
DELIMITACIÓN DE ZONAS DE MANEJO CON MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL Y PROFUNDIDAD DE SUELO

NAHUEL PERALTA, JOSÉ LUIS COSTA,
MAURICIO CASTRO FRANCO y MÓNICA BALZARINI

RESUMEN

La variabilidad espacial del rendimiento de los cultivos está relacionada con los atributos del terreno y la profundidad del suelo. El presente estudio tuvo como objetivo determinar la utilidad de los modelos de elevación digital (DEM) y profundidad de suelo para delimitar zonas de manejo homogéneas en lotes de producción. Se calcularon atributos del terreno extraídos del DEM (elevación, pendiente, curvatura plana y flujo de acumulación) y se analizó su relación espacial con el rendimiento de los cultivos y la profundidad del suelo en un lote de 47ha ubicado en el partido de Lobería, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Las campañas agrícolas analizadas fueron 2007/08

(soja), 2009/10 (trigo) y 2010/11 (soja). Se evaluó mediante ANOVA la significancia de las diferencias entre las potenciales zonas de manejo. Los atributos del terreno y profundidad de suelo explicaron entre un 67 y 90% de la variación del rendimiento de los cultivos. Además, permitieron delimitar zonas de manejo significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Los resultados sugieren que los datos de DEM y de profundidad de suelo pueden explicar la variabilidad espacial del rendimiento y constituyen una herramienta para delimitar zonas de manejo para orientar el manejo sitio-específico.

En las principales regiones agrícolas de Argentina se están implementando diversos equipos de cosecha para cuantificar el rendimiento de los cultivos dentro de los lotes de producción. Estos permiten la confección de mapas digitales de rendimiento, procurando una visualización de la variabilidad espacial del rendimiento (Bragachini, 2002). No obstante, la interpretación de estos mapas es dificultosa porque el patrón espacial del rendimiento es influenciado por factores espaciales permanentes y temporales (Blackmore, 2000). Los atributos del terreno, las clases de erosión y las propiedades

del suelo son ejemplos de factores espaciales permanentes que afectan el rendimiento del cultivo directamente o indirectamente (Kravchenko y Bullock, 2000). Por otro lado, los insectos, patógenos del suelo, enfermedades y 'fallas' en la siembra del cultivo, son ejemplos de factores espaciales temporales que pueden afectar el rendimiento en áreas del lote en un año, pero pueden no encontrarse en el próximo año. Además, el monitor de rendimiento puede tener errores de medición intrínsecos, ya sea por errores de calibración, pérdida de señal de los sistemas de posicionamiento global (GPS), entre otros (Blackmore, 2000), alterando los patrones

espaciales de los mapas de rendimiento. Por consiguiente, se necesitan varios años de mapas de rendimiento acumulados para conocer el verdadero patrón espacial del rendimiento (Kaspar *et al.*, 2003).

De todos los factores mencionados, la topografía está frecuentemente relacionada a la variabilidad del rendimiento (Kravchenko y Bullock, 2000). Con el avance de la tecnología en los GPS y los sistemas de información geográfico (GIS) se pueden realizar modelos de elevación digitales (DEM), los cuales se definen como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la elevación del te-

PALABRAS CLAVE / Rendimiento en grano / Variabilidad espacial / Zonas de Manejo /

Recibido: 13/03/2012. Modificado: 26/12/2012. Aceptado: 18/07/2013.

Nahuel Peralta. Ingeniero Agrónomo, becario de CONICET y estudiante de Doctorado en Ciencias de la Planta y Recursos Naturales, Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Argentina. Dirección: Estación Experimental Agropecuaria, INTA Balcarce. Ruta 226 km 73,5. C.C: 276. Provincia de Buenos Aires, Argentina. e-mail: nperalta21@gmail.com

José Luis Costa. Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Buenos Aires, Argentina. M.Sc. y Ph.D., North Dakota State University, EEUU. Profesor, UNMdP, Argentina. Investigador, INTA Balcarce, Argentina.

Mauricio Castro Franco. Ingeniero Agrónomo, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Colombia. Estudiante de Doctorado en Producción Vegetal, UNMdP, Argentina.

Mónica Balzarini. Ingeniera Agrónoma y Magíster en Agronomía, Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Argentina. Ph.D., Louisiana State University, EEUU. Profesora, UNC, Argentina.

TABLA I
CLASIFICACIÓN DE SUELO DEL LOTE EXPERIMENTAL

Unidad cartográfica	Tipo de suelo *		Arcilla (%)		Limo (%)		Arena (%)		AUDC ** mm/cm
	Serie de suelo	Clasificación de suelo	0-30cm	30-60cm	0-30cm	30-60cm	0-30cm	30-60cm	
Asociación	Ta - Tandil (80%)	Argiudol Típico	29,4	40,2	41,8	37,6	28,8	22,2	1,4
Ta 5	Az - Azul (20%)	Paleudol Petrocalcico	30,3	41,2	37,7	32,6	32,0	26,2	1,5

* Fuente: INTA Castelar (1970). Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires (1:50000). Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca.
** AUDC: Agua útil disponible para los cultivos, en mm agua / cm suelo.

rreno. Un DEM puede describirse de forma genérica con la ecuación

$$Z = f(x, y)$$

donde Z: elevación del punto situado en las coordenadas x e y; y f: función que relaciona la variable con su localización geográfica. Los valores de x e y suelen corresponder con las abscisas y ordenadas de un sistema de coordenadas plano, habitualmente un sistema de proyección cartográfica. La ecuación supone una superficie o campo escalar donde la elevación es una variable continua (Felicísimo, 1993).

La información que brindan los DEM sobre la posición y atributos del terreno (elevación, pendiente, curvatura el terreno y áreas de acumulación de flujo) es útil para interpretar los mapas de rendimiento (Kaspar *et al.*, 2003). Los atributos del terreno determinan el flujo y acumulación del agua en diferentes posiciones del lote, así también la redistribución de partículas minerales del suelo y materia orgánica, a través de la erosión, determinando la distribución espacial de los rendimientos (Pachepsky *et al.*, 2001). Por otro lado, la pendiente incrementa la velocidad del flujo de agua superficial, reduciendo su resiliencia y, así, la tasa de infiltración potencial del suelo en las partes elevadas del terreno. En cuanto a la curvatura del terreno, ésta determina la concentración o dispersión del flujo de agua superficial (Timlin *et al.*, 1998). Estudios realizados en diferentes cultivos, años y condiciones climáticas muestran que puede existir relaciones espaciales negativas y positivas entre el rendimiento y los atributos topográficos extraídas del DEM (Kravchenko y Bullock, 2000; Kaspar *et al.*, 2003).

En el sudeste bonaerense, los registros de precipitación muestran una alta variación entre años (variabilidad interanual), como así también dentro de un mismo año (variabilidad intranual; Krüger *et al.*, 2009). El suelo es el reservorio del agua de lluvia, utilizada por el cultivo para su crecimiento y desarrollo. La evapotranspiración potencial generalmente excede a la lluvia que se presenta durante la estación de crecimiento de los

cultivos en el sudeste bonaerense (Andrade, 1995; Abbate *et al.*, 1997). En condiciones de secano, la 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). Es concluyente que la cantidad de agua almacenada en el suelo es un factor crítico en los cultivos de secano (Jordan, 1983), y la capacidad de almacenaje de agua del suelo depende principalmente de la profundidad del horizonte petrocálcico, conocido localmente como 'tosca' (Buschiazzi, 1986). No obstante, la información sobre la relación entre los datos que aportan los DEM y la profundidad del suelo (tosca) como variables explicativas de la variabilidad espacial del rendimiento de los cultivos en la región es escasa. En este trabajo se propone 1) evaluar la relación espacial entre las variables derivadas de los DEM con la profundidad del suelo y el rendimiento de los cultivos, y 2) delimitar zonas homogéneas potenciales de manejo en un lote de la región.

Materiales y Métodos

El presente estudio fue conducido en un lote de producción de 47ha ubicado en un campo en el partido de Necochea, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Los suelos predominantes de esta región pertenecen al orden de los Molisoles, gran grupo Argiudoles y Paleudoles, desarrollados sobre sedimentos loésicos, bajo régimen údico-térmico (Suero *et al.*, 1990). El suelo (Tabla I) está constituido por la serie Tandil (fina, mixta, térmica, Argiudol Típico) y Azul (fina, mixta, térmica, Paleudol Petrocálcico).

La serie Azul se caracteriza por tener una profundidad de suelo menor a 80cm y la serie Tandil tiene suelos más profundos, con profundidad mayor a 80cm (INTA, 1970). Para la estimación del agua disponible para los cultivos se utilizó el criterio establecido por Travasso y Suero (1994), el cual considera el espesor de cada horizonte del perfil del suelo con sus respectivos contenidos de arcilla y limo (Tabla I). Los datos de precipitaciones provinieron de la estación meteorológica ubicada en el campo experimental (Figura 1). La medición de la elevación del terreno para la realización del DEM se realizó utilizando un GPS diferencial (Trimble R3, Trimble Navigation Ltd., EEUU). El equipo fue configurado para tomar posición satelital cada segundo y montado a una camioneta *pick-up* para recorrer el lote en dirección a los surcos de siembra en transectas paralelas distanciadas entre 15 y 20m, porque mayores distancias a 20m podrían generar errores de medición y pérdida de información (Farahani *et al.*, 2007). La velocidad promedio de avance fue entre 15 y 20km·h⁻¹. La medición de la profundidad del horizonte petrocálcico (tosca) fueron realizadas con un muestreador manual acoplado a un GPS (Juno ST; Trimble Navigation Ltd., EEUU). El muestreo fue en grilla de 75×75m. La elevación fue obtenida utilizando la herramienta Spatial Analyst Tools, la pendiente utilizando el modelo ArcSurface, y la curvatura y el flujo de acumulación con el modelo ArcHidrology del ArcGis 9.3.1. Para cuantificar el rendimiento de los cultivos en las tres campañas (soja 2008/09, trigo 2009/10 y soja 2010/11) se utilizó un monitor de rendimiento acoplado a una co-

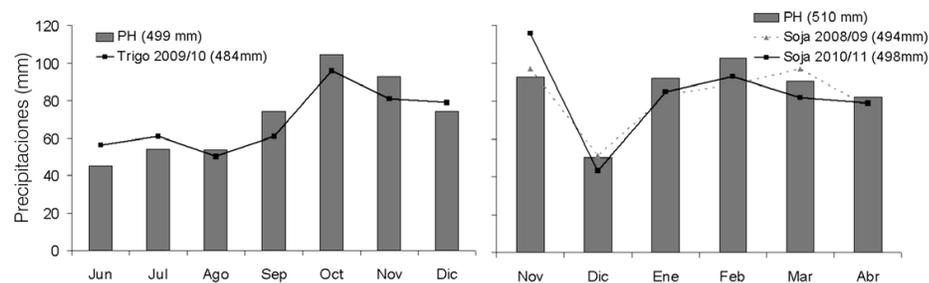


Figura 1. Precipitaciones durante el ciclo de crecimiento de los cultivos y del promedio histórico (PH) del sitio experimental.

TABLA II
DESCRIPCIÓN DE LOS ATRIBUTOS DEL TERRENO

Variable	Descripción
Elevación	Valor estructural implícito en el modelo digital.
Pendiente	Es la tasa de cambio de la elevación con relación a una superficie
C plana	Es una medida transversal a la máxima pendiente. La curvatura plana delimita áreas de divergencia y convergencia de flujo (valores positivos y negativos respectivamente). Este cálculo permite determinar si un lugar específico es plano, cóncavo o convexo
F acum	A cada celda se le asigna un valor igual al número de celdas que fluyen a ella. Celdas con altos valores de acumulación corresponden a los canales de flujo y con valores de acumulación cercanos a cero corresponden a lugares con alta pendiente donde al agua no se acumula

sechadora. Los datos de rendimiento fueron normalizados por estandarización para comparar los rendimientos de cada cultivo en las diferentes campañas y así encontrar las diferentes zonas de rendimiento potencial dentro del lote (Kravchenko y Bullock, 2000).

Para describir la variabilidad espacial y elaboración de los mapas de los atributos del terreno, profundidad de suelo y rendimiento de los cultivos se calcularon semivariogramas (Isaaks *et al.*, 1989) como

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2} \sum (z(x_i) - z(x_i + h))^2$$

donde $\gamma^*(h)$: valor del semivariograma experimental, $z(x_i)$: valor de la variable de interés en el punto x_i , y $z(x_i + h)$: valor de la variable de interés en el punto $x_i + h$.

Para todos los atributos del DEM (Tabla II), para las variables profundidad de suelo y rendimiento, el modelo teórico de semivariograma que mejor ajustó fue el esférico. Usando el semivariograma ajustado se procedió a la interpolación de todas las variables con el *kriging* ordinario (Vieira, 2000). Posteriormente se generó una grilla de 10x10m para todas las variables, lo cual permitió trabajar a la misma escala (Peralta *et al.*, 2011). Cuando se predicen valores en lugares no muestreados, es necesario comprobar la validez del modelo que se está utilizando. La validación cruzada utiliza todos los datos muestrales para estimar el modelo de autocorrelación. Cada vez que se retira un dato muestral y se lo predice con el resto de la muestra, se compara el valor predicho de ese punto con el valor observado. Este procedimiento se repite con cada uno de los puntos muestrales y, al final, la validación cruzada compara los valores observados con los calculados. Para comparar las predicciones con los valores observados (reales) y observar si no hay pérdida de información, el análisis geoestadístico proporciona diferentes estadísticos, tales como la sumatoria del

error medio (SEM) y el coeficiente de determinación (R^2). Para que las predicciones no sean sesgadas y no haya pérdida de información, la SEM tiene que ser cercana a cero y el R^2 cercano a 1 (Tabla III; Villatorio *et al.*, 2008).

El rendimiento de los cultivos y el normalizado fueron clasificados en función de cuatro zonas de producción, y los atributos del terreno y la profundidad de suelo fueron clasificados en función de la elevación, ya que es el valor estructural implícito en el modelo digital. Investigaciones previas en diferentes suelos recomiendan la división en cuatro clases para la delimitación de zonas homogéneas porque muy poca información es obtenida usando un número mayor de zonas (Vitharana *et al.*, 2008). La clasificación de las zonas se realizó en función de los cuartiles de estas variables usando el Geostatistical Analyst en ArcGIS 9.3.1 (Environmental System Research Institute, Redlands, CA, EEUU).

Análisis estadístico

Estadísticos descriptivos y correlaciones simples fueron calculados para describir el comportamiento de los atributos del terreno, profundidad de suelo y rendimiento de los cultivos, utilizando los procedimientos MEANS y CORR (SAS, 2006), respectivamente. El análisis de regresión múltiple fue calculado para explicar la variabilidad en el rendimiento de las diferentes campañas de producción y el rendimiento normalizado, utilizando el procedimiento de selección de variables *backward* con un nivel de significancia de 0,15 para eliminar variables (SAS, 2006). Para realizar el análisis de regresión se utilizó previamente la técnica de reclasificación de datos espaciales. Esta técnica consiste en reclasificar la información en unidades representativas de todos los datos, permitiendo trabajar la información a la misma escala y con menor cantidad de datos, sin perder información y representatividad (Peralta *et al.*, 2011).

TABLA III
ESTADÍSTICOS DE LA VALIDACIÓN CRUZADA PARA EL SEMIVARIOGRAMA ESFÉRICO DE LOS ATRIBUTOS DEL TERRENO, PROFUNDIDAD DEL SUELO (PS) Y RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS

Variable	Modelo	SME	R ²
Elevación	Esférico	1×10 ⁻³	0,98
Pendiente	Esférico	5×10 ⁻³	0,97
C plana	Esférico	5×10 ⁻⁵	0,91
F acum	Esférico	9×10 ⁻²	0,81
PS	Esférico	1×10 ⁻²	0,87
Soja 2008/09	Esférico	2×10 ⁻³	0,81
Trigo 2009/10	Esférico	1×10 ⁻³	0,87
Soja 2010/11	Esférico	1×10 ⁻²	0,82
Normalizado	Esférico	2×10 ⁻⁵	0,97

Para la reclasificación se utilizó como base el mapa de elevación del terreno. Se realizó un análisis de co-inercia para obtener una medida de la magnitud de la asociación entre los mapas, utilizando el paquete *ade4* del software R (Dray *et al.*, 2007). Este análisis produce una medida global a través del coeficiente RV. El coeficiente RV es alto ($p < 0,05$) cuando dos o más estructuras varían al mismo tiempo (alta correlación) y es bajo cuando su variación es independiente (Dray *et al.*, 2007). Finalmente, se realizó una comparación de los valores esperados de los atributos derivados del DEM, la profundidad del suelo y el rendimiento para cada una de las zonas (baja, baja-media, media-alta, alta) utilizando un modelo mixto de ANOVA y la prueba de la mínima diferencia significativa (MDS) con las medias ajustadas por la correlación espacial. Todos los análisis se realizaron con SAS versión 9.1 (SAS, 2006) y con un nivel de significancia del 5%.

Resultados y Discusión

Estimación del rendimiento de los cultivos con atributos del terreno y profundidad de suelo

Los modelos de regresión que permitieron explicar la variabilidad del rendimiento para todos los años y para el promedio de los tres años (datos normalizados) retuvieron principalmente a la variable elevación y profundidad de suelo (Tabla IV). La profundidad del suelo presentó correlación negativa y significativa con el rendimiento para todos los años, con el normalizado de los tres años (Tabla V); y estuvo significativamente asociada a la elevación del terreno y pendiente ($r = -0,82$ y $r = 0,54$, respectivamente; Tabla VI). Las zonas del lote con mayor elevación del terreno y pendiente

TABLA IV
MODELOS DE REGRESIÓN PARA PREDECIR
EL RENDIMIENTO

Cultivo	Modelo de regresión	R ²
Soja 2008/09 (tn ha ⁻¹)	Y= -0,013 EL - 0,016 PS + 2,22	0,67 **
Trigo 2009/10 (tn ha ⁻¹)	Y= -0,04 EL + 10,77	0,82 **
Soja 2010/11 (tn ha ⁻¹)	Y= -0,03 PS - 8,27 CP - 3,08	0,90 **
Normalizado	Y= -0,02 EL - 0,01 PS + 4,97	0,84 **

Y: rendimiento en grano (tn/ha), EL: elevación, CP: curvatura plana (1/100m), PS: profundidad de suelo.
** Nivel de significancia de p<0,01.

contienen carbonato de calcio consolidado (tosca) en superficie, reduciendo la capacidad de almacenaje de agua del suelo, afectando negativamente el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Pierson *et al.*, 1990; Pazos *et al.*, 2002). El contenido de arcilla pre-

sentó escasa diferencia entre los suelos (Tabla I); mientras que la profundidad presenta amplia diferencia entre los suelos, infiriéndose que la diferencia en la capacidad de almacenaje de agua es principalmente afectada por la profundidad del suelo. Lindstrom *et al.* (1992) y Calviño *et al.* (2003) informaron que el rendimiento decae a medida que disminuye la profundidad del suelo y la elevación del terreno, determinando el patrón espacial del rendimiento de los cultivos. La curvatura plana fue retenida en un modelo (Tabla IV). El rendimiento fue negativamente correlacionado con la curvatura plana del terreno y positivamente correlacionado con el flujo de acumulación (Tabla V). Se ha documentado que la correlación negativa de la curvatura plana del terreno con el rendimiento es atribuible a que las curvaturas cóncavas (valores negativos) concentran el agua superficial, lo cual incrementa la infiltración, mientras que las curvaturas convexas dispersan el flujo de agua, reducen la infiltración, disminuyendo la cantidad de agua disponible para el cultivo, afectando el crecimiento y desarrollo (Timlin *et al.*, 1998). En lo que respecta a la correlación positiva entre el flujo de acumulación y el rendimiento, se supone que las áreas con valores altos de acumulación están asociadas a lugares con baja pendiente donde el agua se puede depositar y estar disponible para el cultivo (Kravchenko y Bullock, 2000). Por ende, los atributos del terreno derivados de los DEM pueden definir el control de los flujos de agua y determinar la variabilidad espacial del rendimiento de los cultivos dentro de los lotes. Los modelos de regresión permitieron explicar entre el 67 y 90% de la variación espacial del rendimiento. Kravchenko y Bullock (2000) desarrollaron modelos de regresión múltiples entre atributos de terreno y rendimiento para 28 sitios-años. Ellos encontraron que la elevación fue la variable que tuvo en sus ecuaciones mayor contribución, los valores de R² se ubicaron en un intervalo desde 0,06 a 0,71, y los mayores valores de R² ocurrieron en años secos. En el presente estudio, los R² no presentaron una variación tan marcada, posiblemente porque las precipitaciones anuales en el periodo de crecimiento de cada cultivo no mostraron ningún fenómeno relevante respecto de los promedios históricos para la región (Figura 1).

En función del mapa de profundidad de suelo (Figura 2f) se puede apreciar la existencia de los dos tipos de suelo (Tabla I) que conforman el lote experimental. Las tonalidades claras del mapa (Figura 2f) corresponden a las zonas con el horizonte petrocálcico por encima de los 80cm (tosca entre 5 y

TABLA V
CORRELACIÓN ENTRE RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS CON LOS
ATRIBUTOS DEL TERRENO Y PROFUNDIDAD DE SUELO (PS)

Rendimiento	Elevación	Pendiente	C plana	F acum	PS
Soja 2008/09	-0,78 ***	-0,43 *	-0,76 ***	0,43 *	-0,78 ***
Trigo 2009/10	-0,90 ***	-0,58 **	-0,88 ***	0,60 **	-0,71 ***
Soja 2010/11	-0,87 ***	-0,57 *	-0,81 ***	0,58 **	-0,92 ***
Normalizado	-0,89 ***	-0,54 **	-0,86 ***	0,57 **	-0,84 ***

Nivel de significancia: * p<0,05; ** p<0,01; * p<0001.

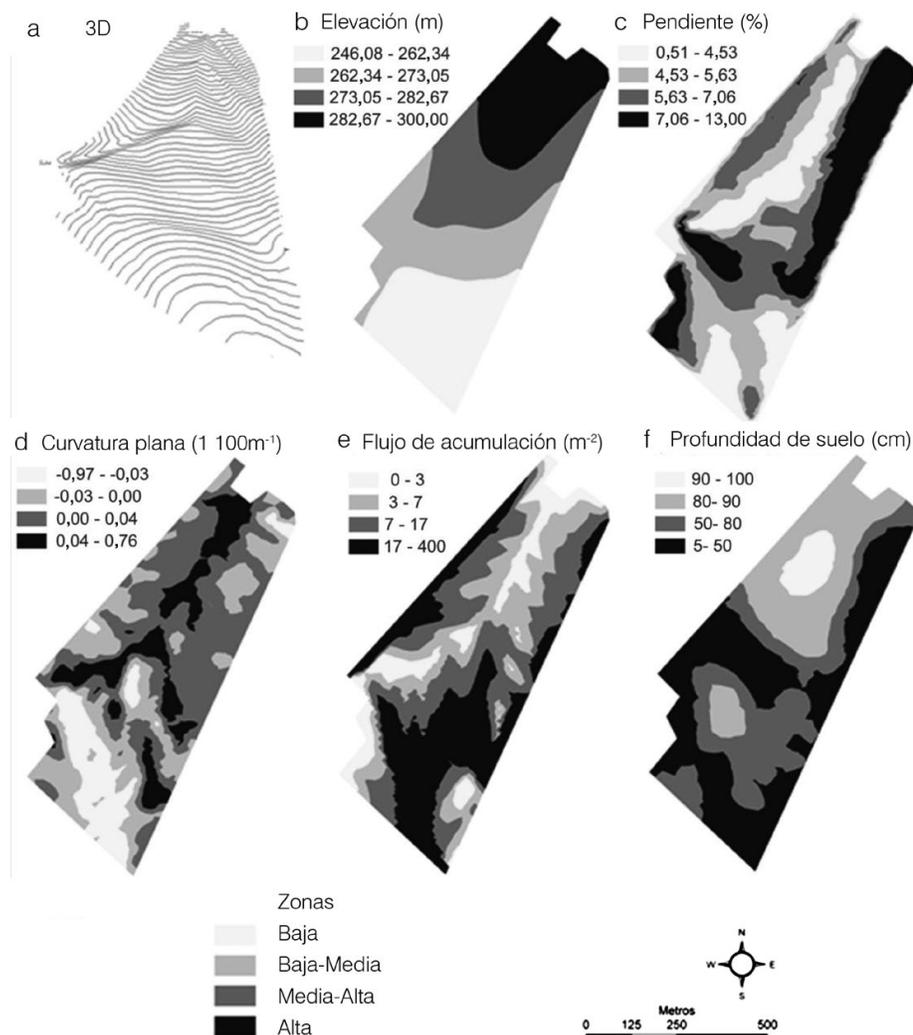


Figura 2. Mapas de contorno de los atributos del terreno y profundidad de suelo.

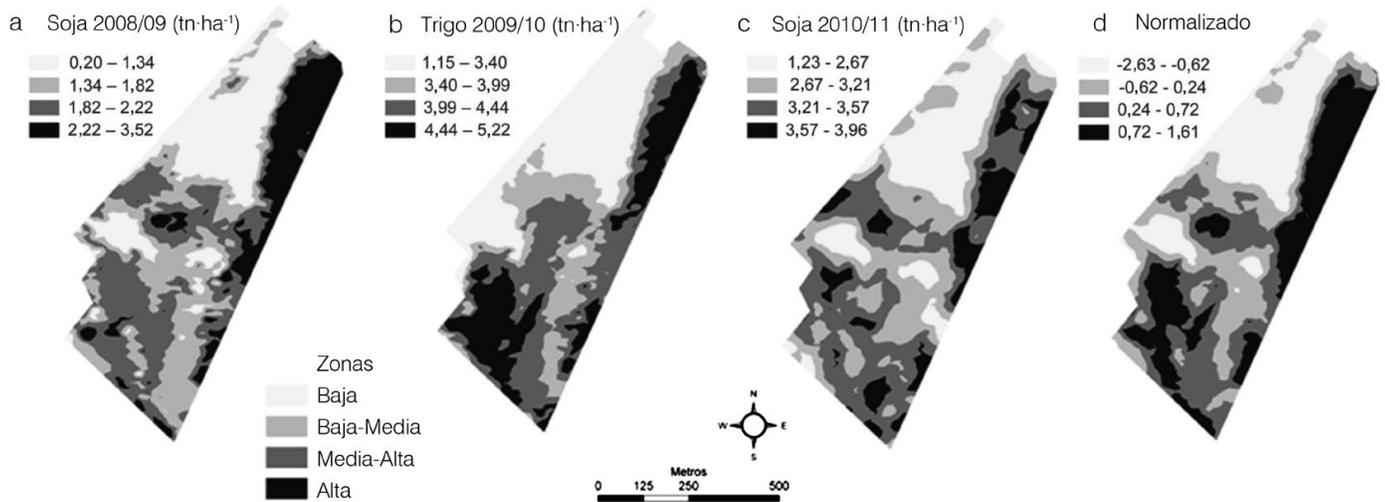


Figura 3. Mapas de contorno de los rendimientos para todos los años y normalizado.

TABLA VI
CORRELACIÓN ENTRE
PROFUNDIDAD DE SUELO (PS)
Y ATRIBUTOS DEL TERRENO

	Elevación	Pendiente	C plana	F acum
PS	-0,82***	0,54**	0,63**	-0,54**

Nivel de significancia: ** p<0,01; *** p<0,001.

80cm), representando el Paleudol Petrocálcico, mientras que los tonos más oscuros (Figura 2f) corresponden a las zonas con tosca por debajo de los 80cm de profundidad, representando el Argiudol Típico. La congruencia entre el mapa de profundidad de suelo y el rendimiento normalizado (Figuras 2f y 3d), medida a través del estadístico RV del análisis de co-inercia fue estadísticamente significativa ($p<0,05$); es decir que la variabilidad espacial del rendimiento de los cultivos mantuvo un patrón similar al mapa de profundidad de suelo. El método tradicional para caracterizar la variabilidad espacial de la profundidad del suelo en lotes de producción es el muestreo por grilla (Peralta *et al.*, 2011). El mismo requiere densa cantidad de muestras para representar la variabilidad del suelo, elevando los costos operativos (Sadler *et al.*, 1998). La alta correlación entre la elevación y profundidad del suelo (Tabla VI) indicaría que en lotes con similar unidad de mapeo, la elevación del terreno sería un indicador fiable para caracterizar la variabilidad en la profundidad del suelo y contribuir a la optimización de los mapas de suelo actuales, logrando disminuir el número de muestras y reducir los costos operativos sin perder información sobre la variabilidad en la profundidad del suelo.

Delimitación de zonas homogéneas potenciales de manejo

Para evaluar si los atributos del DEM permiten delimitar zonas homogéneas potenciales de manejo dentro de los lotes se compararon los promedios de los atributos del terreno y los rendi-

mientos en cada una de las zonas (Figuras 4 y 5). La elevación fue el único atributo que presentó diferencias entre las cuatro zonas ($p\leq 0,05$; Figura 4), mientras que las restantes variables presentaron diferencias sólo entre zonas extremas. El promedio de los rendimientos para cada campaña y el normalizado presentaron di-

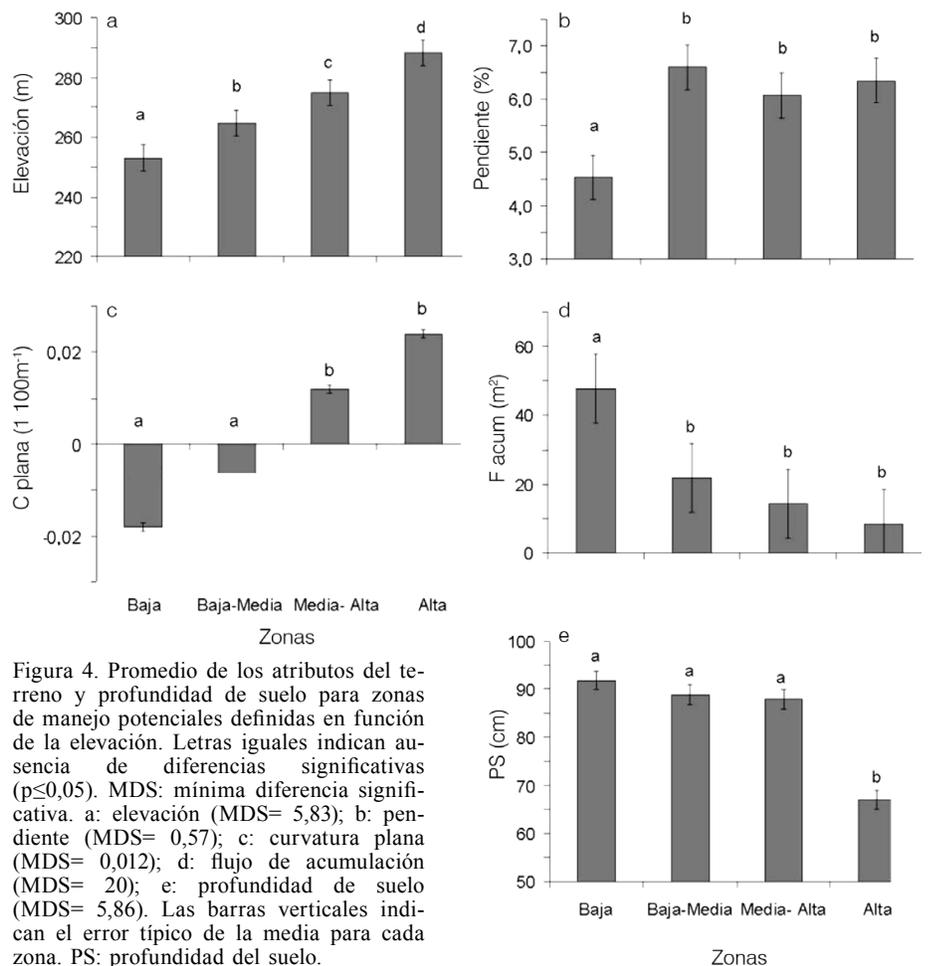


Figura 4. Promedio de los atributos del terreno y profundidad de suelo para zonas de manejo potenciales definidas en función de la elevación. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas ($p\leq 0,05$). MDS: mínima diferencia significativa. a: elevación (MDS= 5,83); b: pendiente (MDS= 0,57); c: curvatura plana (MDS= 0,012); d: flujo de acumulación (MDS= 20); e: profundidad de suelo (MDS= 5,86). Las barras verticales indican el error típico de la media para cada zona. PS: profundidad del suelo.

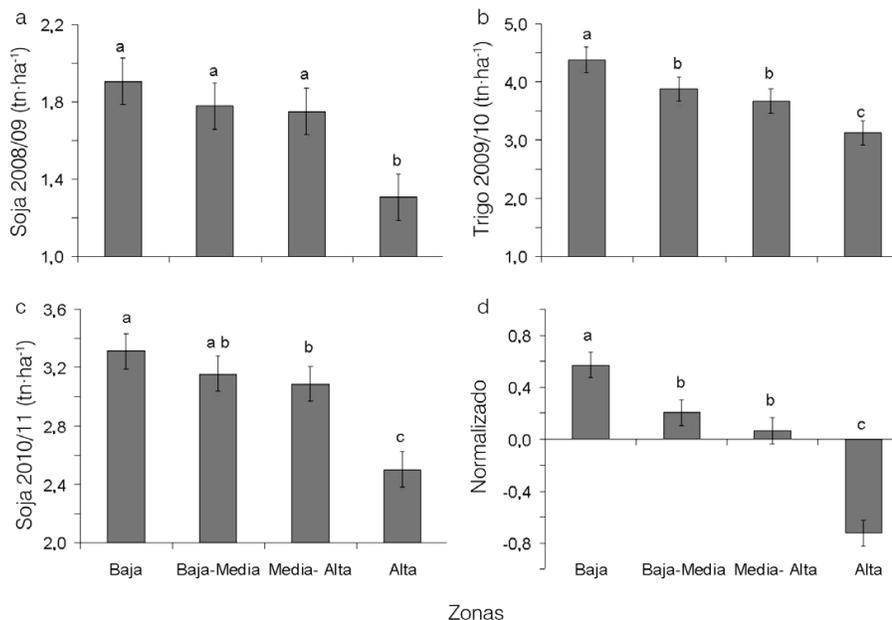


Figura 5. Promedio de los rendimientos para cada zona de manejo potencial delimitada según la elevación obtenida del DEM. Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). MDS: mínima diferencia significativa. a: soja 2008/09 (MDS= 0,19); b: trigo 2009/10 (MDS= 0,31); c: soja 2010/11 (MDS= 0,16); d: normalizado (MDS= 0,28). Las barras verticales indican el error típico de la media para cada zona.

ferencias significativas entre las zonas delimitadas por la elevación ($p < 0,05$; Figura 5). El rendimiento normalizado presentó diferencias significativas entre zonas extremas, sin presentar diferencia entre las dos zonas intermedias (Baja-Media y Media-Alta). La zona de baja elevación presentó los menores valores de pendiente, curvatura plana, mayores valores de flujo de acumulación, profundidad de suelo y rendimiento de los cultivos; y viceversa (Figuras 4 y 5).

La identificación de zonas homogéneas en los mapas de variables de suelo y el comportamiento de los cultivos en dichas zonas ayudan a comprender las complejas relaciones entre las variables y su impacto en la identificación de zonas homogéneas dentro del lote. El número de zonas de manejo depende de la medida de sensibilidad deseada y el nivel de variabilidad del lote (Li *et al.*, 2007). Para este estudio, la separación en tres zonas representa un buen compromiso entre la sensibilidad y los patrones de variabilidad visual y analíticamente perceptible del suelo y rendimiento.

Los atributos del terreno, por sí solos, son una herramienta potencialmente útil para explicar la variabilidad espacial del rendimiento de los cultivos y brindar la posibilidad de delimitar zonas de manejo (Kaspar *et al.*, 2003), pero en regiones o ambientes donde hay presencia de un horizonte petrocálcico (tosca), la misma puede transformarse en

la principal variable de suelo respecto a su impacto sobre el rendimiento de los cultivos, permitiendo en algunos casos capturar la mayor variación del rendimiento (Tabla IV).

Se ha documentado que la estabilidad temporal de las zonas homogéneas definidas está asociada a las características particulares de cada lote, siendo relativamente estables en algunos casos (Jaynes *et al.*, 2005) y muy variables en otros, asociado principalmente al tipo de información utilizada para su delimitación, como así también a la interacción de los factores edáficos, climáticos y antrópicos. En este trabajo las variables de suelo (atributos del terreno y profundidad de suelo) utilizadas para delimitar zonas de manejo son estables en el tiempo y permitieron generar tres zonas potenciales de rendimiento. Por lo tanto, los resultados son alentadores respecto al efecto que podría tener las instauraciones de prácticas agronómicas de manejo diferenciales en tres zonas potenciales de manejo.

Conclusiones

El estudio de los atributos del terreno y profundidad de suelo permitieron explicar la variación del rendimiento en grano de los cultivos. La asociación espacial entre los atributos de terreno y profundidad de suelo con el mapa de tendencia espacial del rendimiento permitió delimitar zonas homogé-

neas potenciales de manejo. Estos resultados sugieren que la asociación espacial entre los atributos de terreno con los mapas de rendimiento brindaría a los productores la oportunidad de aplicar prácticas agronómicas diferenciales de acuerdo a la zona de manejo potencial, aumentando la eficiencia en el uso de insumos, mejorando la rentabilidad de la empresa y la protección del medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Nicolás Tagle por su ayuda en la recopilación de datos y por brindar el campo donde se realizó este trabajo, y a Hernán Angelini por la edición de las figuras. El presente trabajo es parte de la tesis de Doctorado en Ciencias Agropecuarias de Nahuel Peralta en la Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina y contó con el patrocinio del programa de becas de posgrado del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

REFERENCIAS

- Abbate PE, Andrade FH, Culot JP, Bindraban PS (1997) Grain yield in wheat: effect of radiation during spike growth period. *Field Crops Res.* 54: 245-257.
- Andrade FH (1995) Analysis of growth & yield of maize, sunflower & soybean grown at Balcarce, Argentina. *Field Crops Res.* 41: 1-12.
- Blackmore BS (2000) The interpretation of trends from multiple yield maps. *Comp. Electron. Agric.* 26: 37-51.
- Bragachini M (2002) *Evolución, Presente y Futuro de la Agricultura de Precisión en Argentina 1996/2001*. INTA Manfredi. Córdoba, Argentina. 5 pp.
- Buschiazzo D (1986) Estudio sobre la tosca. Parte I: Evidencias de un movimiento descendente del carbonato en base a la interpretación de características macro y geomorfológicas. *Cienc. Suelo* 4: 55-65.
- Calviño PA, Andrade FH, Sadras VO (2003) Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. *Agron. J.* 95: 275-281.
- Dray S, Dufour AB, Chessel D (2007) The ade4 package-II: Two-table and K-table methods. *R News.* 7: 47-52.
- Farahani HJ (2007) Map quality and zone delineation as affected by width of parallel swaths of mobile agricultural sensors. *Pre-cis. Agric.* 96: 151-159.
- Felicísimo AM (1993) Definición y estructura del modelo digital de elevaciones (MDE). En *Introducción a los Modelos Digitales del Terreno*. www.etsimo.uniovi.es/~feli. pp 12-17.
- INTA-CIRN (1970) Soil Institute. File "3760-35 "Claraz"", PBA, Castelar: Soil Institute AICET. 72 pp; 4 map photo; scale 1:50.000.
- Isaaks EH, Srivastava RM (1989) *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press. Nueva York, EEUU. pp 561.

- Jaynes DB, Colvin TS, Kaspar TC (2005) Identifying potential soybean management zones from multi-year yield. *Comp. Electron. Agric.* 46: 309-327
- Jordan WR (1983) Whole plant responses to water deficits: An overview. En Taylor HM, Jordan WR, Sinclair TR (Eds.) *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI, EEUU. pp. 289-317.
- Kaspar TC, Colvin TS, Jaynes DB, Karlen DL, James DE, Meek D (2003) Relationship between six years of corn yields and terrain attributes. *Precis. Agric.* 4: 87-101.
- Kravchenko AN, Bullock DG (2000) Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agron. J.* 92: 75-83.
- Krüger H, Venanzi S (2009) *El Agua y el Rendimiento del Trigo. Algunos Cálculos*. www.inta.gov.ar/bordenave/contactos/autores/hugo/nompublic.htm.
- Li Y, Shi Z, Li S (2007) Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in saline land. *Comp. Electron. Agric.* 56: 174-186.
- Lindstrom MJ, Nelson WW, Schumacher TE (1992) Quantifying tillage erosion rates due to moldboard plowing. *Soil Till. Res.* 24: 243-255.
- Pachepsky YA, Timlin DJ, Rawls WJ (2001) Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1787-1795.
- Pazos MS, Mestelan SA (2002) Variability of depth to tosca in Udolls and soil classification, Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1256-1264.
- Peralta NR, Castro Franco M, Costa JL (2011) Relación espacial entre variables de sitio y rendimiento para la delimitación de zonas de manejo mediante el uso de herramientas informáticas. *Congr. Arg. AgroInf.* pp. 58-69.
- Pierson FB, Mulla DJ (1990) Aggregate stability in the Palouse region of Washington: effect of landscape position. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1407-1412.
- SAS (2006) *SAS User's Guide: Statistics*. Ver. 9.1. SAS Institute, Inc. Cary, NC, EEUU.
- Suero EE, Santa Cruz JN, Busso AS, Della Maggiora AI, Irigoyen AI, Costa JL (1990) Characterization of natural resources in low-watering systems of the Southeastern Pampas. *RIA* 30: 71-90.
- Travasso MI, Suero EE (1994) *Estimación de la Capacidad de Almacenaje de Agua en Suelos del Sudeste Bonaerense*. Boletín Técnico N° 125. Balcarce, Argentina. 9 pp.
- Timlin DJ, Pachepsky Y, Snyder VA (1998) Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 764-733.
- Vieira SR (2000) Uso de geostatística em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo. En Novias RF (Ed.) *Tópicos em Ciência do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, Brasil. pp. 3-87.
- Villatorio M, Henríquez C, Sancho F (2008) Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, CA, CICE y P del suelo. *Agron. Costarric.* 32: 95-105.
- Vitharana UW, Van Meirvenne M, Simpson D, Cockx L, Baerdemaeker J (2008) Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. *Geoderma* 143: 206-215.

MANAGEMENT ZONE DELIMITATION WITH DIGITAL ELEVATION MODELS AND SOIL DEPTH

Nahuel Peralta, José Luis Costa, Mauricio Castro Franco and Mónica Balzarini

SUMMARY

The spatial variability of crop yield is related to terrain attributes and to soil depth. The aim of this study was to determine the validity of digital elevation models (DEM) and soil depth as tools to delineate homogeneous management zones in agricultural fields. The research was carried out in a 47ha field located in Lobería, Buenos Aires Province, Argentina. Terrain attributes extracted from DEM (elevation, slope, flat curvature and flow accumulation) were calculated and their spatial relationship with crop yield and soil depth was evaluated. Crops

analyzed were those of 2007/08 (soybean), 2009/10 (wheat) and 2010/11 (soybean). The statistical significance of differences between potential management zones was assessed by ANOVA. The terrain attributes and soil depth explained between 67 and 90% of the variation in crop yield, allowing to delineate different management zones ($p \leq 0,05$). The results suggest that data from DEM and soil depth can explain the spatial variability of yield and are a useful tool to delineate management zones to guide site-specific management.

DELIMITAÇÃO DE ZONAS DE MANEJO COM MODELOS DE ELEVAÇÃO DIGITAL E PROFUNDIDADE DE SOLO

Nahuel Peralta, José Luis Costa, Mauricio Castro Franco e Mónica Balzarini

RESUMO

A variabilidade espacial do rendimento dos cultivos esta relacionada com os atributos do terreno e a profundidade do solo. O presente estudo teve como objetivo determinar a utilidade dos modelos de elevação digital (DEM) e profundidade de solo para delimitar zonas de manejo homogêneas em lotes de produção. Calcularam-se atributos do terreno extraídos do DEM (elevação, pendente, curvatura plana e fluxo de acumulação) e se analisou sua relação espacial com o rendimento dos cultivos e a profundidade do solo em um lote de 47ha situado no partido de Lobería, Província de Buenos Aires, Argentina. As campanhas agrícolas analisadas foron 2007/08

(soja), 2009/10 (trigo) e 2010/11 (soja). Avaliou-se mediante ANOVA a significância das diferenças entre as potenciais zonas de manejo. Os atributos do terreno e profundidade de solo explicaram entre 67 e 90% da variação do rendimento dos cultivos. Além disso, permitiram delimitar zonas de manejo significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). Os resultados sugerem que os dados de DEM e de profundidade de solo podem explicar a variabilidade espacial do rendimento e constituem uma ferramenta para delimitar zonas de manejo para orientar o manejo sitio-específico.