

# Revista Argentina de Agrometeorología

ISSN 2545-8418

Editada por la  
Asociación Argentina  
de Agrometeorología

Revista Digital | Volumen X | Año 2019



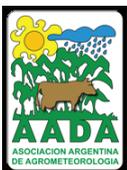
  
**RADA**  
REVISTA ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGIA

Revista Argentina de

# AGROMETEOROLOGIA

Volumen X. AÑO 2019

---



## **Asociación Argentina de Agrometeorología**

### **Comisión Directiva**

*Presidente:* Andrea Irigoyen

*Vicepresidente:* Olga Penalba

*Secretaria:* Andrea Rivarola

*Secretaria de Actas:* Gabriela Cruz

*Tesorero:* Ángel Blasón

*Protesorero:* Roberto Zanvettor

*Vocales Titulares:* Antonio de la Casa

Armando Brizuela

*Vocales Suplentes:* Ana Llames

Martín Pardi

Revista Argentina de

# AGROMETEOROLOGÍA

*Director:* Pedro Enrique Boletta

### **Comité Científico**

*Coordinador:* Andrés C. Ravelo

*Integrantes del Comité Científico*

Homero Bergamaschi

Antonio de la Casa

Patricia Figuerola

Denice Fontana

Andrea Irigoyen

Mario Murphy

Olga Penalba

Ana María Planchuelo

Andrés C. Ravelo

Rafael Rodríguez

Roberto Seiler

Paulo Senthelas

Leonardo Serio

Marta Vinocur

### **RADA**

REVISTA ARGENTINA DE AGROMETEOROLOGÍA

Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos  
Agrícolas y Naturales Av. Valparaiso s/n - C.C. 509 -  
C.P. 5000

Ciudad de Córdoba - ARGENTINA

[www.crean.unc.edu.ar](http://www.crean.unc.edu.ar)

Email: [pecbol@gmail.com](mailto:pecbol@gmail.com)

## Nota Editorial

En mi carácter de Director deseo expresar mi sentido pesar por el fallecimiento de quien fuera el fundador de la Revista de la Asociación Argentina de Agrometeorología, el Ing. Agr. Antonio J. Pascale. El Ing. Pascale fue un gran Profesor que fijó rumbos en la especialidad y así lo expresa con detalles el Ing. Agr. Guillermo Murphy en el obituario que ha realizado para rendir homenaje en su memoria.

El presente Volumen contiene seis trabajos que consideran distintos aspectos de interés en la Agrometeorología, de los cuales cuatro se refieren a distintos aspectos productivos y los otros dos están relacionados al cambio climático con la Agrometeorología.

Con la presente publicación ya son cuatro volúmenes que se publican en el nuevo formato digital y así se cumplen con los requisitos para su indexación en el Núcleo Básico de CONICET. Este proceso de incorporación al Núcleo Básico se ha iniciado recopilando los requisitos que se deben reunir, para iniciar el año próximo el trámite correspondiente y una vez aprobado trataremos de incorporar a RADA a Scielo, ya con una proyección internacional.

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

**Ing. Ftal (M Sc.) Pedro Enrique Boletta**

*Director RADA*

## CONTENIDO

### **Proyecciones de los flujos de agua en el suelo a partir de los modelos climáticos globales del CMIP5 en Sudamérica y su impacto regional**

Penalba, O.C. y V.C. Pántano ..... 1

### **Evapotranspiración de Hargreaves en Argentina con datos grillados en alta resolución: Valores medios y tendencias**

Serio, L.; M. Antelo y S. M. F. Zalazar ..... 15

### **Evolución del área foliar en canopeos de maíz creciendo sobre cultivo de cobertura y sobre barbecho limpio bajo condiciones contrastantes de agua en el suelo**

Irigoyen, A.I.; M. A. Cambareri; L. Echarte y R.E. Rivas ..... 25

### **Balance hidrológico en un entorno SIG para un campo agrícola en Diamante, Entre Ríos**

Kinderknecht, L. E.; M. B. Tóffoli; A. B. Brizuela y  
C. A. Aguirre ..... 35

### **Características del índice de temperatura y humedad modificado por el viento y radiación en Entre Ríos, Argentina**

Rondán, G.A.; C.I. Michelin; A.B. Brizuela; N. Maltese; A. Kemerer y C. Aguirre ..... 49

### **Conductores ambientales de la productividad de buffelgrass en el Chaco Árido de la Rioja (Argentina)**

Luna Toledo, E. S.; P. I. Figuerola y A.R. Sancho ..... 59

# Balance hidrológico en un entorno SIG para un campo agrícola en Diamante, Entre Ríos

Kinderknecht, L. E.; M. B. Tóffoli; A. B. Brizuela y C. A. Aguirre

## RESUMEN

El departamento Diamante en la provincia de Entre Ríos se caracteriza por su topografía ondulada que influye a escala de lote sobre la variabilidad de la humedad de suelo. Las herramientas proporcionadas por los sistemas de información geográfica facilitan el tratamiento y análisis de dicha variable mediante una representación matricial de las entradas y salidas de agua para cada celda del lote. El presente trabajo de carácter exploratorio, propone adaptar el balance hidrológico operativo de la Oficina de Riesgos Agropecuarios para su uso a escala predial incorporando el escurrimiento superficial en función de un mapa de acumulación de flujo. Se determinaron los sectores de loma, media loma y bajo del predio, por medio de un índice topográfico. Se obtuvieron mapas de almacenaje hídrico del campo cada 10 días en la capa de suelo superficial (0-20 cm), entre el 1 de septiembre de 2017 y el 31 de agosto de 2018 para una grilla de 10 m de resolución. La metodología propuesta, da cuenta de los cambios de la humedad de suelo que presentan especialmente los sectores más bajos del predio, lo cual resulta necesario validar con datos de campo.

**Palabras clave:** Humedad de suelo; Índice topográfico; Modelo digital de elevación; Acumulación de flujo

Kinderknecht, L. E.; M. B. Tóffoli; A. B. Brizuela and C. A. Aguirre-2019. Hydrological balance in a gis environment for an agricultural field in Diamante, Entre Ríos. RADA X: 35-47

## SUMMARY

The Diamante department in Entre Ríos province is characterized by its undulating topography that influences the variability of soil moisture on a batch scale. The tools provided by the geographic information systems facilitate the treatment and analysis of said variable through a matrix representation of the water inputs and outputs for each cell in the batch. This exploratory paper proposes adapting the operational hydrological balance of the Office of Agricultural Risks for use at a field scale incorporating surface runoff based on a flow accumulation map. The hill, half-hill and low-lying areas of the field were determined by means of a topographic index. Water storage maps of the field were obtained every 10 days in the surface soil layer (0-20 cm), between September 1, 2017 and August 31, 2018 for a 10 m resolution grid.

The proposed methodology gives an account of the changes in soil moisture, especially in the lower sectors of the field, which is necessary to validate with field data.

**Key words:** Soil moisture - Topographic index - Digital elevation model - Flow accumulation.

*Kinderknecht, L. E.; M. B. Tóffoli; A. B. Brizuela y C. A. Aguirre: Cátedra de Climatología Agrícola y Sistemas de Información Geográfica. Facultad de Ciencias Agropecuarias. UNER. (3101) Oro Verde, Ruta 11, Km 10,5. Entre Ríos. Argentina. A. B. Brizuela y C. A. Aguirre: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Correspondencia a: kinderknechtleandro1@gmail.com*

## INTRODUCCIÓN

Tanto el departamento Diamante como otros en la provincia de Entre Ríos (Argentina), se caracterizan por su topografía ondulada y variabilidad altimétrica (Plan Mapa de Suelos, 1991). Esta condición junto a otras propiedades del suelo explican las variaciones de la humedad edáfica en el interior de los lotes a lo largo del tiempo. Por ello resulta necesario estudiar la variabilidad espacio - temporal de la humedad de suelo a escala predial incorporando al análisis procesos hidrológicos de impacto local.

Según Kravchenko y Bullock (2000), tanto la curvatura, la pendiente y la acumulación de flujo afectan significativamente el rendimiento de los cultivos sólo bajo ciertas condiciones, como ubicaciones topográficas extremas (depresiones no drenadas o cimas erosionadas) combinadas con precipitaciones muy altas o bajas.

Kravchenko y Bullock (2002) estudiaron la influencia de las características topográficas como elevación, pendiente y curvatura del terreno sobre el contenido de proteína y la concentración de aceite en soja [*Glycine max* (L.) Merr.]. Posteriormente caracterizaron la variabilidad espacio-temporal en los rendimientos de maíz (*Zea mays* L), soja y trigo (*Triticum aestivum* L.) a escala de lote. Para tal fin analizaron los efectos de las prácticas de manejo, las características topográficas y las condiciones climáticas (Kravchenko *et al.*, 2005).

Kaspar *et al.* (2003) analizaron una serie de años con precipitaciones tanto superiores como inferiores a los valores medios para relacionar

los atributos del terreno con los rendimientos del cultivo de maíz en las distintas campañas. A su vez, establecieron patrones espaciales de rendimiento a partir de un modelo de regresión lineal múltiple.

Castro Franco *et al.* (2012) mostraron, para un lote y para una campaña de soja, que los atributos primarios y secundarios de la topografía están relacionados con el rendimiento. En particular, consideran que es una efectiva manera de cuantificar el efecto de la topografía sobre el rendimiento y que los atributos primarios, con excepción de la pendiente, explican en gran parte la variabilidad espacial del rendimiento.

De acuerdo a lo mencionado en párrafos anteriores, queda claro que la variabilidad topográfica influye sobre ciertas propiedades de suelo -como la disponibilidad hídrica-, siendo este uno de los principales factores que ocasiona una variación en los rendimientos en cultivos agrícolas.

Un procedimiento utilizado generalmente para estimar la humedad en el suelo es el balance hidrológico, "se trata de un modelo simplificado de la reserva de agua en la zona de exploración radicular o sea en la zona insaturada del suelo" (Fernández Long *et al.*, 2012). En éste trabajo la autora describe numerosos modelos desarrollados a lo largo de tiempo, y considera que el estudio del agua en el suelo y su relación con los rendimientos, a escala de departamento o partido, representa una contribución para explicar la productividad de los cultivos en la Región Pampeana Argentina.

Para analizar la variabilidad espacial de la humedad en el suelo se utilizan aplicaciones de teledetección y Sistemas de Información

Geográfica (SIG). Estas herramientas ofrecen un abanico de posibilidades para la elaboración de mapas digitales de atributos hídricos-topográficos. Qiu *et al.* (2001) realizaron mediciones de humedad de suelo en 5 profundidades y encontraron que el perfil y las características dinámicas de la humedad del suelo se controlan tanto por el uso del suelo como por la topografía (por ejemplo, aspecto, posición, pendiente y elevación relativa). Por otro lado, Teuling *et al.* (2006) destacan que la variabilidad de la humedad edáfica es el resultado de una interacción compleja entre las características del suelo, la vegetación y el paisaje.

Se podrían lograr mejores aproximaciones para caracterizar la variabilidad espacio-temporal de la humedad de suelo, en un campo o en un lote mediante la utilización de registros meteorológicos 'in situ', descripción del perfil de suelo con sus constantes hídricas, estimación de almacenamiento de agua en el suelo -con un balance hidrológico seriado aplicado a escala de píxel-, o bien la inclusión de modelos o índices teniendo en cuenta que la humedad de suelo está relacionada con los factores edáficos y topográficos. A tal efecto Dyer, (2009) resalta el papel de la topografía en el control sobre los patrones de humedad del suelo y por lo tanto la influencia en la composición de los bosques.

Por su parte, Leiva Gutierrez (2012) expone una metodología, con técnicas geoestadísticas y análisis de regresión multivariada, para estimar la humedad disponible en forma mensual a través del balance hídrico. Encontró que en la época lluviosa son relevantes los aportes de las variables topográficas como la curvatura, la pendiente y el índice de posición topográfica; mientras que en la época seca, lo son las formas del terreno y el índice topográfico de humedad relativa.

En los campos agrícolas, donde la topografía varía en cortas distancias, es necesario tomar en cuenta el escurrimiento superficial en las estimaciones de almacenamiento de agua en el suelo y en la distribución espacial del mismo. Para ayudar a comprender la complejidad de representar los procesos hidrológicos de la superficie terrestre, Schaake *et al.*, (1996) desarrollaron un modelo de balance de agua paramétrico, basado en el promedio estadístico de los principales procesos hidrológicos que tiene por objetivo simular la escorrentía de manera simple en modelos atmosféricos / hidrológicos acoplados. Otros autores como Flores y Ruíz (1998) incorporaron la variable espacial del escurrimiento superficial en los modelos a partir de las curvas número (CN) (U.S. Soil Conservation Service, 1968).

Aun cuando es ampliamente reconocido que la humedad de suelo –medida o estimada- es una variable apreciada si estuviera disponible durante las campañas agrícolas y, especialmente en los períodos críticos de los cultivos, resulta complejo lograr aplicaciones en tiempo real con resultados certeros. En este sentido un modelo operativo ha sido implementado en nuestro país por la Oficina Riesgo Agropecuario (ORA); la cual brinda información actualizada de las condiciones de humedad de los suelos en diferentes regiones del país. A tal efecto, utiliza un balance hídrico de paso diario que incluye el escurrimiento superficial y estima un paulatino escurrimiento de los excesos eventualmente acumulados en superficie luego de lluvias intensas (Basualdo y Occhiuzzi, 2005).

En el presente trabajo se explora un esquema para incluir, en el balance hidrológico utilizado por ORA, la variabilidad espacial a escala de un lote agrícola. A su vez, se indagan probables cambios por escurrimiento teniendo en cuenta un mapa de acumulación de flujo derivado de un Modelo Digital de Elevación (MDE).

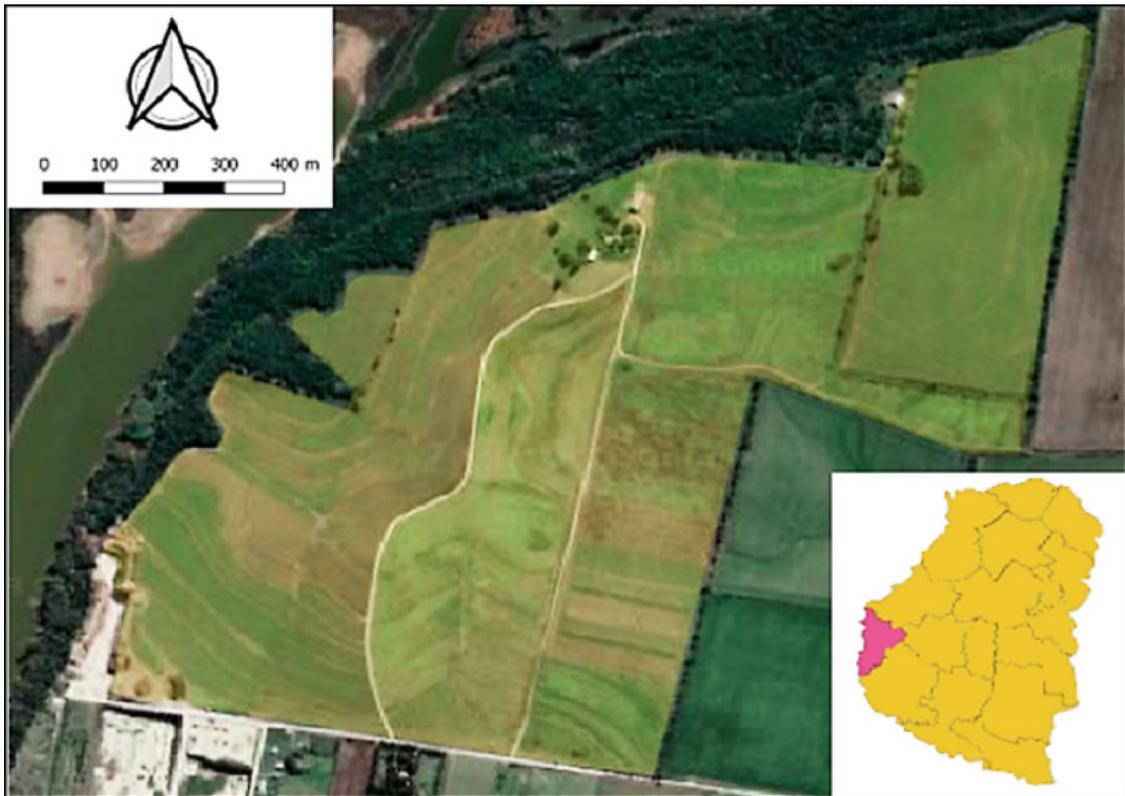
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio se llevó a cabo sobre la totalidad del área productiva correspondiente al campo experimental "R. Roldán" que posee la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER) en el Departamento Diamante (provincia de Entre Ríos), que está ubicado entre los paralelos: 31° 51' 10" a 31° 51' 56" de latitud sur y meridianos: 60° 38' 59" a 60° 37' 48" de longitud oeste (Figura 1). El campo cuenta con una superficie de 124 ha y se encuentra dividido en lotes donde se realizan distintos cultivos de invierno y verano siguiendo un esquema de rotación. Además, en el predio se realizan ensayos de cultivos y actividades de docencia e investigación a menor escala.

El suelo pertenece a la serie Tezanos Pinto. En la Tabla 1 se resumen algunas propiedades edáficas determinadas a campo que presenta el horizonte superficial (Ap) en las diferentes posiciones dentro del paisaje.

Los datos meteorológicos corresponden al observatorio agrometeorológico de INTA Paraná ubicado a 11 km en dirección NE del predio a Latitud: 31° 50' S - Longitud: 60° 32' O, Elevación 105 m s.n.m. Se obtuvieron los datos diarios de precipitación (mm), radiación global (MJ/m<sup>2</sup>), temperaturas máxima y mínima (°C), humedad



**Figura 1:** Ubicación del Campo Roldán –FCA UNER en el departamento Diamante de la Provincia de Entre Ríos, Argentina (Google Earth, 2018)

**Tabla 1:** Propiedades edáficas del horizonte superficial Ap en loma, media loma y bajo (CC: capacidad de campo, PMP: punto de marchitez permanente y Dap: densidad aparente).

Posición topográfica	Profundidad (cm)	D <sub>ap</sub> (Kg /m <sup>3</sup> )	CC (%)	PMP (%)
Loma	20	1,47	27,39	15,62
Media loma	18	1,41	28,69	14,96
Bajo	22	1,34	29,37	15,73

relativa (%) y velocidad de viento (m/s), durante el período comprendido entre el 1° de septiembre de 2017 al 31 de agosto del 2018. A partir de estas observaciones se obtuvo la precipitación (Pp) y la evapotranspiración (ETo) - mediante el método de Penman Monteith modificado por FAO (Allen, *et al.*, 1998) - acumuladas en el período de 10 días. También se contó con un relevamiento altimétrico con GPS del campo experimental para generar un modelo digital de elevación (MDE).

El predio fue representado con una resolución de 10 m x 10 m de tal manera que las variables conformaron capas raster con esas dimensiones de los píxeles. La profundidad de suelo considerada fue de 20 cm puesto que a la fecha no se cuentan con datos a mayor profundidad.

La humedad de suelo, que se analizó en ésta etapa hasta los primeros 20 cm de profundidad, fue estimada mediante un balance hidrológico decádico con un procedimiento similar a la metodología propuesta por (Basualdo y Occhiuzzi, 2005).

Se generó el MDE con la resolución mencionada y se utilizó para obtener el índice topográfico (TPI) (Figura 2) que es apto para la clasificación de geoformas. Con éste índice es posible definir la posición topográfica de 'loma', 'media loma' y 'bajo' que poseen las propiedades de CC y PMP que se indican en la Tabla 1. Los valores positivos de TPI indican que la elevación de un píxel es mayor que la de sus vecinos, valores negativos indican que es más baja y cercanos a cero podrían corresponder a un área llana o de media ladera, por lo que la pendiente se puede utilizar para distinguir la posición o la categoría de la geoforma. En este trabajo se asignaron las categorías de 'loma' (TPI > 0,7), 'media loma' (-0,8 ≤ TPI ≤ 0,7) y 'bajo' (TPI < -0,8).

Esta caracterización es similar a la propuesta por Weiss (2001) quien advierte que en la definición de los umbrales de las clases se deben

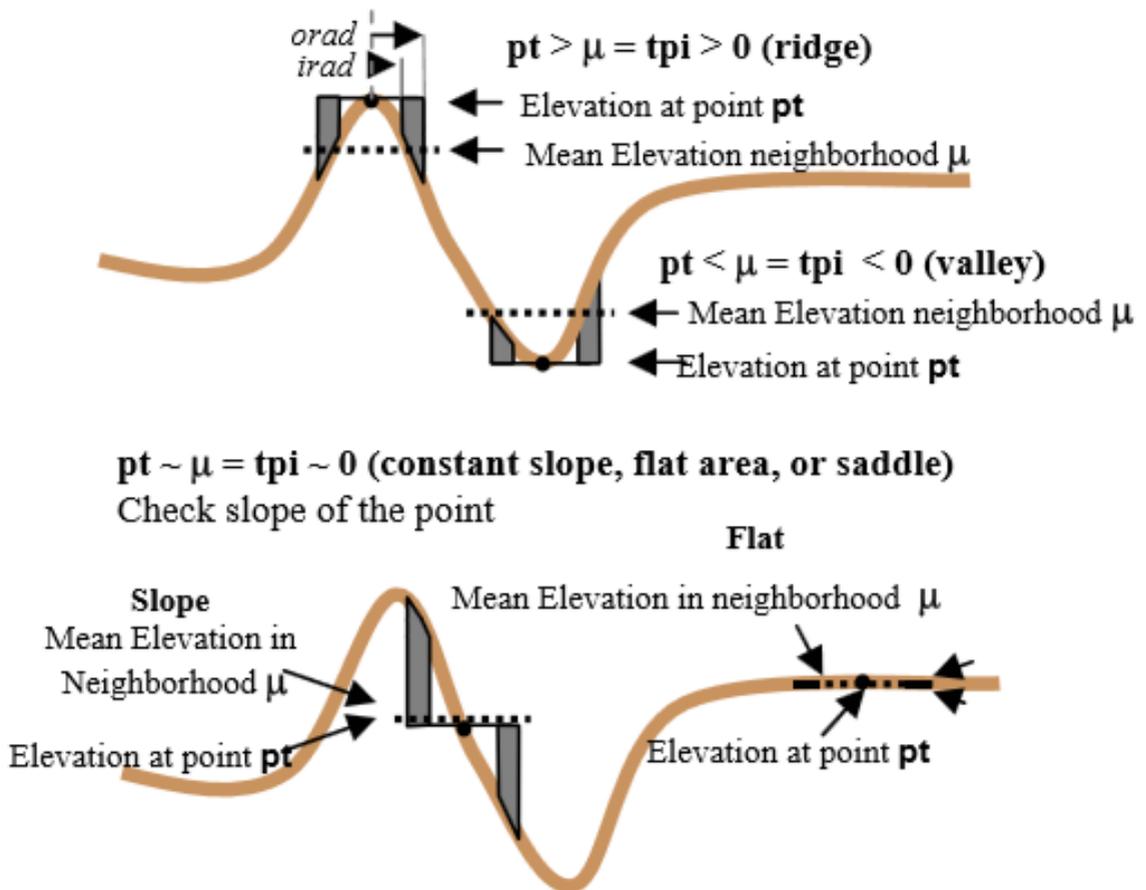


Figura 2. Esquema de la metodología para la obtención del TPI (Weiss, 2001)

tener en cuenta: el paisaje específico, la escala del índice y el problema que se está abordando. El autor sostiene que se podrían ajustar los límites de los intervalos de clase incorporando métricas adicionales como la varianza de la pendiente con la que se pueden definir 6 clases: cresta, pendientes: superior, media o plana, baja y valle.

Teniendo en cuenta el mapa con la clasificación en tres clases se llevó a cabo el cálculo del BH decádico para cada zona topográfica

El procesamiento se realizó en un entorno SIG con las siguientes aproximaciones:

- La precipitación y evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), para el cálculo del almacenamiento de agua en cada período, son uniformes para todos los píxeles.
- El almacenaje de agua se estima en los primeros 20 cm de suelo y se asume que al inicio (1/09/2017) el campo se encontraba en capacidad de campo producto de las lluvias previas.

- Cada sector del campo (loma, media loma y bajo) tiene determinadas constantes hídricas (CC y PMP), densidad aparente (Dap) y profundidad del horizonte Ap.
- Los excesos de agua se extinguen por escurrimiento durante el período de 10 días en el que ocurren
- El escurrimiento superficial sigue el patrón de acumulación de flujo (cantidad de agua que circula por una celda) determinado en función de la configuración tridimensional que presenta el terreno.

### Balance hidrológico decádico.

En la Figura 3 se muestran las componentes consideradas en el balance hídrico ilustrando un píxel típico. El balance se hizo operativo en un entorno SIG mediante la obtención de mapas en formato raster de almacenaje, escurrimiento, percolación y evapotranspiración real.

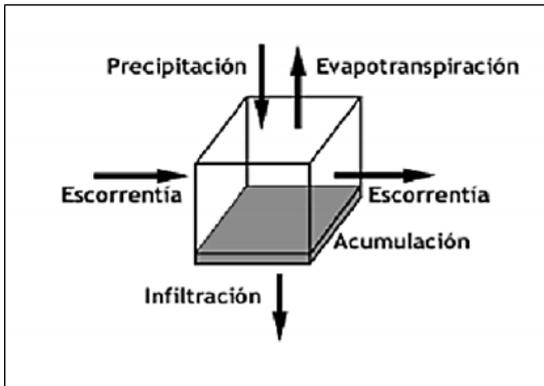


Figura 3. Balance hídrico en una celda (Tomado de Olaya, 2004)

Para cada pixel de la imagen, se aplica el balance hidrológico (BH) y se obtiene para cada período el valor de almacenaje que corresponde a una capa de suelo superficial. El valor de humedad de suelo por pixel, estará comprendido entre CC y almacenaje mínimo. En el modelo de balance utilizado se considera que el almacenaje de agua en un período (t) en la capa superficial de suelo (20 cm), depende de las precipitaciones, evapotranspiración, excesos, escurrimiento y percolación. Utilizando el programa QGIS se generaron los mapas.

Las siguientes variables intervienen en la estimación del almacenaje en el período:

- El límite de desecamiento (LD): que representa una fracción del contenido de agua, que retiene el suelo, por debajo de la cual la evaporación y la percolación no ocurren o son despreciables. Se aplica para valores entre 0 –suelos arenosos de poca retención- y 1 –suelos arcillosos-. (ecuación 1)

$$LD = [(PMP/CC) - 0.4] * 2.5 \quad (1)$$

Dónde:

PMP: punto de marchitez permanente y;

CC: capacidad de campo.

- Almacenaje mínimo ( $ALM_{min}$ ): es un valor inferior al PMP, que se asume como el umbral inferior de desecamiento que podría ocurrir.

$$ALM_{min} = LD * PMP \quad (2)$$

- La evapotranspiración real (ETR) es estimada en función de las condiciones del almacenaje del período anterior ( $ALM_{t-1}$ ) y de

la evapotranspiración de referencia (ETot). ETR es máxima si  $ALM_{t-1} = CC$  y decrece a medida que almacenaje disminuye según la siguiente relación empírica:

$$ETR(t) = ETo * ALM(t-1) / CC \quad (3)$$

- El escurrimiento superficial asociado normalmente a las precipitaciones (PP), especialmente cuando son moderadas o abundantes, se estima de acuerdo con la precipitación del período (PPt), un coeficiente de escurrimiento (CE) y la capacidad de infiltración del suelo (CI):

$$ESC(t) = CE * (PP(t) + EXC(t-1)) \exp [-CI / (PP(t) + EXC(t-1))] \quad (4)$$

si  $EXC(t-1) \neq 0$  ó  $PP(t) \neq 0$

$$ESC_t = 0 \quad (4)$$

si  $EXC(t-1) = 0$  y  $PP(t) = 0$

$$CI_t = CC - ALM(t-1) \quad (5)$$

Este valor de CI corresponde a la cantidad de agua en mm que podría admitir el suelo hasta llegar a capacidad de campo.

Se consideró que el coeficiente de escurrimiento  $CE=0,3$  es representativo para las condiciones del campo en cuanto a pendiente, composición y poca cobertura vegetal y fue derivado del trabajo de Mahmoud y Alazba (2015).

En el esquema utilizado para establecer el almacenamiento de agua en el suelo por períodos de diez días, se consideró un término que corresponde a la infiltración profunda o percolación (PER). Representa un valor que depende del tipo de suelo y de la humedad inicial. Se supone que la percolación es máxima cuando se alcanza la capacidad de campo, disminuye cuando la humedad del suelo es inferior a CC y tiende a un umbral (UI). Por debajo de UI la percolación es considerada nula.

$$UI = PMP + 0,5 * (CC - PMP) \quad (6)$$

También Basualdo y Occhiuzzi (2005) indican que el coeficiente de percolación (CP) se calcula teniendo en cuenta el porcentaje de arcilla (X) y la profundidad de la capa de suelo considerada (Y) en mm según:

$$CP = 5,32 * X - 1,042 / Y \quad (7)$$

Los datos de porcentaje de arcilla del horizonte superficial para la serie Tezanos Pinto necesarios

para el cálculo fueron obtenidos por Picotti (2010). A partir de esto se estima la percolación como:

$$PER(t) = CP * (ALM(t-1) - UI) \quad (8)$$

Cuando  $UI \leq ALM \leq CC$  y nula en otro caso.

Se plantea un balance hidrológico por períodos de 10 días cuyo resultado posibilita determinar el almacenamiento (ALMt) teniendo en cuenta los componentes descritos

$$ALM(t) = ALM(t-1) + PP(t) - ETR(t) - ESC(t) - PER(t) \quad (9)$$

Se asume que  $ALMt = CC$  cuando la cantidad de agua acumulada iguala o supera a  $CC$  y  $ALMt = UI$  cuando hay desecamiento y el valor según (9) resulta inferior a  $UI$ .

Como se indicó se elaboró un MDE con resolución espacial de 10 m x 10 m y se obtuvieron los siguientes productos: índice de posición topográfica (TPI) y un mapa de acumulación de flujo (MAF). El MAF representa en una grilla de datos el aporte de agua que recibe una celda determinada. Significa el número de píxeles que vuelcan el agua hacia la celda en cuestión (Figura 4).

Las celdas con acumulación de flujo nula o muy baja están asociadas localmente a mayores alturas topográficas y ayudan a identificar crestas. El mapa representa la cantidad de agua de lluvia que puede fluir por cada celda, asumiendo los excedentes se convierten en escorrenría,

compensan la evapotranspiración o la variación de almacenaje.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El MDE del campo (Figura 5) indica que la superficie presenta una variación en la elevación de aproximadamente 20 metros entre las zonas más altas (rojos) y las zonas más bajas (azules). Las curvas de nivel presentan una variación relativamente suave dando lugar a pendientes suaves con laderas largas.

El índice TPI (Figura 6), derivado del DEM, toma valores entre -1,5 a 1,6. De acuerdo a Weiss (2001), valores negativos indican zonas bajas dentro del área de estudio (en color rojo); valores positivos reflejan zonas de loma (en color verde); mientras que valores próximos a cero, representan zonas de media loma (colores naranja, amarillo y verde claro).

Este índice pone de manifiesto una de las características más importantes de la región en cuanto a su topografía ondulada. La delimitación de zonas de loma, media loma y bajo se muestran en la Figura 7.

El balance hidrológico propuesto en este trabajo de acuerdo a las pautas establecidas, da como resultado el almacenaje de agua en el suelo en cada período de diez días; como así también estimaciones de escurrimiento, percolación y evapotranspiración. La marcha de la humedad de suelo a 20 cm de profundidad durante el período evaluado en cada sitio correspondiente a loma, media loma y bajo da cuenta de una época

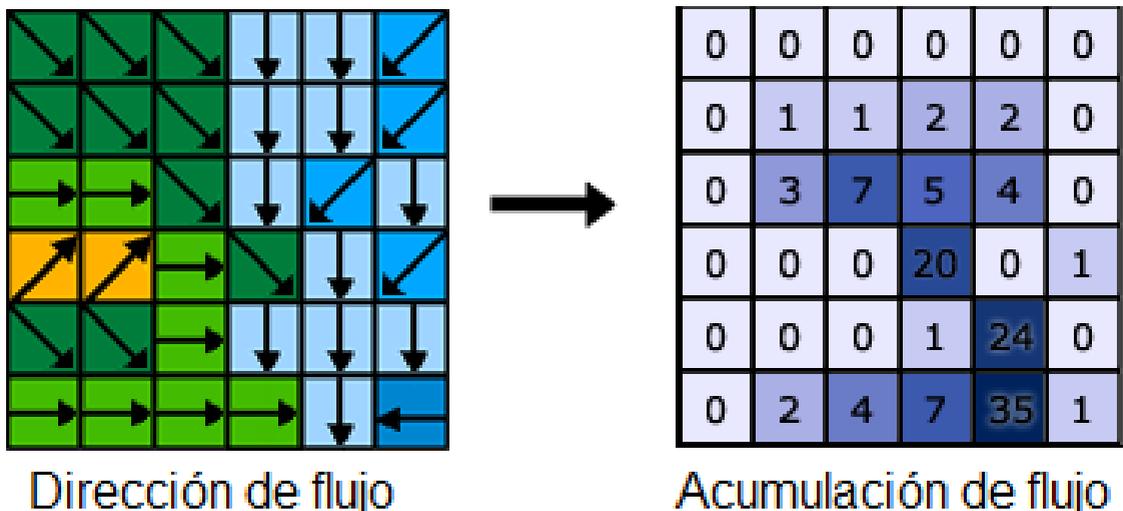


Figura 4. Cuadrícula indicando el esquema de la dirección y acumulación de flujo (Esri, 2014)

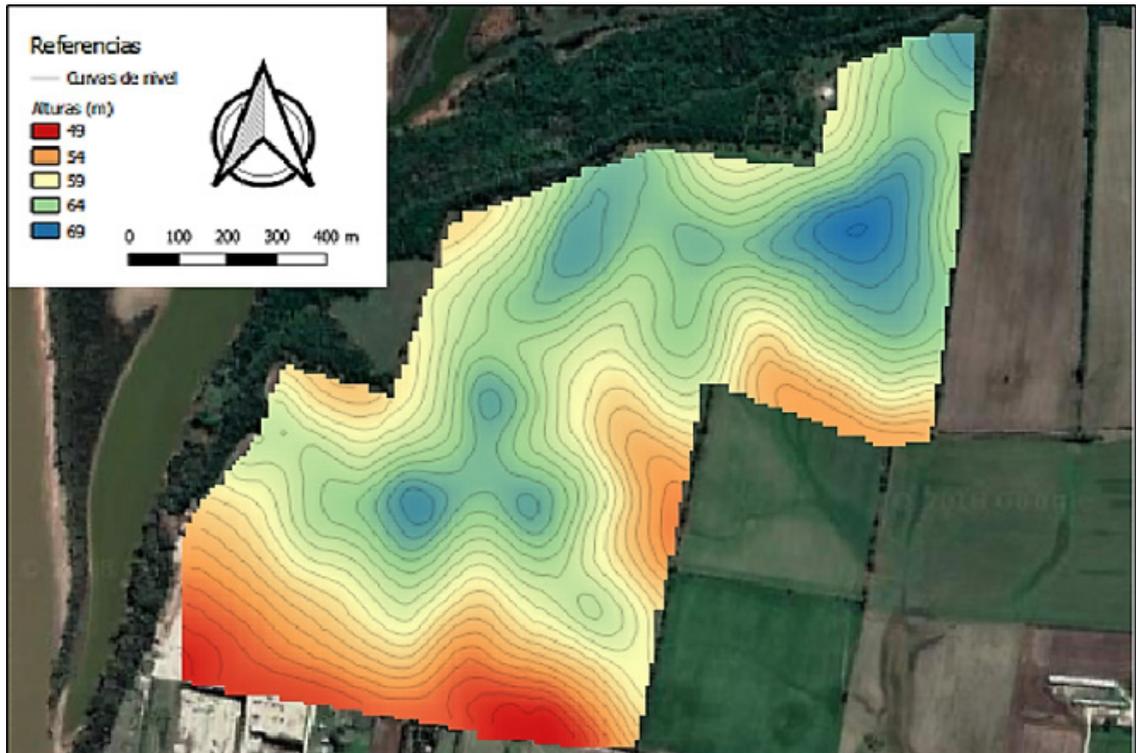


Figura 5. MDE y curvas de nivel del campo de la FCA.

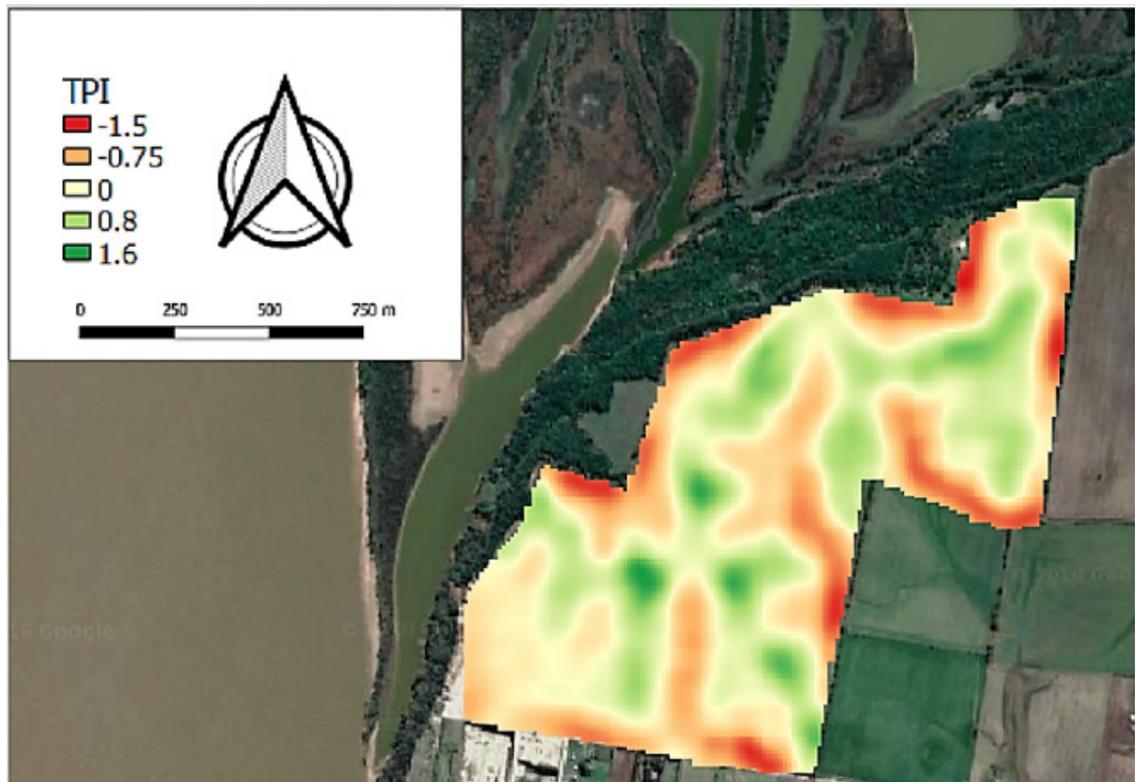
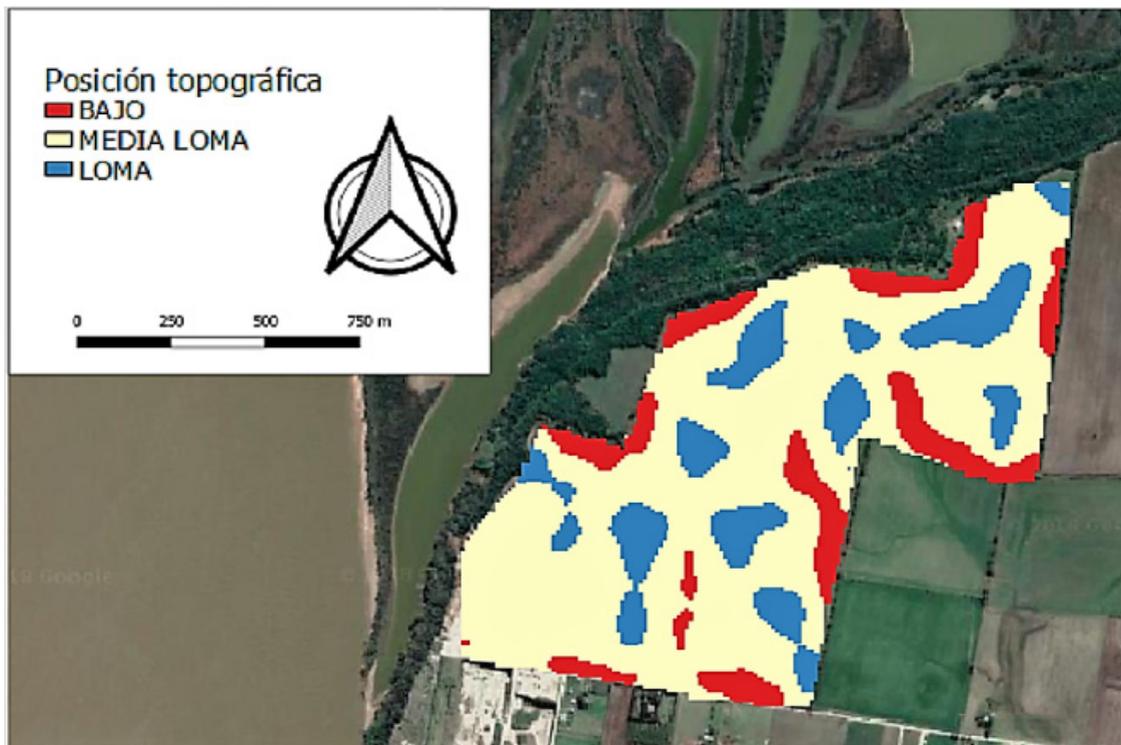


Figura 6. Índice de Posición topográfica (TPI) del área de estudio



**Figura 7.** Clasificación de zonas; loma, media loma y bajo a partir del TPI

húmeda en la que se alcanza CC –última década de abril y primera de mayo- y otra más extensa – entre el 15/12/17 y el 15/03/18- con valores mínimos de humedad que llegan al umbral inferior de cada clase (Figura 8)

Si se compara para las tres clases topográficas el almacenaje de cada período respecto al valor de PMP, se verifica que en pocas oportunidades (un 20% de casos) iguala o supera el PMP. Una de esas situaciones ocurrió desde el 31/10/17 al 09/11/17 que se representa en el mapa de humedad de suelo superficial de la Figura 9.

En este período se incorpora al suelo parte de la lluvia, el resto forma parte del excedente. Como a su vez hay evapotranspiración, percolación y escurrimiento no se alcanza la capacidad de campo al final de ese período. Naturalmente el agua que escurre desde los sectores más altos hacia los más bajos, tiende a acumularse siguiendo un recorrido y da lugar a un mapa de acumulación de flujo. Por lo tanto es posible esperar que en algunas áreas, aguas abajo del campo, este aporte incremente la humedad del suelo hasta llegar a CC e incluso producir encharcamiento. Para analizar esa situación se generó, a partir del MDE, el MAF que se muestra en la Figura 10.

En éste trabajo el MAF se utiliza para describir el

escurrimiento superficial ya que señala claramente las celdas por las que fluye el agua y delimita las celdas que reciben, por este mecanismo, mayor aporte. Se observa que los menores valores de acumulación de flujo se ubican en zonas altas del campo.

Se postula que el escurrimiento superficial además de acumularse, de acuerdo con el MAF, incrementa la humedad de las celdas que se encuentran en el recorrido del flujo. Para simular este proceso se recalculó el almacenaje en todas las celdas, para el período del 30/10/17 al 9/11/17 ya indicado, considerando los aportes que pueden ocurrir del escurrimiento de píxeles vecinos. En este caso exploratorio se postula el supuesto de que sólo una parte (10%) del escurrimiento superficial de cada celda es retenida por el suelo si se encuentra por debajo de CC. El almacenaje modificado (ALMmod) se estima de la siguiente manera:

$$ALM(t)_{mod} = ALM(t) + 0.1 * ESC(t) * MAF \quad (10)$$

El mapa resultante se presenta en la Figura 11 que puede ser confrontada con la situación presente en la Figura 8. Como se desprende de la comparación de dichas figuras la humedad de

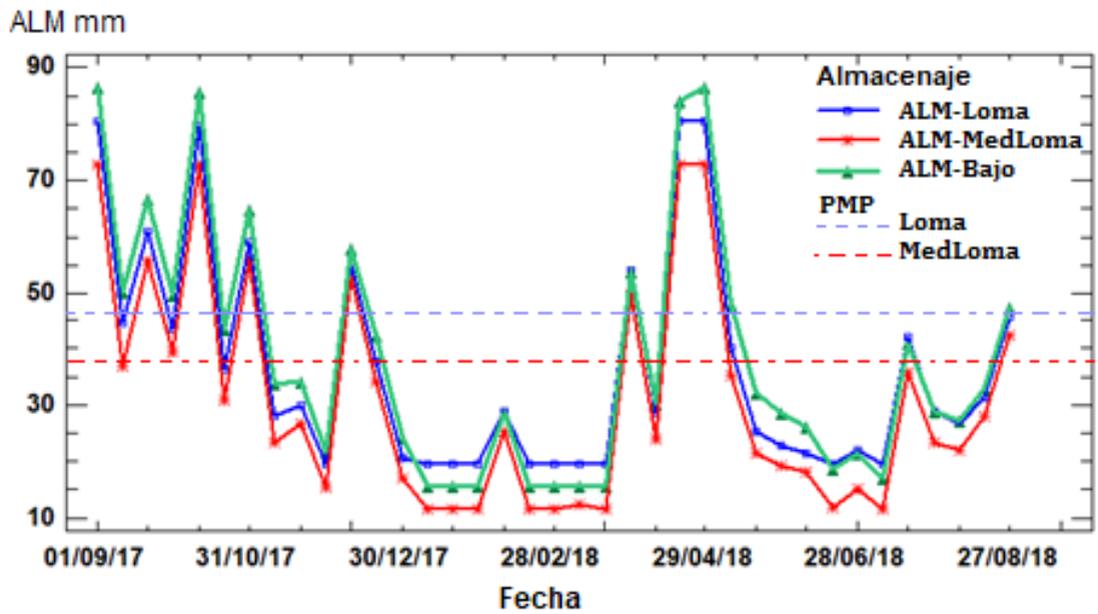


Figura 8. Evolución del almacenaje de agua en el suelo superficial en las 3 condiciones topográficas.

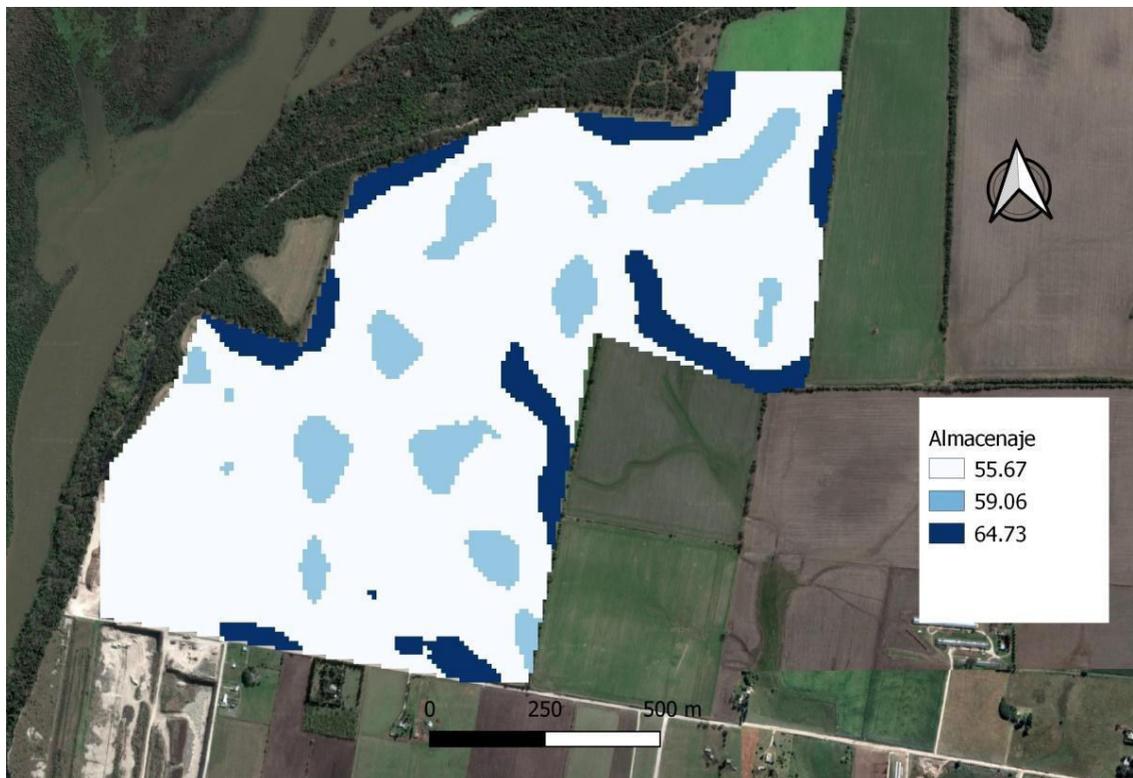


Figura 9. Almacenaje de agua en la capa de suelo superficial (20 cm) en el período 31/10/17 al 09/11/17

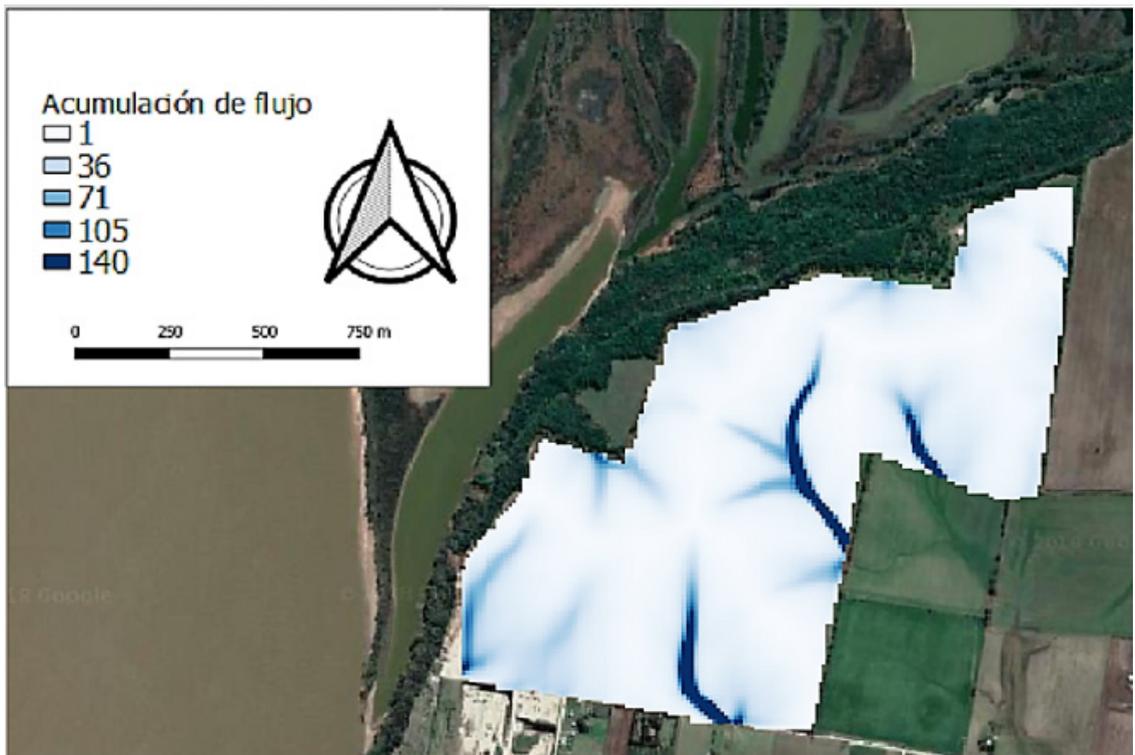


Figura 10. Mapa de acumulación de flujo

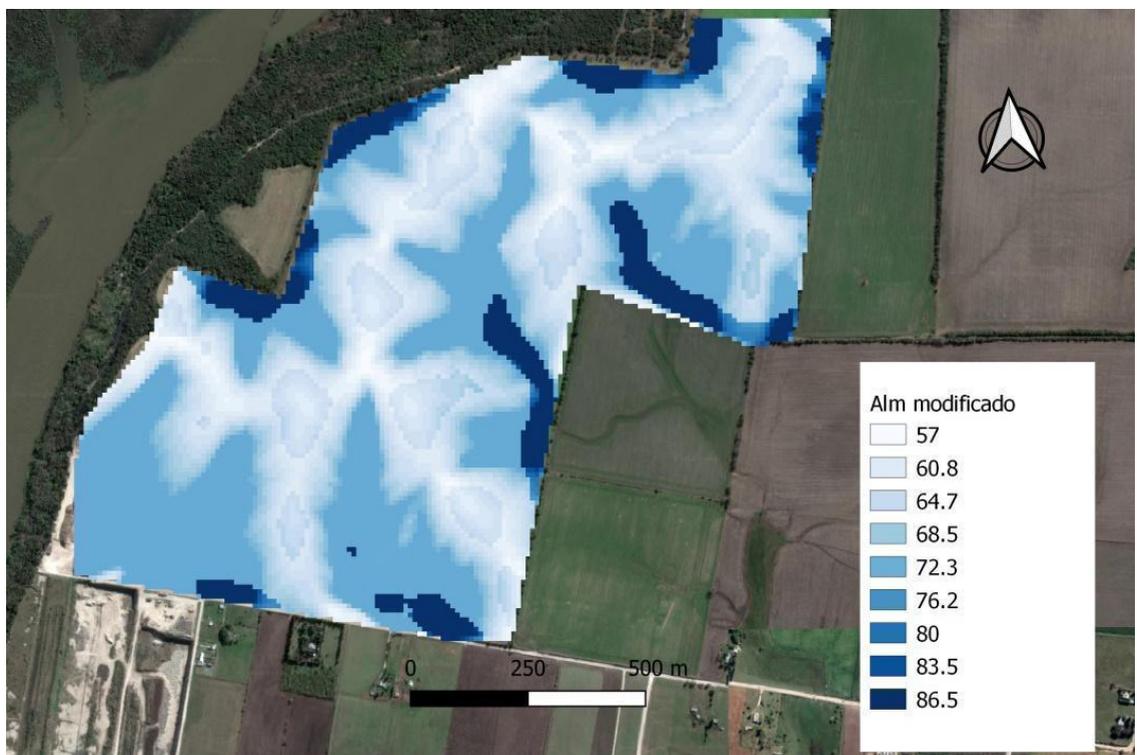


Figura 11. Almacenaje modificado teniendo en cuenta el escurrimiento y el mapa de acumulación de flujo para el período 31/10/17 al 09/11/17

suelo se incrementa en los lugares donde hay más acumulación de flujo y no hay cambios importantes en áreas de loma.

El almacenaje de agua en el horizonte Ap, en correspondencia con el mapa de acumulación de flujo, pone en evidencia que la distribución espacial de la humedad de suelo sería diferente de la que resulta de aplicar el balance convencional.

En condiciones húmedas intermedias -como ésta- el escurrimiento favorece la acumulación de mayor contenido de agua en el bajo y en sectores de la media loma próximos al bajo. Si bien en el bajo tiene mayor capacidad de admitir una cantidad de agua hasta llegar a capacidad de campo, como indica el CI de cada clase, es factible que se alcance CC y lo propio ocurra con secciones de media loma.

Puesto que toda herramienta de simulación debe ser evaluada en su capacidad predictiva y precisión antes de ser usada, y al no contar con datos de humedad de suelo suficiente obtenidos a campo para verificar los resultados del modelo de balance localizado, se deja de manifiesto la necesidad de corroborar las estimaciones del balance a partir de datos observados de humedad.

## CONCLUSIONES

Se realizó una adaptación al método de balance hidrológico que utiliza la Oficina de Riesgos Agropecuarios a los efectos de estimar las entradas, salidas y la acumulación de agua del suelo para un período de 4 meses en 2017 y 8 en 2018. El balance hidrológico, que computa la dinámica del agua en períodos de diez días, tiene la particularidad de diferenciar las características topográficas -como loma, media loma y bajo- con sus respectivas constantes hídricas, de un predio agrícola.

La integración de un mapa de acumulación de flujo con el escurrimiento superficial da cuenta de los cambios de la humedad de suelo que presentan especialmente los sectores más bajos del predio, variación que pasaría desapercibida por el balance de agua utilizado habitualmente.

## BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R.G.; L.S. Pereira; D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1998.
- Basualdo, A. y S. Occhiuzzi, 2005. Balance hídrico aplicado a la elaboración de mapas de riesgo agroclimático. Actas del Congremet IX en CD. CONGREGMET IX. Buenos Aires, Argentina. 3-7 Octubre 2005.
- Castro Franco, M., Peralta, N., Domenech, M., & Costa, J. 2012. Relación cuantitativa entre atributos topográficos y rendimiento. Inta.Gob.Ar, 1–8. [http://inta.gob.ar/documentos/relacion-cuantitativa-entre-atributos-topograficos-rendimiento/at\\_multi\\_download/file/INTA-Relación atributos topográficos y rendimiento.pdf](http://inta.gob.ar/documentos/relacion-cuantitativa-entre-atributos-topograficos-rendimiento/at_multi_download/file/INTA-Relación atributos topográficos y rendimiento.pdf) (Consultada el 4/03/2019).
- Dyer, J. M., 2009. Assessing topographic patterns in moisture use and stress using a water balance approach. *Landscape Ecology*, 24(3), 391-403.
- ESRI, 2014. Cómo funciona Acumulación de flujo. <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-accumulation-works.htm> (Consultada el 12/03/ 2019).
- Fernández Long, M. E., Spescha, L., Barnatán, I., & Murphy, G., 2012. Modelo de balance hidrológico operativo para el agro (BHOA). *Rev. Agronom. Ambiente*, 32(1-2), 31-47.
- Flores, H. E., & Ruiz, J. A., 1998. Estimación de la humedad del suelo para maíz de temporal mediante un balance hídrico. *Terra Latinoamericana*, 16(3).
- Google Earth Pro, 2018. Imagen del área de estudio. Recuperado de: Google EarthPro el 10/08/2018.
- INTA y Gobierno de Entre Ríos, 1991. Plan Mapa De Suelos. Carta de Suelos de la República Argentina. Departamento Diamante, Provincia de Entre Ríos. Serie Relevamiento de Recursos Naturales N° 9, (ISSN 0325 9099), 258 pp.
- Kravchenko, A.N.; Bullock, D.G., 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92(1): 75-83.
- Kravchenko, A.N.; Bullock, D.G. 2002. Spatial variability of soybean quality data as a function of field topography. *Crop Science*. 42(3): 804-815.
- Kravchenko, A.N., Robertson, G.P., Thelen, K.D., Harwood, R.R., 2005. Management, topographical, and weather effects on spatial variability of crop grain yields. *Agron. J.* 97(2): 514-523
- Leiva Gutiérrez, N. 2012. Metodología para el cálculo de la humedad del suelo usando parámetros topográficos (MDE), climáticos y edáficos en un sector del piedemonte deposicional del municipio de Villavicencio (Disertación Doctoral, Universidad Nacional de Colombia).
- Mahmoud, S. H., Mohammad, F. S., & Alazba, A. A., 2014. Determination of potential runoff coefficient for Al-Baha Region, Saudi Arabia using GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(5), 2041-2057.

- Olaya, V., 2004. Hidrología computacional y modelos digitales del terreno. Teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico, 391 pp.
- Parker, A. J., 1982. The topographic relative moisture index: an approach to soil-moisture assessment in mountain terrain. *Physical Geography*, 3(2), 160-168.
- Picotti, E. 2010. Perfiles hídricos de suelos de la provincia de Entre Ríos. Su relación con la textura. Pp 32 Tesis de grado FCA UNER, Oro Verde, Entre Ríos.
- Qiu, Y., Fu, B., Wang, J., & Chen, L., 2001. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of hydrology*, 240 (3-4), 243-263.
- Schaake, J. C., Koren, V. I., Duan, Q. Y., Mitchell, K., & Chen, F., 1996. Simple water balance model for estimating runoff at different spatial and temporal scales. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D3), 7461-7475.
- Teuling, A. J., Uijlenhoet, R., Hupet, F., Van Loon, E. E., & Troch, P. A., 2006. Estimating spatial mean root-zone soil moisture from point-scale observations. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(4), 1447-1485.
- USDA-SCS, 1968. A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watershed. Scs. Pp 149.
- Wang, Q. J., Pagano, T. C., Zhou, S. L., Hapuarachchi, H. A. P., Zhang, L., & Robertson, D. E., 2011. Monthly versus daily water balance models in simulating monthly runoff. *Journal of hydrology*, 404(3-4), 166-175.
- Weiss A., 2001. Topographic position and landforms analysis. In Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA (Vol. 200).