

# CARACTERIZACIÓN EDÁFICA Y TOPOGRÁFICA PARA LA DETERMINACIÓN DE AMBIENTES EN FUNCIÓN DEL AGUA DISPONIBLE

Tóffoli, M.B.<sup>1,\*</sup>; Hernandez, J. P. <sup>2</sup>; Kinderknecht, L. E.<sup>1</sup>; Befani, M. R.<sup>2</sup>; Bressan, M.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo Cli.M.A. FCA-UNER.

<sup>2</sup>Cátedra de Edafología y Laboratorio de Suelos. FCA-UNER. Ruta Prov. Nº11, Km 10,5. CP 3100, Oro Verde, Paraná, Entre Ríos. República Argentina. Tel.: 0343-155041604.

Autor para correspondencia: betiana.toffoli@fca.uner.edu.ar

## RESUMEN

Conocer el contenido de agua disponible en el suelo es un factor de fundamental importancia para predecir los rendimientos de los cultivos, como así también definir estrategias de manejo que utilicen de manera eficiente los recursos. El objetivo del trabajo fue caracterizar hidrológicamente los perfiles de suelo en función de la posición topográfica, utilizando sistemas de información geográfica, un modelo digital de elevación (MDE) e índices topográficos derivados; con el fin de establecer relaciones entre los índices topográficos y las características hidrológicas de los perfiles estudiados. El presente trabajo se realizó en el campo Experimental de la Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER, ubicado en Colonia Ensayo, Entre Ríos. El mismo se inserta sobre un paisaje de peniplanicie suavemente ondulada, el suelo pertenece a un Argiudol ácuico, serie Tezanos Pinto siendo la serie dominante y un Argiudol rendólico determinado como La Juanita, ocupando una superficie minoritaria. A partir de datos de un MDE se obtuvieron índices de posición topográfica (TPI) y humedad topográfica (TWI) utilizados para delimitar las diferentes posiciones en el paisaje (loma, media loma y bajo) a partir de valores umbrales. Posteriormente se realizaron calicatas para caracterizar el perfil de suelo en cuatro posiciones, obteniéndose muestras de suelo de cada horizonte para determinar densidad aparente (DAP), capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y clase textural, con el fin de conocer el contenido de agua útil. Se observó un mayor contenido de agua útil al metro de profundidad para el bajo (209,86 mm), decreciendo hacia la media loma (204,32 mm) y loma (176,65 mm), en los suelos de la serie Tezanos Pinto. En la serie La Juanita, ubicada en tres lomas de cota mayor a 64 msnm, se encontró el menor contenido de agua útil (146,15 mm). De esta manera se caracterizaron diferentes ambientes productivos en función de su posición topográfica, pudiendo delimitar cuatro zonas dentro del campo, con diferente contenido de agua útil, siendo este aporte de importancia para la agricultura de precisión.

**Palabras Clave:** Entre Ríos, modelo digital de elevación, perfil de suelo, agua útil

## ABSTRACT

### EDAPHIC AND TOPOGRAPHIC CHARACTERIZATION FOR THE DETERMINATION OF ENVIRONMENTS BASED ON AVAILABLE WATER

Knowing the amount of available water in the soil is an essential factor for estimating crop yields. It is also significant, to define management strategies that use resources efficiently. The main objective of the present work was to characterize the hydrologic aspects of the soil profiles based on the topographic

position, using geographic information systems, a digital elevation model (DEM) and derived topographic indexes; in order to determine the available water by the relationships of topographic indexes and the hydrologic characteristics of the profiles studied. This work was carried out in the experimental field of the Facultad de Ciencias Agropecuarias, UNER, located in Colonia Ensayo, Entre Ríos. The field is inserted on a gently undulating peneplain landscape. The soil belongs to an aquic Argiudol determined as Tezanos Pinto, being the dominant series, and a rendolic Argiudol determined as La Juanita, which occupies a minor surface. From data of the DEM, we obtained topographic position indexes (TPI) and topographic wetness indexes (TWI), which were used to delimit the different positions in the landscape (hilltop, middle slope and footslope) from threshold values. Subsequently, pits were made to characterize the soil profile in four positions, obtaining soil samples from each horizon to determine the bulk density (DBH), field capacity (CC), permanent wilting point (PMP) and textural class, in order to know the available water content. Higher content of available water was observed at a meter depth for the footslope (209.86 mm), decreasing towards the middle slope (204.32 mm) and hilltop (176.65 mm), in the soils of the Tezanos Pinto series. Besides, in the La Juanita series, located on three slopes of higher bounds, 64 meters above sea level, the lowest available water content was found (146.15 mm). In this way, different productive environments were characterized based on their topographic position. Thus, four zones within the field were delimited with different available water content, which is an important contribution to precision agriculture.

**Keywords:** Entre Ríos, digital elevation model, soil profile, available water

## Introducción

En cultivos de secano, la disponibilidad y distribución espacial del agua acumulada en el perfil determina en gran medida la variabilidad de los rendimientos en grano de los cultivos (Abbate *et al.*, 1997). Por lo tanto el agua disponible en el suelo resulta un factor de fundamental importancia tanto para predecir el rendimiento de los cultivos como para definir estrategias de manejo que utilicen de manera eficiente los recursos. La capacidad de un suelo de almacenar agua depende en gran parte de factores propios del suelo como lo son: la textura, estructura, contenido de materia orgánica, mineralogía y profundidad a la que el agua es retenida (Conti, 2000); y de factores externos, como la topografía. La presencia de materiales texturales finos con preponderancia de limos y arcillas junto con la posición en el paisaje son los factores claves que determinan que exista

una alta heterogeneidad en la disponibilidad de agua en el suelo a nivel de lote. Según investigaciones realizadas por Pachepsky *et al.* (2001) se encontró una alta relación de variables topográficas con la retención de agua en el suelo. Autores como Kravchenko y Bullock (2000) y Kaspar *et al.* (2003) estudiaron la relación de la topografía con el rendimiento de los cultivos encontrando que a escala de lote, la topografía puede definir la variabilidad de la humedad, el contenido de materia orgánica, nutrientes, composición textural, entre otras propiedades del suelo. La disponibilidad de tecnologías geoespaciales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y GPS de alta precisión para obtener información sobre la topografía del terreno, han posibilitado el análisis digital del terreno a través de los modelos digitales de elevación (DEM), que caracterizan el relieve en forma cuantitativa, siendo un insumo importante

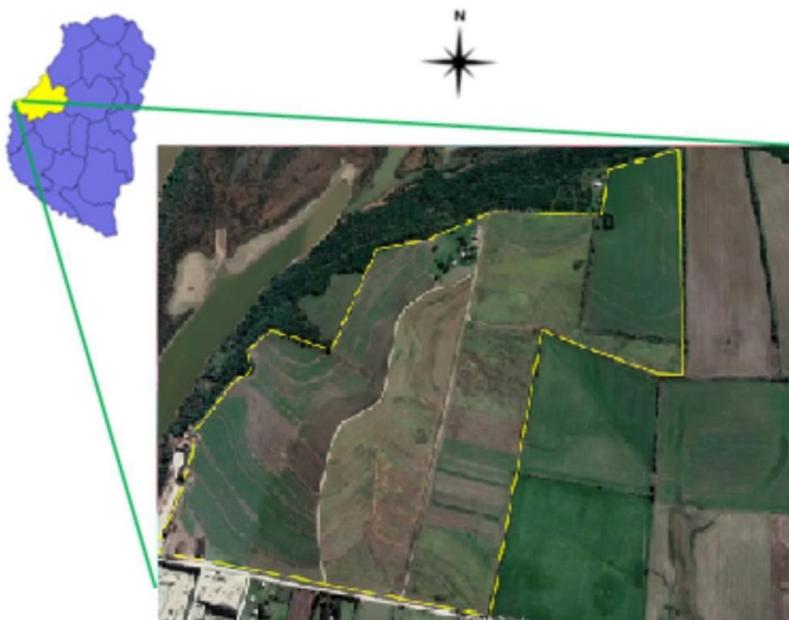
para relacionarlo con factores edáficos y climáticos (Leiva Gutiérrez, 2012). A partir del DEM es posible elaborar índices, como el Índice de posición topográfica (TPI), el mismo es indicador de geoformas, compara la elevación de cada celda en un DEM con un valor promedio de elevación de un área específica adyacente a dicha celda (Weiss, 2001). Otro índice, derivado del DEM y relacionado con la humedad del suelo es el Índice de humedad topográfica (TWI) (Beven y Kirkby, 1979), que relaciona el área de captación o acumulación de flujo de una celda con la pendiente de la misma. Esta variable es un atributo compuesto del terreno que proviene de dos primarios, calculados directamente del DEM (Marques Da Silva; Silva, 2008). El índice de humedad TWI está relacionado con la humedad del suelo y refleja la tendencia del mismo a la generación de escorrentías. Así pues, cuanto más elevado sea el TWI, mayor humedad debe presentar la celda en función de su configuración topográfica (Peckham, 2009). Los objetivos del trabajo fueron, caracterizar hidrológicamente

los perfiles de suelo en dos series de suelo en el Departamento Diamante de la provincia de Entre Ríos según la posición topográfica (loma, media loma y bajo) y determinar la composición textural y agua disponible. Se busca establecer relaciones entre los índices topográficos y las características hidrológicas de los perfiles estudiados en función del contenido de agua útil disponible generando un mapa que delimite ambientes productivos y permita adecuar estrategias de manejo de cultivos orientadas a la agricultura de precisión.

### Materiales y Métodos

#### Área de estudio

El presente trabajo se desarrolló en el campo experimental "Dr. Ramón J. Roldán" que se encuentra ubicado a 31°51'50"S, 60°34'26"O, en Colonia Ensayo, departamento Diamante, Entre Ríos (Figura 1). Posee una superficie de 124 ha. en las que se desarrolla un esquema de rotación de cultivos de invierno (Trigo y cultivos de cobertura) y verano (soja y maíz) en sistema de siembra directa. El predio se



**Figura 1.** Ubicación Campo de la FCA-UNER "Roldán", Colonia Ensayo, Departamento Diamante, Entre Ríos.

encuentra sistematizado con terrazas para el control de la erosión hídrica y posee caminos internos que dividen lotes de diferente superficie

#### *Modelo digital de elevación e índices derivados*

Para elaborar el modelo digital de elevación (MDE) se utilizaron puntos de altimetría obtenidos a campo. Este relevamiento se realizó con un GPS diferencial (marca TRIMBLE) y el error luego de la corrección del GPS móvil con el fijo, fue menor a 1 cm en los planos X, Y, Z. Dichos puntos fueron luego interpolados con el software Quantum GIS, versión Hannover 3.16 (QGIS, 2021) para generar el MDE de 10 m de resolución espacial. Utilizando el módulo Terrain Analysis del programa SAGA GIS, se generaron el índice de posición topográfica (TPI) y el índice topográfico de humedad (TWI), éste último deriva de atributos primarios como área de captación específica y pendiente. Las imágenes raster generadas, fueron analizadas con el software QGIS. Los estadísticos descriptivos de cada índice se obtuvieron, utilizando la herramienta Estadística de zonas, de la caja de herramientas de procesos. Clasificación de categorías de geoformas utilizando TPI

El TPI genera un mapa de valores continuos, para el análisis geomorfológico es de mucha utilidad definir umbrales para clasificar formas de terreno. Dichos umbrales se definieron a partir del histograma de frecuencias, utilizando como criterio la categorización en percentiles de cinco intervalos. Weiss (2001), establece que valores positivos representan ubicaciones que son más elevadas que sus alrededores (cimas), valores negativos representan ubicaciones que son más bajas que los alrededores (valles), valores cercanos a cero pueden ser áreas planas (con pendiente cerca de cero) o áreas de pendiente constante, donde puede usarse un criterio del ángulo de la pendiente para estimar si se trata de uno o de otro caso.

En este trabajo solo se categorizaron 3 geoformas, de acuerdo a la división del histograma en 5 categorías, las zonas

de media loma y áreas llanas, quedarían comprendidas entre -0,46 y 0,39, los valores superiores a 0,39 quedaron definidos como lomas y valores inferiores a -0,46 como bajos siendo éste rango de valores similares al propuesto por Weiss (2001) que define como planicie y áreas de pendiente media aquellas comprendidas entre valores de  $0,5 > TPI > -0,5$ . Este mismo autor sugiere que "los puntos de interrupción exactos entre las clases se pueden elegir manualmente para optimizar la clasificación para un paisaje y un problema en particular, ya que en la definición de umbrales de clases se deben tener en cuenta: el paisaje específico y la escala del índice y el problema que se está abordando" (Weiss, 2001). Para realizar el mapa de clasificación de zonas, se partió originalmente del mapa de TPI, a partir de éste se definieron los valores umbrales de las tres categorías (loma, media loma y bajo) y se vectorizó la imagen raster utilizando la herramienta de conversión (raster a vector) de QGIS, obteniendo el mapa con las tres zonas especificadas. Sobre ésta nueva imagen vector se delimitó con un nuevo polígono el área circunscripta, determinada como serie La Juanita, para realizar dicha delimitación se tuvo en cuenta el muestreo a campo y se utilizó como límite la curva de nivel de 64 msnm.

#### *Caracterización del perfil de suelo a partir de las geoformas definidas*

Se georreferenciaron puntos en distintas posiciones topográficas para caracterizar el perfil de suelo en loma, media loma y bajo. Luego siguiendo las normas de reconocimiento de suelos de Etchevehere (1976) se procedió a realizar calcatas en tres posiciones del paisaje y caracterizar el perfil hasta el metro de profundidad, para clasificar el suelo de acuerdo a la serie correspondiente. Se determinó la profundidad de cada horizonte y se obtuvieron muestras compuestas por 3 submuestras para determinar densidad aparente (DAP) con el método del cilindro (Baver *et al.*, 1973), Capacidad de Campo (0,33 atm) y Punto de Marchitez Permanente (15 atm) mediante el equipo de Richards (1948).

Se determinó el contenido de agua útil (AU), como la cantidad de agua retenida entre CC y PMP (Conti, 2000), se construyeron los perfiles hídricos en cada posición topográfica. La disponibilidad de agua en el suelo en un momento dado se expresó como humedad gravimétrica (Hg), definida como la masa de agua en relación a la masa de suelo seco de una muestra (Conti, 2000). Se tomaron varias muestras de humedad de suelo (Hg) en tres fechas hasta el metro de profundidad para las distintas posiciones del paisaje. El contenido de arena, arcilla y limo se determinó por análisis granulométrico por sedimentación con la pipeta de Robinson (Page *et al.*, 1982).

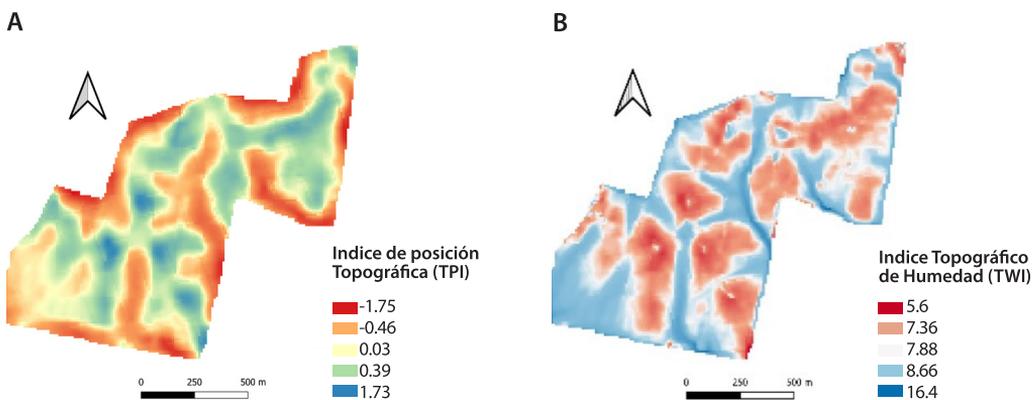
*Índice TWI y humedad de suelo.*

El TWI relaciona el área de captación con la pendiente del terreno, cuando el área de captación se incrementa y el gradiente de pendiente disminuye, el TWI y la humedad de suelo aumentan. Al combinar datos sobre gradiente y área de captación, dicho índice toma en cuenta tanto la geometría de la pendiente local como la localización del sitio en el paisaje (Leiva Gutierrez, 2012). Así pues, “cuanto más elevado sea el TWI, mayor humedad debe presentar la celda en función de su configuración topográfica” (Peckham, 2009).

El mapa de TWI fue generado utilizando el módulo de SAGA Gis, a partir de la metodología propuesta por Mattivi *et al.*, (2019). Una vez obtenido el mapa TWI, fue categorizado por percentiles en 5 intervalos, y se utilizó para comparar con los resultados del agua útil obtenida en cada posición del paisaje. Asimismo también se utilizaron muestras de humedad gravimétrica obtenidas en distintas fechas y posiciones topográficas para comparar con las categorías de TWI y analizar si existe una correspondencia.

**Resultados y Discusión**

Los índices TPI y TWI se presentan en las figuras 2 a y b. La figura 2 a, corresponde al índice TPI. Los valores de TPI presentaron una distribución de frecuencias entre -1,75 y 1,73 con media en -0,04, si a dicha distribución se las categoriza en percentiles de 5 categorías, los umbrales quedan determinados de la siguiente manera: -1,75; -0,46; -0,03; 0,39; 1,73. Los valores positivos indican áreas o regiones que son más altas que sus inmediaciones (por ejemplo, lomas), mientras que los valores negativos representan áreas más bajas que sus espacios circundantes (por ejemplo, bajos), los valores próximos a 0 señalan áreas planas, o de media ladera. La figura 2 b,



**Figura 2.** Índices derivados del DEM a) TPI; b) TWI.

presenta el mapa de TWI, cuya distribución en 5 categorías se puede ver representada en colores en el mapa. La categoría más alta de TWI representada en color azul se corresponde con la categoría más baja de TPI. La tabla 1 muestra los estadísticos descriptivos de los índices para cada posición topográfica según la clasificación anterior.

Los valores de TWI son mayores ( $7,1 > \text{TWI} > 16,4$ ) en las posiciones topográficas de bajo ( $\text{TPI} < -0,46$ ), los resultados de muestreos gravimétricos en distintas fechas, fueron comparados según los rangos de categorías de TWI y se presentan en la Tabla N° 2, dichos resultados muestran una tendencia que indica mayor contenido de humedad en las categorías de TWI más altas.

Caracterización edáfica según posición topográfica

De acuerdo al relevamiento la unidad cartográfica es la Consociación Tezanos Pinto I (Plan Mapa de suelos de la Provincia

de Entre Ríos, 1991), ubicado en un paisaje de peniplanicie disectada con erosión moderada, dicha consociación está formada por dos series: Tezanos Pinto, representando un 80 % de la unidad cartográfica y La Juanita un 20%. Se pudo corroborar mediante el muestreo en las calicatas, que la serie de suelos dominante, corresponde a Tezanos Pinto (Argiudol ácuico), la cual se encuentra en lomas, media loma y bajo. También se encontró como serie minoritaria La Juanita (Argiudol rendólico) ubicada en la zona central del campo, representando solo un 5% de la superficie total. Esta serie se encuentra relegada a tres lomas cercanas entre sí, cuya cota varía entre los 67 y 65 msnm y en cotas menores a 64 msnm se pierde toda evidencia de la misma. Se observó, asociada a esta última serie, concreciones de carbonato de calcio en superficie y hasta los 19 cm de profundidad (Figura 3).

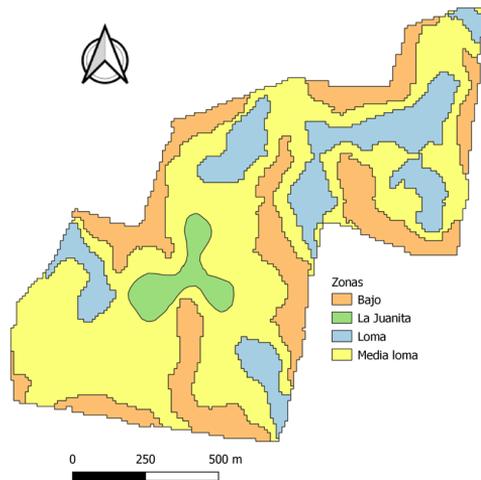
Según Conti (2000) "el relieve es uno de

**Tabla 1.** Estadísticos de los índices TPI y TWI, según zonas topográficas

Zonas	Índices	Valor mínimo	Valor máximo	Media	Desvío estándar
Lomas	TPI	0,4	1,7	0,9	± 0,12
	TWI	5,6	9,3	7,1	± 0,34
Media Loma	TPI	-0,4	0,4	0,1	± 0,09
	TWI	7,6	12,0	7,6	± 0,28
Bajo	TPI	-1,7	-0,4	-1,0	± 0,12
	TWI	7,1	16,4	9,8	± 0,92

**Tabla 2.** Humedad gravimétrica promedio (%) hasta los 100 cm de profundidad. Serie Tezanos Pinto

Categoría TWI	20/9/2018	24/10/2018	11/03/2019
5,6-7,36	26,42	24,75	20,59
7,36-7,88	28,45	27,44	23,79
7,88-8,66	s/d	s/d	24,69
8,66-16,4	33,00	31,79	s/d



**Figura 3.** Mapa de clasificación de zonas según valores umbrales de TPI y Serie La Juanita

los factores formadores de suelo, que en igualdad de condiciones climáticas y de material original, va a determinar según la posición en el paisaje perfiles con zonas poco desarrolladas, zonas normales y zonas hiperdesarrolladas que son loma-media loma y bajo respectivamente". Esto se debe fundamentalmente al efecto de la pendiente en la distribución del agua de lluvia la cual generará escurrimiento en las zonas altas con arrastre de agua y material superficial y subsuperficial que se depositará en las zonas bajas (Conti, 2000).

Según Tassi, (2009) los suelos Molisoles con un horizonte argílico fuertemente desarrollado y pendientes de hasta el 4% presentan una erosión mayor que otros molisoles con B2 textural muy fuertemente desarrollados tienen una capacidad de infiltración muy reducida, pero en relieves de pendientes más suaves. Kinderknecht *et al.*, (2019) pudieron concluir luego de simular un balance hidrológico seriado que incorpora el escurrimiento superficial en función de un mapa de acumulación de flujo,

que en condiciones húmedas intermedias, 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 una capacidad de admitir una mayor cantidad de agua hasta llegar a capacidad de campo y lo propio ocurra con secciones de media loma. Esta metodología de balance en un entorno SIG, da cuenta de los cambios de la humedad de suelo que presentan especialmente los sectores más bajos del predio, requiriendo dicho modelo la validación con datos a campo.

Los distintos perfiles encontrados y sus constantes hídricas se presentan en la Tabla 4. La Serie Tezanos Pinto presentó mayor contenido de agua útil en el perfil en las tres posiciones en el paisaje. La serie La Juanita, por el mayor contenido de fracción fina determinó valores más elevados de CC y PMP y menor densidad aparente. Teniendo en cuenta la posición en el paisaje, en la serie Tezanos Pinto, es posible observar mayor capacidad de agua útil en los bajos decreciendo hacia la media loma y loma, corroborando estos resultados lo indicado por el índice TWI (ver Tabla 1), es decir a mayores valores de TWI se corresponde con mayor contenido de agua útil. Leiva Gutiérrez (2012), indica que valores elevados de este índice en zonas cóncavas de piedemonte y de textura franco arcillosa, se corresponden con una mejor disposición del suelo para conservar humedad. En este trabajo, el mayor espesor de los horizontes Ap y Bt1 en los bajos evidencia un efecto de deposición de material fino. Se observa también, a medida que se desciende en la ladera, mayor porcentaje de CC y PMP en promedio en el perfil y mayor diferencia entre éstos, lo que sumado a un mayor espesor de los primeros horizontes determina un aumento en el contenido de agua útil. Según los resultados encontrados por Pachepsky *et al.* (2001), la relación más fuerte entre la retención de agua del suelo y las variables topográficas se observó en el rango donde el suelo alcanza su capacidad de campo, no variando sustancialmente el contenido de agua en el punto de marchitez, indicando

**Tabla 3.** Contenidos de arcilla, limo y arena en %, y clase textural para cada serie según posición en el paisaje

Serie Tezanos Pinto					
Zonas	Horizonte	Arcilla	Limo	Arena	Clase textural
Loma	Ap	28,2	55,4	13,8	Franco limosa a Franco arcillo limosa
	B21	31,3	53,0	6,9	Franco arcillo limosa
	B22t	33,8	50,3	13,5	Franco arcillo limosa
	B31	29,5	45,2	17,2	Franco arcillo limosa
	B32	33,0	51,3	14,7	Franco arcillo limosa
Media loma	Ap	25,3	59,3	9,4	Franco limosa
	B21	38,0	54,4	4,0	Franco arcillo limosa
	B22t	35,4	53,3	4,4	Franco arcillo limosa
	B31	36,9	48,4	7,5	Franco arcillo limosa
	B32	35,0	43,2	16,3	Franco arcillo limosa
Bajo	Ap	29,4	52,4	10,8	Franco arcillo limosa
	B21	32,6	56,8	5,1	Franco arcillo limosa
	B22t	36,4	49,7	7,3	Franco arcillo limosa
	B31	28,0	55,1	7,0	Franco limosa
	B32	36,0	49,9	7,1	Franco arcillo limosa
Serie La Juanita					
Zonas	Horizonte	Arcilla	Limo	Arena	Clase textural
Loma	Ap	38,6	47,9	13,4	Franco arcillo limoso
	B21	48,3	41,4	10,2	Arcillo limosa
	B22t	46,6	46,3	6,99	Arcillo limosa
	B31	37,2	55,5	7,21	Franco arcillo limosa
	B32	26,2	55,5	17,78	Franco limosa

que “la retención de agua muestra una fuerte dependencia de los componentes texturales del suelo, principalmente del contenido de arena y limo” (Pachepsky *et al.*, 2001). Según Adema *et al.* (2003), la erosión hídrica tiende a remover mayor cantidad de fracciones texturales finas y de materia orgánica que de fracciones gruesas del suelo, en consecuencia hay selectividad en el proceso de extracción. Este proceso degradativo incrementa la fracción de partículas primarias gruesas en el suelo remanente (loma), mientras que

remueve selectivamente a las fracciones finas. El contenido de arcilla, limo y arena se pueden observar en la Tabla 3. Se evidencia un mayor contenido de arcilla en el perfil en la posición de media loma siendo un poco menor en el bajo, mientras que en este último es mayor el contenido de limo. La loma posee mayor contenido de arena respecto a las demás posiciones.

La densidad aparente y la CC determinan la macroporosidad (Tabla 4), si bien la posición de media loma evidencia una mayor

**Tabla 4.** Perfil de suelo de las series Tezanos Pinto y La Juanita, constantes hídricas (CC y PMP), densidad aparente (DAP), porosidad, macroporosidad y lámina de agua al metro de profundidad (L.A.) en milímetros.

Posición Topográfica	Horizonte	Prof. (cm)	CC %	PMP %	DAP (gr.cm <sup>-3</sup> )	Porosidad %	Macrop. %	L.A. (mm)
Loma	Ap	00-20	27,4	15,62	1,41	46,61	7,85	33,31
	Bt1	20-34	31,4	18,33	1,38	47,92	4,58	25,27
	Bt2	34-66	29,2	15,96	1,43	46,10	4,42	60,42
	BC1	66-90	26,4	15,96	1,41	46,66	9,40	35,28
	BC2	90-104	27,2	15,77	1,39	47,42	9,47	22,37
	<b>Total perfil</b>							
Media Loma	Ap	00-18	28,69	14,96	1,38	47,92	8,33	34,11
	Bt1	18-34	29,45	16,59	1,40	47,20	5,99	28,79
	Bt2	34-56	30,44	17,41	1,36	48,70	7,32	38,97
	BC1	56-80	35,43	19,89	1,52	42,48	-11,53	56,85
	BC2	80-100	33,63	18,81	1,28	51,62	8,49	45,61
	<b>Total perfil</b>							
Bajo	Ap	00-22	29,37	15,73	1,35	49,24	9,74	40,36
	Bt1	22-41	34,48	16,08	1,38	47,78	0,06	48,38
	Bt2	41-58	36,28	20,58	1,44	45,48	-6,95	38,56
	BC1	58-80	33,94	20,51	1,37	48,13	1,48	40,61
	BC2	80-100	35,72	23,28	1,40	46,99	-3,19	41,94
	<b>Total perfil</b>							
Loma (La Juanita)	Ap	00-20	31,8	17	1,00	62,26	30,46	29,60
	Btk1	20-34	39	22,5	1,20	54,72	7,92	27,72
	Btk2	34-52	33,3	20,5	1,20	54,72	14,76	27,65
	BCK1	52-70	30	19,7	1,00	62,26	32,26	18,54
	BCK2	70-104	29,3	18,5	1,20	54,72	19,56	44,06
	<b>Total perfil</b>							

porosidad en el perfil, el contenido de agua útil total es menor que en el bajo debido fundamentalmente a un menor porcentaje de CC con respecto a éste, como consecuencia de un mayor contenido de fracción fina, como se indicó anteriormente. En las posiciones de bajo en profundidad es posible observar un menor contenido de macroporos, lo que sugiere una menor capacidad de aireación del

suelo pudiendo tornarse perjudicial para los cultivos ante situaciones de excesos hídricos en el perfil. Los perfiles de la loma, media loma y bajo de la serie Tezanos Pinto se hallan limitados en cuanto a la macroporosidad o porosidad de aireación, los cuales se consideran todos los poros mayores a 10µm, definidos por la diferencia entre la Porosidad Total y la Capacidad de Campo volumétrica,

los cuales tienen una función de proporcionar aireación y desalojar el agua luego de una lluvia abundante.

Una de las finalidades de la agricultura de precisión es identificar diferentes ambientes con cualidades semejantes, determinadas principalmente por topografía y características edáficas, que se denominan zonas de manejo (Gregoret *et al.*, 2006). De acuerdo a esto es posible diferenciar cuatro zonas dentro del campo, en función del contenido de agua útil y su posición en el paisaje (ver figura 3).

### Conclusiones

La utilización del índice TPI posibilitó la delimitación de zonas de loma- media loma y bajo las cuales se diferenciaron en su perfil y en su contenido de agua útil.

Dichas diferencias se corresponden con un mayor contenido de agua útil en aquellas zonas donde los valores de TWI son más altos, es decir en los bajos, y menor en las zonas de lomas donde los valores de TWI son más bajos. El contenido de humedad gravimétrica tomado en distintas fechas también se corresponde con las categorías de TWI, siendo mayor la humedad en las categorías más altas. Sin embargo, no fue suficiente la cantidad de datos de humedad para obtener una relación estadística entre estas variables, consideramos importante obtener mayor cantidad de datos en trabajos posteriores, que posibiliten relacionar ambas variables.

La interacción entre la topografía y el material original generó la expresión de dos series de suelo: una dominante en lomas altas y pendientes (Tezanos Pinto) y una minoritaria relegada a tres lomas cercanas entre sí (La Juanita).

Los perfiles de suelo se diferenciaron según la posición topográfica y también se observó el efecto que la erosión hídrica genera en el arrastre de material fino sobre las laderas de media loma y en los bajos, evidenciándose en éstos últimos mayor espesor del horizonte superficial y mayor porcentaje de CC con respecto a las demás posiciones. Las diferentes series de suelo encontradas y el efecto de la topografía en el contenido de agua útil

podría tener incidencia en el rendimiento de los cultivos, de acuerdo al abastecimiento de agua propio de cada campaña agrícola.

Este trabajo pretende ser un aporte para futuras investigaciones dentro del ámbito de la facultad, orientados a la agricultura por ambientes.

### Agradecimientos

El trabajo ha sido realizado en el marco del PID-UNER 2242 "Desarrollo de modelos acoplados suelo-planta-atmósfera orientados a la estimación de flujos de calor y balance de humedad del suelo en zonas agrícolas"

### Referencias bibliográficas

- ABBATE P.E.; ANDRADE F.H.; CULOT J.P.; BINDRABAN P.S. (1997). Grain yield in wheat: effect of radiation during spike growth period. *Field Crops Research*, 54(2-3): 245-257.
- ADEMA, E. O., BABINEC, F. J., BUSCHIAZZO, D. E., MARTÍN, M. J., & PEINEMANN, N. (2003). Erosión hídrica en suelos del Caldenal. *Publicación Técnica*, (53).
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER W. R. (1973). Física de suelos. *Ed. UTEHA*. México. 529 p.
- BEVEN, K.J.; & KIRKBY, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological sciences journal*, 24 (1): 43-69.
- CONTI, M. E. (2000). Principios de Edafología. Con énfasis en suelos argentinos. 2da. Edición. Buenos Aires. Argentina. *Ed. Facultad de Agronomía UBA*. 430 p.
- ETCHEVERE, P. H. (1976). Normas de reconocimiento de suelos. 2da. Edición actualizada. Castelar, Buenos Aires. *INTA, Dpto. de Suelos. Publicación N° 152*. 211 pp.
- GREGORET, M.C.; DARDANELLI J.; BONGIOVANNI R.; & DÍAZ-ZORITA M. (2006). Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un Haplustol. *Ciencia del Suelo* 24(2): 147-159
- KASPAR, T. C.; COLVIN, T. S.; JAYNES, D. B.; KARLEN, D. L.; JAMES, D. E.; MEEK, D. W.;

- PULIDO, D.; BULTER, H. (2003). Relationship Between Six Years of Corn Yields and Terrain Attributes. *Precision Agriculture*, 4(1): 87-10.
- KINDERKNECHT, L. E.; M. B. TÓFFOLI; A. B. BRIZUELA Y C. A. AGUIRRE. (2019). Balance hidrológico en un entorno SIG para un campo agrícola en Diamante, Entre Ríos. *Revista Argentina de Agrometeorología RADA*, 10, 35-47.
- KRAVCHENKO, A. N.; & BULLOCK, D. G. (2000). Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties. *Agronomy Journal*, 92(1): 75-83.
- DA SILVA, J. R. & SILVA, L.L. (2008). Evaluation of the relationship between maize yield spatial and temporal variability and different topographic attributes. *Biosystems Engineering*, 101(2): 183-190
- 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 depositacional del municipio de Villavicencio. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía. *Escuela de Posgrados*. Bogotá Colombia.
- MATTIVI, P., FRANCI, F., LAMBERTINI, A., & BITELLI, G. (2019). TWI computation: a comparison of different open source GISs. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4(1), 1-12.
- PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D. R. (1982). Methods of soil analysis; Part. 2: Chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Inc., and Soil Science Society of America. *Inc., Publisher, Madison, Wisconsin USA*.
- PACHEPSKY, Y.A.; TIMLIN, D.J.; RAWLS, W.J. (2001). Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Science Society of America Journal*. 65(6): 1787-1795.
- PECKHAM, S.D. (2009). Geomorphometry and spatial hydrologic modelling. *Developments in Soil Science*, vol. 33. Elsevier, pp. 579-602.
- PLAN MAPA DE SUELO. (1991). Carta de Suelos del Departamento Diamante. Serie de Relevamiento de Recursos Naturales N° 9. *Convenio Provincia de Entre Ríos-INTA*. 258 pp.
- QGIS.org, 2021. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- RICHARDS L.A. (1948). Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Science*, 66(2):105-110.
- TASI, H. A. A. (2009). Aplicación de las Cartas de Suelos de Entre Ríos, Argentina, para evaluar índices de productividad específicos para los principales cultivos agrícolas. Universidad Da Coruña.
- WEISS, A. (2001). Topographic position and landforms analysis. In Poster presentation, *ESRI user conference*, San Diego, CA (Vol. 200).

Original recibido (06/04/22)  
Original aceptado (04/07/22)