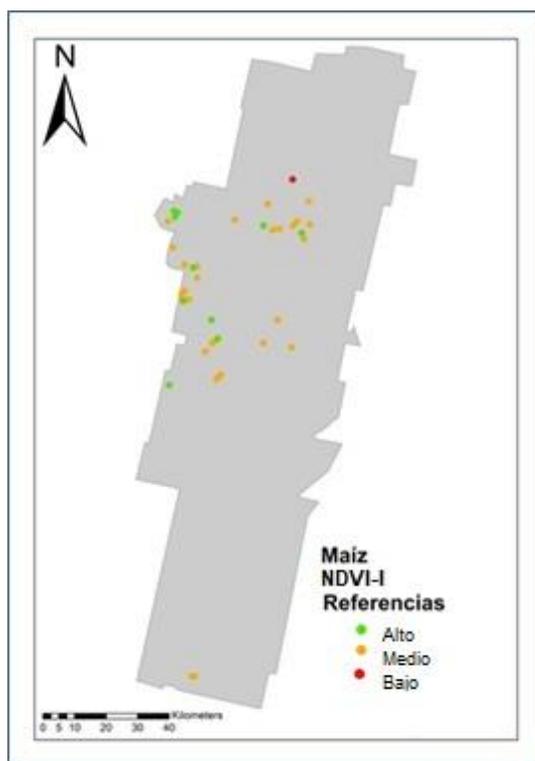


Figura 25. NDVI-I del cultivo de maíz para lotes con perfiles con cargas inferiores al Corte Máximo para el departamento de Unión. Inicio de enero 2019 (mes de máximo NDVI). (Fuente: elaboración propia)

5. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos puede aseverarse que, claramente, los consumos hídricos estuvieron asociados de forma distintiva a las diferentes coberturas presentes, resultando éstos estadísticamente significativos para distinguirlas entre sí. En cuanto a la magnitud de estos consumos, los lotes destinados a doble cultivo (cultivo de invierno y soja como cultivo de segunda) presentaron mayores niveles de evapotranspiración que los cultivos únicos, registrando el maíz los menores consumos. Las proporciones entre estimaciones de ETR para las diferentes coberturas, pudieron verificarse tanto para el AE completa como, de forma independiente, para cada uno de los departamentos que la componen.

Se han presentado en la campaña promedios de balances hídricos mensuales, en todas las coberturas, cuyos valores dan cuenta de cierta holgura del recurso. Esto

probablemente esté relacionado a perfiles considerados como completamente cargados al inicio del cálculo del balance seriado y a las lluvias registradas, superiores a las medias históricas. El valor de contenido de agua en el suelo mínimo registrado, en el mes de septiembre para los cultivos de invierno, representó más de un tercio de su capacidad de agua útil. La carga de perfiles al inicio de los respectivos meses críticos de cada cobertura, ha resultado prácticamente máxima para los cultivos de verano, resultando destacable el diferencial de cargas ligeramente inferiores para el cultivo de maíz en el departamento de Unión. Para los cultivos de invierno, estas cargas han resultado predominantemente de niveles medios. En ningún caso estos niveles de carga de perfiles han podido correlacionarse de forma certera con los respectivos valores de NDVI-I, estimadores de su productividad. Las abundantes lluvias del mes de marzo, provocaron la recarga de perfiles hasta prácticamente su capacidad de agua útil al final de la campaña, para todos los cultivos.

Es importante destacar que el presente trabajo resultó de utilidad para caracterizar el uso de agua de las coberturas estudiadas a partir de información satelital y de la utilización de sistemas de información geográfica. El mismo ha abarcado una vasta zona geográfica, representada por un gran número de lotes homogéneamente distribuidos en el AE para cada cobertura, lo que permitió describir ajustadamente la variabilidad espacial de la campaña agrícola considerada. El análisis presentado cuenta con datos de una única campaña que resultó especialmente lluviosa. Este dato meteorológico, sumado a la escasa profundidad promedio de la napa informada al inicio de la campaña y a la presencia de suelos salinos y sódicos en el AE, respaldaría la elección de manejos que mantengan cultivos activos durante la mayor parte del año, generando mayores consumos hídricos en busca de prevenir potenciales riesgos de inundación. Sin embargo, para poder arribar a conclusiones más amplias deberían analizarse múltiples campañas, diversas en cuanto a sus condiciones meteorológicas. A su vez, en busca de mejorar la precisión en la estimación de los balances hídricos, deberían considerarse valores de capacidad de retención de agua útil asociados a cada uno de los lotes analizados.

Referencias

- Aimetta, M. B., Muñoz, S. A., Bustos, D. A., Davidenco, V., Cazorla, C. R., Galarza, C. M., & Salvagiotti, F. (2020). Cuantificación del uso agrícola de suelos con limitantes salinas y sódicas mediante el índice NDVI. *Asociación Argentina Ciencia del Suelo*.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Datos meteorológicos. *Evaporación del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 29-64*.
- Andreucci, A., Conde, M. B., & Bollatti, P. (2015). Análisis del régimen de precipitaciones y nivel freático en la EEA INTA Marcos Juárez. Período 1948-2015. *INTA Ediciones. Colección Divulgación nro, 18*.
- Baldassini, P., Sans, G. C., Segura, D. A., Conde, C., & Paruelo, J. M. (2024). Mapping cropping systems and their effects on ecosystem functioning and services in the Argentine Pampas. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 369*, 109027.
- BCBA Bolsa de Cereales de Buenos Aires (2024). Informes y Datos. Recuperado de: <https://www.bolsadecereales.com/estimaciones-informes>
- BCCBA Bolsa de Cereales de Córdoba. (2023). Estadísticas de Cultivos por Campaña. Recuperado de: <https://www.bccba.org.ar/home/dptos-informacion/estadisticas-cultivos/>
- Bollatti, P., & NAPAS, I. M. J. G. Maximizar la evapotranspiración como estrategia de reducción de los excedentes hídricos en el sudeste de la provincia de Córdoba.
- Brisson, N., Seguin, B., & Bertuzzi, P. (1992) Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *Agricultural and Forest Meteorology, 59*, 267–287.
- Brutsaert, W. (1986). Catchment-scale evaporation and the atmospheric boundary layer. *Water Resources Research, 22(9S)*, 39S-45S.
- Casagrande, G. A., Vergara, G. T., Belmonte, L., Fuentes, M. E., & Arnaiz, J. P. (2014). Areas de riesgo agroclimático para cuatro rotaciones de cultivos de la región oriental agropecuaria de La Pampa (Argentina).
- Caviglia, O. P., & Andrade, F. H. (2010). Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean Pampas: capture and use efficiency of environmental resources. *Am. J. Plant Sci. Biotechnol, 3(1)*, 1-8.

Cocero, D., Chuvieco E., & Salas, J. (2001). El sensor SPOT-Vegetation, una nueva alternativa en la estimación de la humedad de la vegetación. *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*, 179-182.

Daniele, C. y Natenzon, C. Las regiones naturales de la Argentina: caracterización y diagnóstico. Buenos Aires: Administración de Parques Nacionales, El Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas de la Argentina. (1994).

De Abelleira, D., Banchemo, S., Verón, S., Mosciaro, J. y Volante, J. (2019). Mapa Nacional de Cultivos. Campaña 2018-2019. GeoInta-INTA . Recuperado de: <http://www.geointa.inta.gob.ar/2019/09/10/mapa-nacional-de-cultivos-campana-20182019/>

Degano, M. F., Rivas, R. E., Carmona, F., Niclòs, R., & Sánchez, J. M. (2021). Evaluation of the MOD16A2 evapotranspiration product in an agricultural area of Argentina, the Pampas region. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(2), 319-328.

Di Bella, C. M., C. M. Rebella, and J. M. Paruelo. 2000. Evapotranspiration estimates using NOAA AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing* 21(4):791-797. <https://doi.org/10.1080/014311600210579>.

Di Bella, C. M., Oricchio, P. A., Gusmerotti, L. A., & Texeira, M. (2019). Actualización del algoritmo de estimación de la evapotranspiración real para el sensor VIIRS-Suomi NPP. *Ecología Austral*, 29(3), 428-432.

Ferreras, L., Toresani, S., Faggioli, V. and Galarza, C. Sensibilidad de indicadores biológicos edáficos en un Argiudol de la Región Pampeana Argentina. *Spanish Journal of Soil Science* 5(3), 220–235. (2015).

García, P. E., Menéndez, A. N., Podestá, G., Bert, F., Arora, P., & Jobbágy, E. (2018). Land use as possible strategy for managing water table depth in flat basins with shallow groundwater. *International Journal of River Basin Management*, 16(1), 79-92.

Garello, F. J. (2023). *Maíces tempranos vs tardíos en el centro de la Región Pampeana: diferencias en variables funcionales estimadas con sensores remotos* (Doctoral dissertation, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires).

Gorgas, J., & Tassile, J. (2003). Recursos naturales de la provincia de Córdoba. *INTA, Córdoba*.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 83(1-2), 195-213.

IDECOR Infraestructura de datos Espaciales Córdoba. (2018). Mapa Base Córdoba. Recuperado de: <https://idecor-ws.cba.gov.ar/maps/5/view>

INTA. (2013). Suelos de la República Argentina. Recuperado de: <http://www.geointa.inta.gob.ar/2013/05/26/suelos-de-la-republica-argentina/>

Irmak, A., Ratcliffe, I., Ranade, P., Hubbard, K. G., Singh, R. K., Kamble, B., & Kjaersgaard, J. (2011). Estimation of land surface evapotranspiration with a satellite remote sensing procedure. *Great plains research*, 73-88.

Marchesini, V. A., Fernández, R. J., Reynolds, J. F., Sobrino, J. A., & Di Bella, C. M. (2015). Changes in evapotranspiration and phenology as consequences of shrub removal in dry forests of central Argentina. *Ecohydrology*, 8(7), 1304-1311. <https://doi.org/10.1002/eco.1583>.

Marini, F.; M. Santamaría, P. Oricchio, C. M. Di Bella, and A. Basualdo. 2017. Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS. *Revista AET* 48:29-41. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.6743>.

Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., & Mercau, J. L. (2010). Ambientación y aplicación variable de insumos en áreas con influencia freática. *AAPRESID. Revista Técnica Especial. Agricultura de precisión y manejo por ambientes*, 15-20.

Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Brizuela, A. B., & Jackson, R. B. (2012). The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 154, 2-11.

Nosetto, M. D., Paez, R. A., Ballesteros, S. I., & Jobbágy, E. G. (2015). Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206, 60-70.

Ovando, G., Bocco, M., Bollatti, P., Sayago, S., Andreucci, Á., & Collino, D. (2019). Análisis de la tendencia del nivel de napa freática y su relación con las precipitaciones, evapotranspiración potencial y NDVI en Marcos Juárez (Córdoba). In XI Congreso de AgroInformática (CAI)-JAIIO 48 (Salta, 2019).

Paruelo, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Revista Ecosistemas*, 17(3).

Pérez, S., Sierra, E., Momo, F. and Massobrio, M. Changes in average annual precipitation in Argentina's Pampa region and their possible causes. *Climate* 3(1) 150–167. (2015).

Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, J. P., & Paruelo, J. M. (2008). How to evaluate models: observed vs. predicted or predicted vs. observed?. *Ecological Modelling*, 216(3-4), 316-322.

SEPA Herramientas Satelitales para el Seguimiento de la Producción Agropecuaria. (2023). Recuperado de: https://sepa.inta.gob.ar/productos/agrometeorologia/bh_10d/

Spescha L., R. Hurtado & J. Gardiol. 2001. Climatología del agua en el suelo para el cultivo de maíz en la zona de Balcarce (Buenos Aires, Argentina). *Rev. meteorol. agrometeorología* 1(1) 43-49.

Soriano, A., 1991. Río de La Plata Grasslands. In: R.T. Coupland (Editor), *Ecosystems of the World: 8A: Natural Grasslands. Introduction and Western Hemisphere*. Elsevier, Amsterdam, 367–407.
