



FACULTAD DE AGRONOMÍA
Universidad Nacional de La Pampa

DELIMITACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS DE MANEJO EN UN ÁREA PILOTO DE LA PROVINCIA DE LA PAMPA

“Trabajo final de graduación presentado para obtener el título de Ingeniero Agrónomo”

Autores: Bonino, Bruno Ezequiel; Fabressi Cardoso, Eduardo Esteban

Director: Ing. RRNN Leizica, Emmanuel
Cátedra de Sistemas de Información Agrogeográfica


Co-director: Ing. Agr. Rainhart, Luciano
Cátedra de Fisiología Vegetal

Evaluadores:

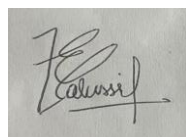
Dra. Dillchneider, Alexandra

Dra. Gili, Adriana

FACULTAD DE AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA



Bruno Bonino



Fabressi Esteban

Santa Rosa (La Pampa)- Argentina 2023



Rainhart Luciano



Leizica Emmanuel

ÍNDICE

RESUMEN	Error! Bookmark not defined.
INTRODUCCIÓN	4
HIPÓTESIS	6
OBJETIVOS	6
MATERIALES Y METODOS	7
Análisis estadístico	9
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	Error! Bookmark not defined.
CONCLUSIÓN	15
BIBLIOGRAFÍA	16

RESUMEN

La variabilidad espacial dentro de lotes productivos es uno de los principales factores que influyen en el rendimiento de los cultivos. A su vez el uso de lotes heterogéneos como si fuesen homogéneos conlleva el riesgo de avance de procesos degradativos del suelo, como la salinización. El objetivo del trabajo es evaluar la variabilidad espacial de los suelos utilizando indicadores como el pH y la conductividad eléctrica (CE). Además, se buscó analizar estas variables junto con la materia orgánica (MO) y la textura del suelo para identificar y definir una zona de transición entre áreas con frecuentes inundaciones y riesgo de salinización con aquellas que no lo están. Se diferenciaron dos y tres ambientes contrastantes dentro de un área de estudio. Los ambientes con mayor pH y CE presentaron un mayor contenido de materia orgánica y textura más fina (mayor porcentaje de limo + arcilla). Las zonas definidas con la asociación de pH y CE guardan relación con niveles de producción de biomasa obtenidos a partir de NDVI y por lo tanto son adecuados para ambientar lotes y llevar a cabo un manejo sitio-específico con el objetivo de mejorar la eficiencia productiva, preservando el recurso suelo.

Palabras clave: variabilidad espacial de los suelos, manejo sitio-específico.

ABSTRACT

The spatial variability within productive plots is a key factor influencing crop performance. Simultaneously, treating heterogeneous plots as if they were homogeneous poses the risk of accelerating soil degradation processes, such as salinization. This study aims to assess the spatial variability of soils using indicators like pH and electrical conductivity (EC). Additionally, we analyzed these variables in conjunction with organic matter (OM) and soil texture to identify and define a transition zone between areas prone to frequent flooding and at risk of salinization and those that are not. Two classifications

were performed: one divides the study area in two classes and other in three classes. Environments exhibiting higher pH and electrical conductivity also demonstrated elevated organic matter content and finer texture (higher percentage of silt + clay). The zones defined by the association of pH and EC are correlated with biomass production levels obtained from NDVI, making them suitable for adapting plots and implementing site-specific management to enhance productive efficiency while preserving the soil resource.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las regiones semiáridas y subhúmedas secas del mundo, entre las cuáles se encuentra la región pampeana, sufrieron un cambio de uso de la tierra que pasó de pastizales y sabanas a la producción de “commodities” con destino grano, aceite, biocombustibles y papel (Brown et al., 2013; Coutinho et al., 2006; Nosetto et al., 2011; Zach et al., 2006). Este proceso provocó pérdidas de carbono de los suelos y graves impactos negativos sobre la calidad de los mismos y los servicios ecosistémicos relacionados (Chapin et al., 2012, 2010; Guida Johnson y Zuleta, 2013; Huber-Sannwald et al., 2012; Kirkby et al., 2000). El término “degradación del suelo” incluye los procesos de erosión, compactación, acidificación, así como la reducción del contenido de materia orgánica y de biodiversidad, lo cual se traduce en pérdidas de la capacidad productiva (Jie et al. 2002; Rickson et al. 2015). La intensa actividad agrícola acelera estos procesos principalmente por la práctica comúnmente adoptada por los productores: el manejo uniforme de los lotes sin tener en cuenta la variabilidad del suelo. Los campos agrícolas pampeanos frecuentemente tienen múltiples unidades de mapas de suelo dentro de ellos, a pesar de su tamaño a veces relativamente pequeño, y una amplia gama de texturas y propiedades del suelo, causando una amplia variabilidad del suelo (Melchiori, 2002). Se han revelado notables fluctuaciones en el rendimiento de los cultivos dentro de un mismo

campo debido a la variabilidad tanto física como química de los suelos (Reyniers et al. en 2006). Por lo tanto, la gestión uniforme de los campos o lotes no es una estrategia eficaz (Moral et al., 2010).

En este contexto, la gestión de cultivos en función del lugar puede definirse como: “Adecuar la aplicación de recursos y las practicas agronómicas a las necesidades del suelo y de los cultivos a medida que varían en el espacio y el tiempo dentro de un campo” (Whelan, McBratney, 2000). En consecuencia, este enfoque permite apuntar a la sostenibilidad agrícola (Fu et al. 2010). Uno de los riesgos inminentes de tratar los lotes como homogéneos es el agravamiento de los procesos de salinización, que actualmente están avanzando en la Región Pampeana (Taleisnik y Lavado 2017). La identificación de la salinidad se puede realizar a partir de la CE y el pH del suelo. La CE guarda una correlación directa con el contenido de sales, mientras que el pH, medida de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa, proporciona una estimación del nivel de sodio. De esta manera, es posible identificar suelos con características salinas, salino-sódicas o sódicas.

Los mapas de rendimiento pueden utilizarse como indicadores de la productividad de los cultivos que pueden orientar la delimitación de zonas de gestión homogéneas, sin embargo, es importante tener en cuenta que suelen mostrar una variabilidad temporal significativa debido a factores como las condiciones meteorológicas, prácticas de gestión desiguales y la influencia de plagas y enfermedades (Jaynes et al., 2005 y Whelan et al., 2002). Los mapas de suelo tradicionales normalmente elaborados a una escala de entre 1:20.000 y 1:200.000, fueron diseñados originalmente para la planificación del uso del suelo a nivel regional y, por lo tanto, no proporcionan información detallada sobre la variabilidad dentro del campo (Robert, 1993). Una herramienta efectiva para la delimitación de zonas homogéneas son las imágenes satelitales que, cuando se combinan

con datos de campo, generan datos e información útiles para que los productores tomen decisiones de manejo que le permitan ser eficientes y al mismo tiempo preservar el recurso suelo. Por esos motivos, resulta importante realizar estudios que demuestren que indicadores de campo de fácil medición, como el pH y la CE, son útiles para la delimitación de zonas de características homogéneas. Este enfoque se considera estratégico en términos de gestión agrícola, ya que tiene como objetivo prevenir la expansión de procesos de salinización en la región. Una vez realizada la delimitación de zonas es fundamental la validación o verificación de la misma, para esto puede ser útil la utilización de la producción de biomasa estimada a través de índice NDVI o el uso de mapas de rendimiento en el caso de contar con los mismos.

HIPÓTESIS

La variabilidad en la productividad del suelo en un paisaje ondulado de la planicie medanosa de la provincia de La Pampa puede ser determinada a partir los parámetros de pH y CE.

OBJETIVOS

Evaluar la variabilidad espacial de los suelos utilizando indicadores de fácil y rápida medición, específicamente el pH y la CE. Analizar las variables junto con la materia orgánica (MO) y la textura del suelo para identificar y definir una zona de transición entre áreas con frecuentes inundaciones y aquellas que no lo están.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se realizó en un establecimiento ubicado en el centro-este de la provincia de La Pampa (36°48'49"S; 63°51'22"O), cerca de la localidad de Cereales y dentro del departamento Catrilo (Figura 1).

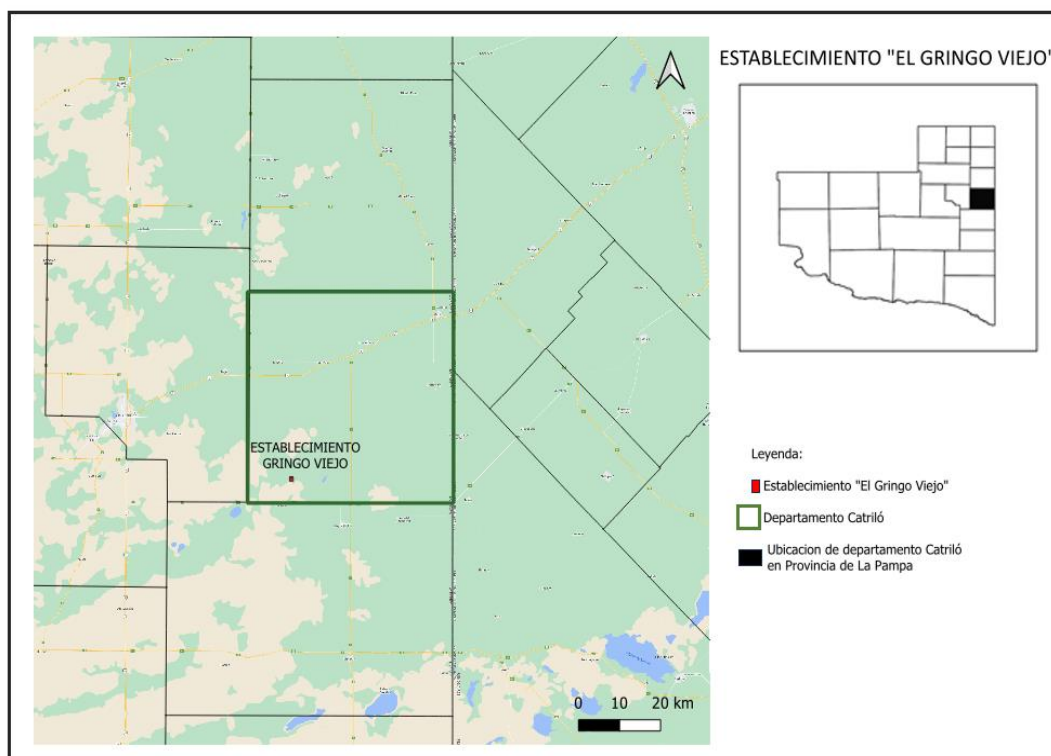


Figura 1. Localización de establecimiento “El Gringo Viejo”

El establecimiento se encuentra ubicado en la zona denominada “Planicie Medanososa”, la cual se trata de una zona caracterizada por ondulaciones arenosas con sentido Norte-Sur y médanos (INTA et al., 1980). Entre las ondulaciones se encuentran planicies arenosas de extensión variable, donde la presencia de áreas deprimidas favorece la formación de pequeñas lagunas temporales. Estas zonas, frecuentemente inundadas, se encuentran afectadas por procesos de salinización a causa del ascenso de la capa freática siendo importante focalizar las estrategias de manejo tendientes a evitar que la superficie aumente.

Utilizando información acerca del establecimiento (rotación de cultivos y precipitaciones) se estableció un rango de fechas óptimas (2015-2019) y se descargaron imágenes satelitales Landsat 8 de la web del United States Geological Survey (USGS, <http://earthexplorer.usgs.gov>), las cuales fueron procesadas con el Software QGIS determinando, para cada una, el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI)

con el objetivo de constatar cambios en las características edáficas que se reflejaran en los cultivos. A partir de esto se seleccionó un área de estudio de 20 hectáreas dentro del establecimiento, con un patrón espacial representativo de la fisonomía y topografía de la región, y se definió una grilla de 131 puntos de muestreo georreferenciados a una distancia entre sí de 25 metros para la zona del bajo y 50 metros para el resto del lote (Figura 2).

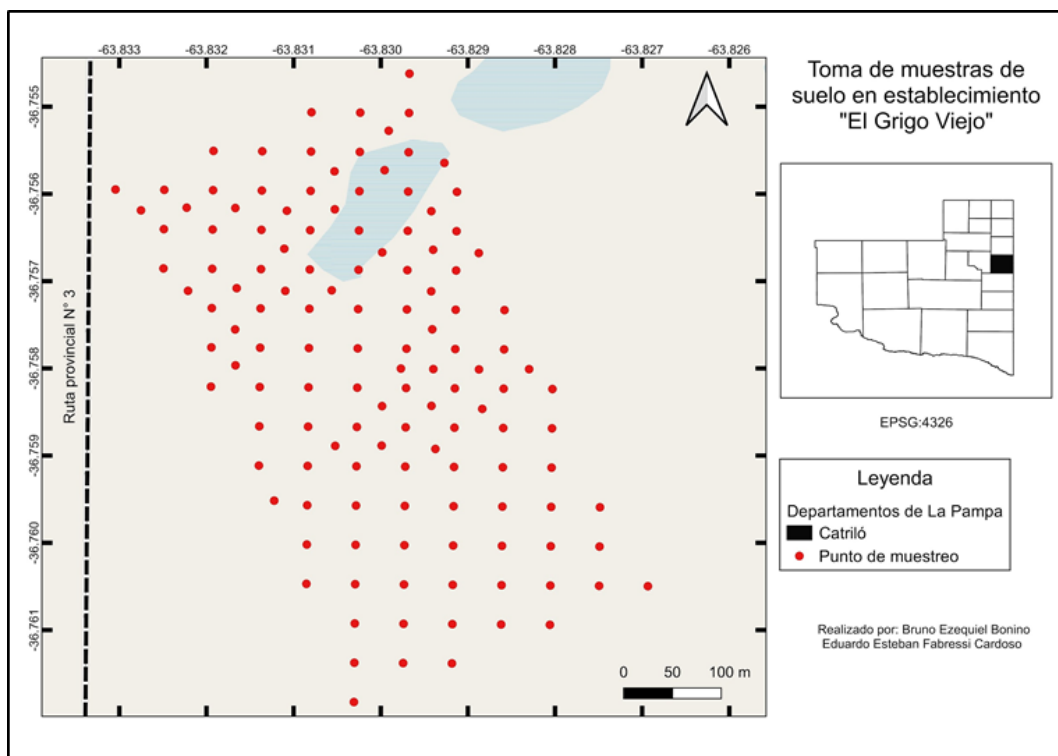


Figura 2. Área de trabajo en la que se observa los puntos de muestreos georreferenciados, sobre los cuales se extrajeron fracciones de suelos para su posterior análisis.

Durante el verano-otoño de 2021 se tomaron muestras de suelo a partir de los puntos de muestreo a dos intervalos de profundidad: 0-20 cm y 40-60 cm. Todos los puntos de muestreo se volvieron a georreferenciar utilizando un receptor del Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por su siglas en inglés) y para la extracción de las muestras se utilizó como instrumento un barreno. El total de muestras fue de 260, correspondientes a 130 puntos de muestreo. En el laboratorio de suelos de la Facultad de Agronomía de la UNLPam, las muestras fueron secadas a aire, tamizadas con un tamiz de 2 mm y se

determinó en una primera instancia CE, mediante el método por extracto acuoso en relación suelo agua 1:5, y pH por el método potenciométrico relación suelo agua 1:2,5. Los resultados de las determinaciones fueron analizados estadísticamente siguiendo el “Protocolo de análisis para la delimitación de zonas de manejo intralote” (Córdoba et al, 2013) y utilizados para segmentar el potrero en 2 y 3 ambientes homogéneos de menor superficie. Se seleccionaron 4 muestras en cada uno de los tres ambientes determinados al momento del muestreo para la determinación de textura, utilizando el método de Bouyoucos, y materia orgánica, mediante la digestión con ácido sulfúrico y dicromato de potasio. Estas dos propiedades fueron utilizadas para aportar información sobre las características de los suelos de distintos ambientes.

Análisis estadístico

Los resultados de las determinaciones fueron analizados estadísticamente siguiendo el “Protocolo de análisis para la delimitación de zonas de manejo intralote” (Córdoba et al, 2013) y utilizados para segmentar el potrero en 2 y 3 ambientes homogéneos de menor superficie. Este método contempla la caracterización de la distribución espacial de las variables pH y CE para las dos profundidades a través del conjunto completo de datos de los 131 puntos. Primero los datos se sometieron a un procedimiento de depuración mediante la construcción de diagramas de caja para identificar valores outliers. Se excluyeron los valores fuera de la media \pm dos desviaciones estándar. El índice de autocorrelación local de Moran (Anselin, 1995) y su diagrama de dispersión (Anselin, 1996) se utilizaron para identificar y excluir los inliers. La variabilidad espacial se caracterizó mediante la obtención y el ajuste de semivariogramas para cada variable en cada profundidad. Para esto, se evaluaron modelos esféricos y exponenciales y se eligió el que presentó menor error cuadrático medio. Luego, los datos fueron interpolados mediante Kriging ordinario y se obtuvieron los mapas de distribución espacial de cada

variable en cada profundidad (Figura 3). El procesamiento y análisis geoestadísticos se realizaron con el software estadístico R (R Development Core Team, 2014) y la biblioteca geoR (Ribeiro Jr. y Diggle, 2001). Luego a partir de las variables interpoladas se realizó un análisis de conglomerados Fuzzi k-means, CFK (Dray et al., 2008, Fridgen et al., 2004). Este método de agrupamiento es utilizado para identificar puntos con características similares de acuerdo a las variables analizadas, permitiendo delimitar zonas homogéneas dentro del lote. Se utilizó la distancia euclidiana para optimizar Fuzzi k-means. El exponente difuso se fijó en el valor convencional de 1,30 (Odeh et al., 1992). Se utilizaron los índice de rendimiento difuso (Fuzziness Performance Index, FPI) y la entropía normalizada de la clasificación (Fridgen et al., 2004) para determinar el número óptimo de grupos, en función del valor más bajo para cada indicador. Estos análisis se realizaron en R y las bibliotecas "cluster" (Maechler et al., 2015) y "e1071" (Meyer et al., 2009). Después de delimitar zonas, se aplicaron filtros espaciales para reducir la fragmentación (Ping y Dobermann, 2003, Lark y Stafford, 1998). Para estos análisis se utilizó la biblioteca "raster" (Chu et al., 2002) del software R que permite aplicar el filtro de mediana (González y Woods, 2007).

De acuerdo con los hallazgos encontrados en los análisis anteriores, se consideraron 2 y 3 zonas para verificar las diferencias en los valores del Índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI (Kriegler et. al. 1969), obtenidos a partir de 3 imágenes de la misión satelital Sentinel-2 MSI nivel 1C, correspondientes a las fechas 7/12/2020, 29/09/2021 y 22/11/22 (Figura 4). Este índice relaciona las bandas del espectro electromagnético que corresponde con las longitudes de onda del rojo e infrarrojo cercano, permite evaluar el nivel de estrés de la vegetación (S Huang et al, 2021). Las fechas de la adquisición de las imágenes fueron seleccionadas a partir del nivel de productividad de biomasa que expresaban los cultivos (girasol 2020, alfalfa 2021 y 2022) establecidos para el área de

estudio. Estos análisis se realizaron utilizando modelos lineales mixtos, que contemplan la falta de independencia entre los datos (Schabenberger y Pierce, 2001). Posteriormente las medias se compararon mediante la prueba LSD Fisher (Alfa=0,05) en el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2013).

Por último, para los valores obtenidos de los análisis de materia orgánica y textura se realizó un análisis de la varianza y test de comparación de medias (LSD Fisher, alfa=0,05) para los grupos muestrales de 2 y 3 zonas consideradas.

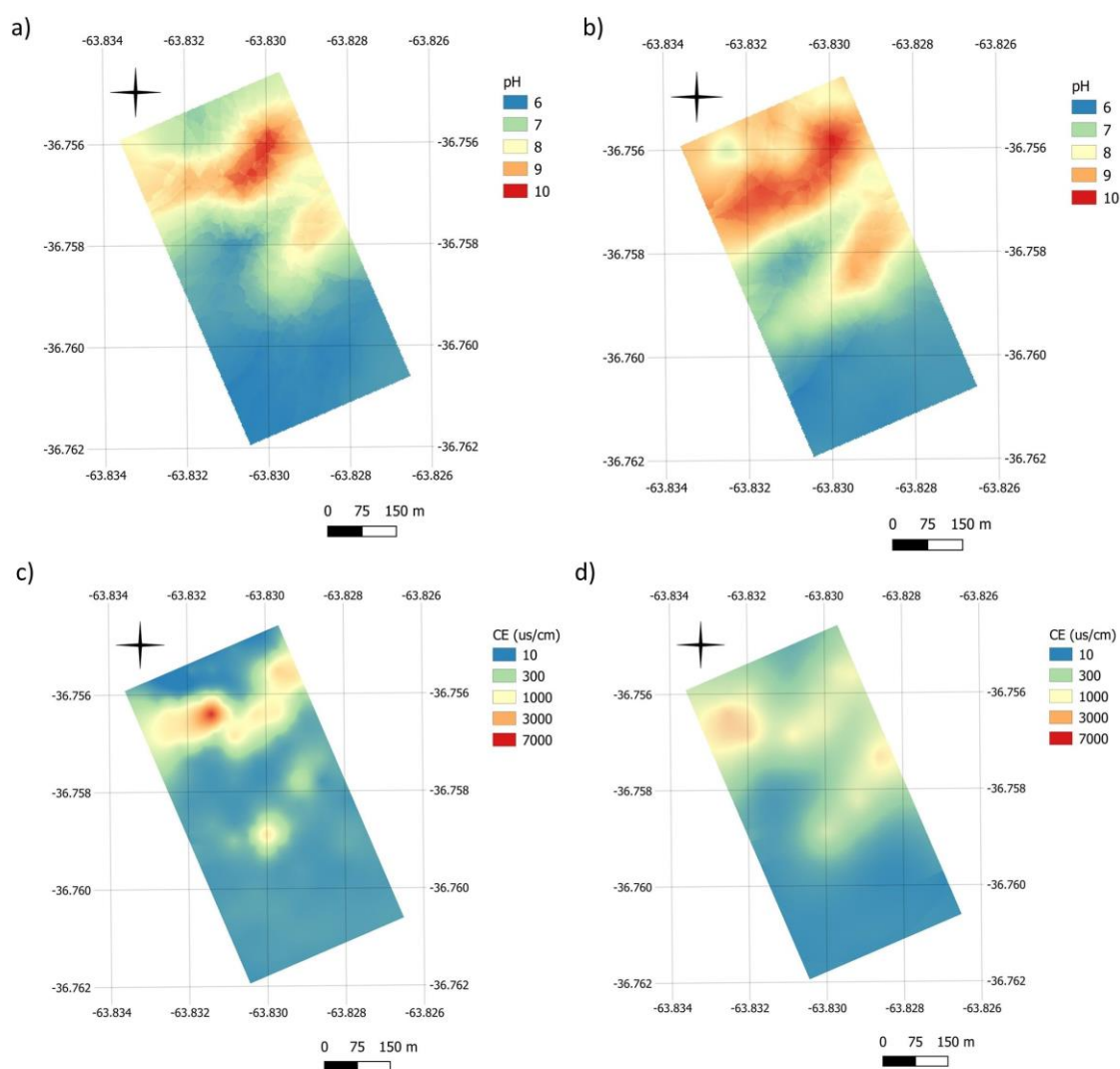


Figura 3. Mapas de interpolación de las variables a) pH 0 – 20 cm b) pH 40-60 cm c) conductividad eléctrica 0-20 y d) conductividad eléctrica 40-60 cm

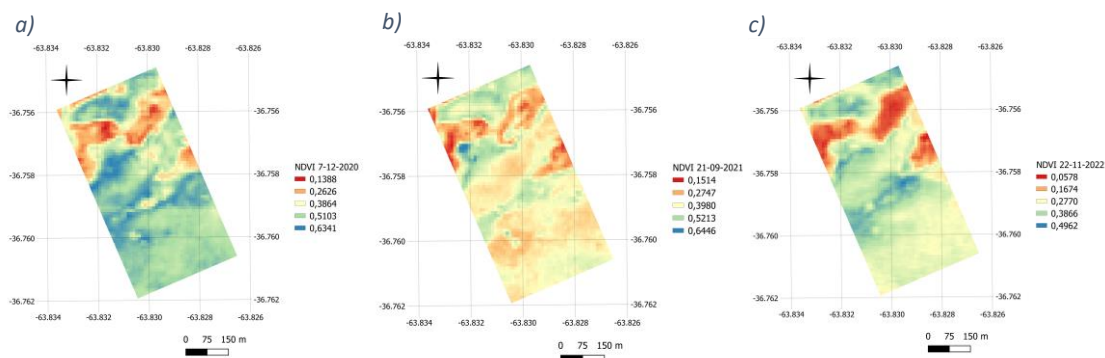


Figura 4. NDVI producto de imágenes sentinel para las fechas: a) 7/12/2020 b) 21/09/2021 c) 22/11/2022

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Considerando las variables pH y CE a las dos profundidades, se pudieron clasificar según el análisis estadístico CFK, 2 y 3 zonas homogéneas (Figura 5).

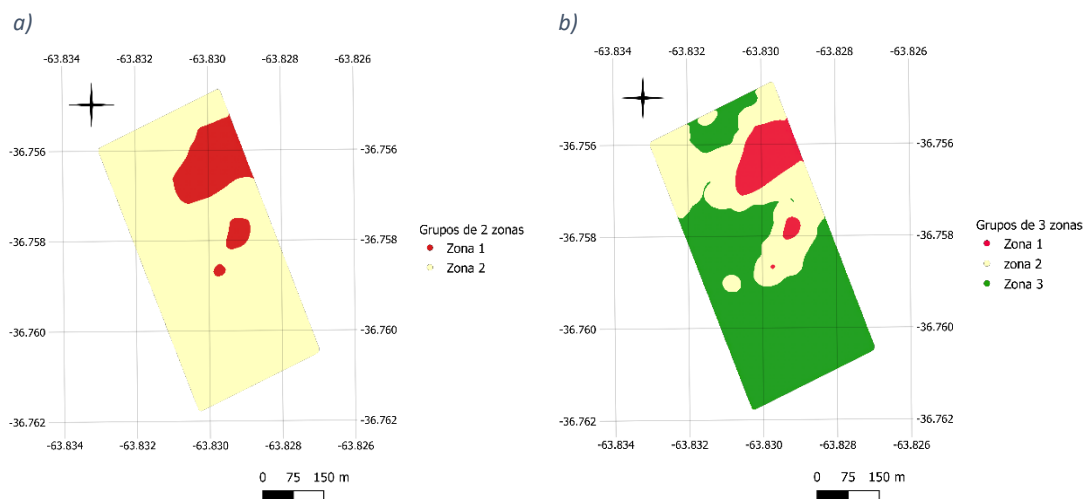


Figura 5. Resultados del análisis de conglomerados Fuzzi k-means. a) 2 Zonas b) 3 zonas

De acuerdo al modelo aplicado para realizar la comparación de medias de los valores de NDVI correspondiente a los dos grupos de zonas clasificadas (2 y 3 zonas), se pudo corroborar que hubo diferencias significativas para ambos (Tabla 1 a y b).

Tabla 1. Resultado para modelo lineales generales y mixtos para: a) 2 Zonas, b) 3 Zonas

a)

Pruebas de hipótesis marginales		NDVI 2020		NDVI 2021		NDVI 2022	
p-valor		<0.0001		0.0045		<0.0001	
Medias ajustadas y errores estándares para 2 Zonas	Zonas	2	1	2	1	2	1
	Media	0.50	0.36	0.40	0.37	0.33	0.23
	EE	4.3E ⁻⁰³	0.01	0.01	0.01	3.6E ⁻⁰³	0.01
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p>0.05)		A B		A B		A B	

b)

Pruebas de hipótesis marginales		NDVI 2020			NDVI 2021			NDVI 2022		
p-valor		<0.0001			<0.0001			<0.0001		
Medias ajustadas y errores estándares para 3 Zonas	Zonas	3	2	1	3	2	1	3	2	1
	Media	0.40	0.52	0.37	0.38	0.40	0.37	0.26	0.34	0.23
	EE	0.01	3.4E ⁻⁰³	0.01	0.01	3.4E ⁻⁰³	0.01	0.01	2.9E ⁻⁰³	0.01
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p>0.05)		A B C			A B C			A B C		

A continuación, se presentan los valores obtenidos de materia orgánica expresados como porcentaje de la masa total del suelo, y la textura (suma de limo y arcilla), expresados en porcentaje de la fracción mineral (Figura 6) y su análisis estadístico (Tabla 2).

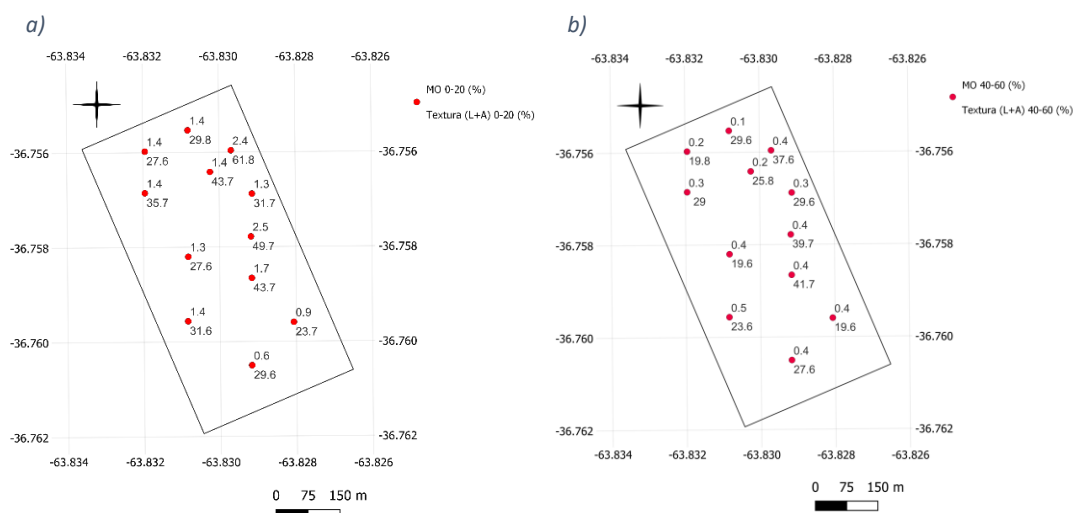


Figura 6. Valores de materia Orgánica y textura (limo + arcilla) expresados en % para dos profundidades en el suelo: a) 0-20 cm b) 40-60 cm

Tabla 2. Análisis de la varianza y test de comparación de medias para: **a)** 2 Zonas, **b)** 3 Zonas

a)

Análisis de la varianza		MO 0-20cm		MO 40-60		Tex 0-20		Tex 40-60	
p-valor		0.0104		0.6688		0.0009		0.1402	
Medias ajustadas y errores estándares para 2 Zonas	Zonas	2	1	2	1	2	1	2	1
	Media	1.27	2.10	0.36	0.33	31.22	51.73	26.68	34.37
	EE	0.13	0.23	0.03	0.06	2.19	3.80	2.4	4.16
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)		A B		A A		A B		A A	

b)

Análisis de la varianza		MO 0-20cm			MO 40-60			Tex 0-20			Tex 40-60		
p-valor		0.0263			0.7543			0.0008			0.0369		
Medias ajustadas y errores estándares para 3 Zonas	Zonas	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1
	Media	1.17	1.47	2.10	0.33	0.33	0.38	28.3	37	51.7	23.3	33.4	34.4
	EE	0.16	0.23	0.23	0.6	0.6	0.5	2.28	3.23	3.23	2.41	3.40	3.40
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)		A AB B			A A A			A A B			A B B		

La identificación adecuada de zonas de manejo para estos tipos de ambientes es fundamental para optimizar el uso de recursos y mejorar la productividad agrícola. En este estudio se validó que los parámetros pH y CE del suelo permiten definir zonas de características homogéneas. Estas variables son fáciles de medir y permiten obtener una clasificación precisa de la aptitud del suelo, específicamente en áreas inundables y/o salinas. Se pudo comprobar que las 2 y 3 zonas obtenidas a partir de las variables de pH y CE guardan una relación con niveles de productividad de biomasa de vegetación obtenidos a partir de NDVI (tabla 1 a y b). Por lo tanto, se puede afirmar que el componente obtenido de la asociación de pH y CE es un parámetro adecuado para

ambientar lotes con problemas de salinidad. El ambiente con mayor pH y CE (zona 1) presentó una mayor concentración de materia orgánica en 0-20 cm y una textura más fina (mayor porcentaje de limo más arcilla) para ambas profundidades (tabla 2, a y b). La presencia de alto contenido de sales y sodio provoca una dispersión de la arcilla y la MO, dando lugar a una apariencia oscura y generando las características principales de estos suelos que son duros y con baja capacidad de infiltración. Las características expuestas son altamente perjudiciales para el crecimiento y desarrollo de muchas especies vegetales ya que se ve reducida la disponibilidad de agua por la disminución del potencial osmótico del medio edáfico. Por otro lado, puede generarse en las plantas un desbalance nutricional y toxicidad iónica (Tester y Davenport, 2003). En este tipo de suelos que padecen problemas físicos por presentar una falta de estructura y baja porosidad, el lavado de sales del suelo para su mitigación no es adecuada, debido a la deficiencia de drenaje y a la presencia de niveles freáticos cercanos a la superficie. La recuperación, por lo tanto, es aconsejable que sea abordada por otras vías. La aplicación de yeso con el objetivo de eliminar el sodio de cambio y así disminuir el pH, en grandes extensiones es casi inviable por el costo y por las grandes cantidades de este mineral a aplicar. Entre las alternativas productivas para llevar adelante un manejo sustentable se aconseja la inclusión de gramíneas en la rotación, evitando la práctica del monocultivo, la cual acelera los procesos de degradación del suelo. De este modo, se podrá aumentar la eficiencia de los recursos naturales e incrementar y estabilizar la producción agrícola. Por ejemplo, haciendo referencia a la Figura 5 b, en la zona 2 donde el ambiente corresponde a un área con salinidad moderada, los barbechos podrían reemplazarse por cultivos de cobertura (Whitworth-Hulse et al., 2023) o en la rotación de cultivos incluir pasturas permanentes, de esta manera, se aumentaría el consumo de agua y a su vez mejoraría la estructura del suelo y la infiltración (Nosetto et al., 2015). Las pasturas perennes (especialmente las

consociadas con alfalfa) tienen mayor profundidad de raíces y períodos más prolongados de crecimiento que los cultivos anuales, lo cual determina mayor consumo de agua y niveles freáticos más alejados de la superficie (Ridley et al., 2001; Keating et al., 2002). Especies de buen comportamiento por su elevada actividad radical y producción de materia seca son agropiro (*Thynapirum ponticum*), trébol de olor blanco (*Melilotus albus*) y lotus (*Lotus tenuis*) entre otras. Para superficies que no contienen salinidad (Figura 5 b, zona 3) se debe partir de un adecuado manejo de las rotaciones de los cultivos. La sincronización del estado fenológico de los cultivos con los periodos del año en los cuales la oferta de recursos y las condiciones ambientales resultan más favorables constituye una de las principales estrategias para estabilizar los rendimientos, sobre todo en aquellos ambientes con limitaciones hídricas. La inclusión de gramíneas como sorgo y trigo en las rotaciones aportan mayores niveles de carbono y los balances de materia orgánica resultan más favorables, generando mayor estructura e infiltración del suelo. Así, se evita o minimiza el escurrimiento superficial de agua hacia las áreas deprimidas que incrementan el ascenso de los niveles freáticos y por ende acumulación de sales en superficie o cercana a esta. En los ambientes con salinidad alta (Figura 5 b, zona 1) una alternativa efectiva es la incorporación de especies forrajeras tolerantes a la salinidad y sodicidad del suelo. Esto permite por un lado mantener un nivel de producción de biomasa estable, y por otro, aumentar la actividad biológica y estructura del suelo. En la porción más afectada de esta zona, es común encontrar áreas sin vegetación, conocidas como peladales. En tales casos, sería recomendable la creación de cercos o clausuras para estimular la proliferación de especies halófitas, las cuales actúan como barreras naturales para evitar la expansión del área salina hacia lugares menos afectadas (Cantero et al, 2011, Degioanni et al, 2020)

Las características de estos ambientes tienen patrones recurrentes en zonas aledañas al área de estudio. Para mitigar el avance de suelos afectados por salinidad en la región, es

importante llevar a cabo estrategias combinadas, entre las cuales el uso y el cambio de cobertura del suelo son prioritarias.

CONCLUSIÓN

Los resultados de este trabajo muestran que indicadores de rápida y sencilla medición como el pH y la CE permiten definir zonas de características homogéneas y que estas zonas definidas guardan relación con niveles de producción de biomasa obtenidos a partir de NDVI. Por lo tanto, el componente obtenido de la asociación de pH y CE es adecuado para ambientar lotes y/o campos con el objetivo de ser eficiente desde el punto de vista de uso de recursos y, al mismo tiempo, evitar la propagación de procesos degradativos del recurso suelo como la salinización.

BIBLIOGRAFÍA

- Degioanni, A., Cisneros, J., Cantero, J., Plevich, O., Cantero, A. 2023. Tecnologías para recuperar la producción de biomasa en suelos salinos. *Ab Intus*, (5), 94–111.
http://www.ayv.unrc.edu.ar/ojs/index.php/Ab_Intus/article/view/74
- Brown, D.G., Verburg, P.H., Pontius, R.G., Lange, M.D., 2013. Opportunities to improve impact, integration, and evaluation of land change models. *Curr. Opin. Environ. Sustain*, 5 (2013), pp. 452-457. doi.org/10.1016/j.cosust.2013.07.012
- Cantero, J., Cisneros, J., Giayetto, O., Nuñez, C., de Prada, J. y Piola, M. (2011). Estrategias de manejo de la vegetación natural en ambientes salinos. En *Actas II Reunión de la Red Argentina de Salinidad*. San Miguel de Tucumán, pag.16.
- Cassma – 1999 - Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agricultura. *Proc Natl Acad Sci Unit States Am*, 96 (1999), pp. 5952-5959

- Chapin, F.S., Carpenter, S.R., Kofinas, G.P., Folke, C., Abel, N., Clark, W.C., Olsson, P., Smith, D.M.S., Walker, B., Young, O.R., Berkes, F., Biggs, R., Grove, J.M., Naylor, R.L., Pinkerton, E., Steffen, W., Swanson, F.J., 2010. Ecosystem stewardship: sustainability strategies for a rapidly changing planet. *Trends Ecol. Evol.* 25, 241–249.
- Chapin, F.S., Mark, A.F., Mitchell, R.A., Dickinson, K.J.M., 2012. Design principles for social-ecological transformation toward sustainability: lessons from New Zealand sense of place. *Ecosphere* 3, art40. doi.org/10.1890/ES12-00009.1
- Córdoba, M., Bruno, C., Costa, J.L., Balzarini., 2013; Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, CONICET, Córdoba-Argentina
- Coutinho, H.L.C., Noellemeyer, E., Jobbagy, E., Jonathan, M., 2006. Impacts of Land Use Change on Ecosystems and Society in the Rio de La Plata Basin. *Development* 1–24.
- Fu, W., Tunney, H., & Zhang, C., 2010. Spatial variation of soil nutrients in a dairy farm and its implications for site-specific fertilizer application. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 185–193. doi.org/10.1016/j.still.2009.12.001.
- Guida Johnson, B., Zuleta, G.A., 2013. Land-use land-cover change and ecosystem loss in the Espinal ecoregion, Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 181, 31–40.
- Huang, S, Tang, L, Hupy, Y Wang, Shao, G., 2021. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *J. For. Res.*, 31 (5) (2020), doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1
- Huber-Sannwald, E., Palacios, M.R., Moreno, J.T.A., Braasch, M., Peña, R.M.M., Verduzco, J.G.D.A., Santos, K.M., 2012. Navigating challenges and opportunities

of land degradation and sustainable livelihood development in dryland social-ecological systems: a case study from Mexico. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 367, 3158–77. doi.org/10.1098/rstb.2011.0349

INTA, Gobierno de La Pampa, & Universidad Nacional de La Pampa. (1980).

Inventario integrado de los recursos naturales de la provincia de La Pampa.

Jaynes, D.B., Colvin, T.S., Kaspar, T.C., 2005. Identifying potential soybean management zones from multi-year yield data. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 309–327.

Jie, C., Jing-zhang, C., Man-zhi, T., & Zi-tong, G., 2002. Soil degradation: a global problem endangering sustainable development. *Journal of Geographical Sciences*, 12, 243–252. doi.org/10.1007/bf02837480.

Keating, B. A., Gaydon, D., Huth, N. I., Probert, M. E., Verburg, K., Smith, C. J., Bond, W., 2002. Use of modelling to explore the water balance of dryland farming systems in the Murray-Darling Basin, Australia. *European Journal of Agronomy*, 18, 159–169. doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00102-8

Kirkby, M.J., Bissonais, Y. Le, Coulthard, T.J., Daroussin, J., McMahon, M.D., 2000. The development of land quality indicators for soil degradation by water erosion. *Environment* 81, 125–135.

Kriegler FJ, Malila WA, Nalepka RF, Richardson W., 1969. Transformaciones de preprocesamiento y su efecto en el reconocimiento multiespectral. *Entorno de sensores remotos* VI:97–132.

Melchiori. 2002. Spatial variability of wheat yield, association with edaphic parameters and assessment of application of nitrogen for specific sites. Thesis for Master of Science degree. National University of Mar del Plata, Balcarce, Argentina.

Moral, F. J., Terro´n, J. M. and Marques da Silva, J. R., 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geo-statistical techniques. *Soil Tillage Res.* 106: 335343.

Nosetto, M.D., Jobbágy, E.G., Brizuela, A.B., Jackson, R.B., 2011. The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 154, 2–11. doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.008

Nosetto, M. D., Paez, R. A., Ballesteros, S. I. & Jobbagy, E. G., 2015. Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the Pampas. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206, 60–70. doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.009

Reyniers, M., Maertens, K., Vrindts, E., De Baerdemaeker, J., 2006. Yield variability related to landscape properties of a loamy soil in central Belgium. *Soil & Tillage Research* 88, 262–273.

Ridley, A. M., Christy, B., Dunin, F. X., Haines, P. J., Wilson, K. F., Ellington, A., 2001. Lucerne in crop rotations on the Riverine Plains. 1. The soil water balance. *Australian Journal of Agricultural Research*, 52, 263–277. doi.org/10.1071/AR99165

Robert, P., 1993. Characterization of soil conditions at the field level for soil specific management. *Geoderma* 60, 57–72.

- Taleisnik E., Lavado R.S., 2017. Ambientes salinos y alcalinos en la Argentina. Recursos y aprovechamiento productivo. Orientación Gráfica Editora, Universidad Católica de Córdoba, Buenos Aires, p 624.
- Tester, M., Davenport, R.J., 2003. Na⁺ Tolerance and Na⁺ Transport in Higher Plants. *Ann. Bot.* 91, 503-527.
- Vitharana, U.W.A., Van Meirvenne, M., Simpson, D., Cockx, L., De Baerdemaeker, J., 2008. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. *Geoderma*, 143 (2008), pp. 206-215
- Whelan, B.M., McBratney, A.B. The “Null Hypothesis” of Precision Agriculture Management. *Precision Agriculture* 2, 265–279 (2000).
- Whelan, B.M., Cupitt, J., McBratney, A.B., 2002. Practical definition and interpretation of potential management zones in Australian dryland cropping. In: Robert, P.C., Rust, R.H., Larson, W.E. (Eds.), *Precision Agriculture*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, pp. 325–329.
- Whitworth-Hulse, J.I, Jobbágy, E.G., Borrás, L., Alsina, S.E., Houspanossian j., Nosetto, M.D., 2023. The expansion of rainfed grain production can generate spontaneous hydrological changes that reduce climate sensitivity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 349, p. 10844. doi.org/10.1016/j.agee.2023.108440
- Zach, A., Tiessen, H., Noellemeyer, E., 2006. Carbon Turnover and Carbon-13 Natural Abundance under Land Use Change in Semiarid Savanna Soils of La Pampa, Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 1541–1546. doi.org/10.2136/sssaj2005.0119