

Conductividad eléctrica aparente para delimitar zonas de manejo en un suelo agrícola con reducida variabilidad en propiedades físico-químicas

Coitiño-López Javier^{1*}, Barbazán Mónica², Ernst Oswaldo¹

¹*Departamento de Producción Vegetal, Estación Experimental Mario A. Cassinoni, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Ruta 3 km 363, Paysandú 60000, Uruguay. Correo electrónico: javierc@fagro.edu.uy*

²*Departamento de Suelos y Aguas, Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Garzón 780, Montevideo 12900, Uruguay*

Recibido: 20/2/14 Aceptado: 26/1/15

Resumen

La variación espacial en suelos y cultivos podría ser incorporada a los sistemas de manejo agronómico para optimizar el uso de recursos dentro de chacras. Para ello es necesaria una caracterización espacial de los recursos agroecológicos. Las mediciones de conductividad eléctrica aparente (CEa) han sido propuestas como una forma confiable de caracterizar la variación en propiedades edáficas. En este estudio los objetivos fueron i) cuantificar las relaciones de CEa con atributos del terreno, propiedades físicas y químicas del suelo, y ii) determinar si se pueden delimitar zonas con diferencias en propiedades edáficas y topográficas a partir de CEa en un suelo agrícola de Uruguay. Se realizó un muestreo en grilla en un sector de 4,2 ha en una chacra. Se determinaron bases intercambiables, materia orgánica, fósforo disponible, textura, resistencia a la penetración, conductividad eléctrica directa del suelo, profundidad de suelo, CEa a dos profundidades y atributos del terreno. Con los datos de CEa se delimitaron zonas de manejo mediante un procedimiento de agrupación por medias-c difusas. La CEa mostró correlaciones ($P \text{ valor} \leq 0,05$) medias a bajas con diversas propiedades tanto físicas como químicas del suelo, y con atributos del terreno. Se identificaron tres zonas según CEa, dos de las cuales tuvieron características similares y se diferenciaron de la tercera por presentar más potasio, calcio y magnesio intercambiables y más materia orgánica, y menos sodio intercambiable. Bajo las condiciones del estudio la CEa resultó útil para identificar zonas con diferentes propiedades edáficas, posibles de ser incorporadas en esquemas de agricultura de precisión.

Palabras clave: zonas de productividad, sensor Veris, atributos topográficos, atributos edáficos

Summary

Apparent Electrical Conductivity to Delineate Management Zones in an Agricultural Soil with Reduced Variability in Physico-chemical Properties

The spatial variation in soils and crops could be included into agricultural management systems to optimize the use of resources within fields. This requires a spatial characterization of agroecological resources. Apparent soil electrical conductivity (ECa) has been proposed as a reliable way to characterize the variation in soil properties. In this study the objectives were: i) quantify ECa relationships with terrain attributes and soil physical and chemical properties, and ii) determine if ECa can be used to delineate zones with differences in edaphic and topographic properties in an agricultural soil of Uruguay. A grid soil sampling was conducted in an area of 4.2 ha in a field. Exchangeable bases, organic matter, available phosphorus, texture, penetration resistance, direct electrical conductivity of the soil, soil depth, ECa at two depths, and terrain attributes were determined. The management zones were delineated using a fuzzy c means clustering analysis with the ECa data at two depths. The ECa showed medium to low correlations ($P \text{ value} \leq 0.05$) with various soil physical and chemical properties and terrain attributes. Three zones were identified according ECa, two of which had similar characteristics and differed from the third

to present more exchangeable potassium, calcium, magnesium and soil organic matter and lower exchangeable sodium. Under the conditions of the study ECa proved be useful for identifying zones with different soil properties, and potentiality to be incorporated into precision farming schemes.

Keywords: productivity zones, Veris sensor, topographical attributes, edaphic attributes

Introducción

En muchos sistemas productivos es frecuente la presencia de variación espacial en propiedades del suelo y atributos del terreno dentro de chacras, que resulta en variabilidad del rendimiento de los cultivos a través de las mismas (Kravchenko y Bullock, 2000; Cox *et al.*, 2003; Terra *et al.*, 2006). Entre las propiedades edáficas relacionadas con variaciones en los rendimientos se mencionan el contenido de materia orgánica, potasio (K) intercambiable, fósforo (P) disponible, magnesio (Mg) intercambiable, textura, conductividad eléctrica y pH (Kravchenko *et al.*, 2003; Kaspar *et al.*, 2004; Terra *et al.*, 2006, 2010). También han sido indicados como fuente de variación espacial de rendimientos atributos del terreno que influyen sobre la dinámica superficial del agua de escurrimiento, como elevación, pendiente, curvatura, área específica de cuenca, aspecto, e índices derivados de estos (Kaspar *et al.*, 2004; Green *et al.*, 2007; Parent *et al.*, 2008). El reconocimiento de esta variación dio origen al concepto de agricultura de precisión, en que se propone variar las medidas de manejo agronómico según algunas características de los suelos y cultivos en cada sitio de una chacra (Lark y Wheeler, 2003). Existen estrategias que proponen cuantificar los atributos de suelo y terreno e identificar áreas con similares combinaciones de factores limitantes del rendimiento llamadas zonas de manejo, tales que requieran un manejo uniforme y focalizado a la limitante principal (Plant, 2001).

Las propiedades del suelo que afectan el comportamiento de los cultivos presentan en muchos casos gran variación en cortas distancias (Woolenhaupt *et al.*, 1997; Mulla y McBratney, 2002), por tanto, cuando la propuesta de delimitación de zonas de manejo requiere conocer esa distribución espacial serían necesarios muestreos intensos. En consecuencia sería de utilidad conocer las relaciones de algunas propiedades edáficas que en general son costosas y laboriosas de medir, con otras propiedades de menor costo y más fácil obtención como los atributos del terreno y conductividad eléctrica aparente (CEa).

La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad del suelo de conducir una corriente eléctrica (McNeill, 1992), en tanto que la CEa es una medida de la conductivi-

dad eléctrica promedio representativa del perfil de suelo, hasta una profundidad dependiente del equipo utilizado (Cook y Walker, 1992). Las mediciones georreferenciadas de CEa del suelo se pueden realizar en forma intensiva y económica, y han sido consideradas como una buena forma de caracterizar la variación espacial en propiedades edáficas y optimizar los muestreos de suelos de propiedades que afectan el rendimiento de los cultivos (Corwin y Lesch, 2003; Moral *et al.*, 2010). La CEa usualmente se relaciona con diversas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo entre las que se encuentran sales solubles, contenido y mineralogía de arcilla, contenido de agua, densidad aparente, estructura, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y temperatura del suelo (por revisiones ver Corwin y Lesch, 2005; Friedman, 2005). Pero establecer las relaciones no sería algo sencillo por la dependencia de la CEa de muchas variables vinculadas en forma compleja y que varían en diferentes escalas.

Muchos de los trabajos en que se ha estudiado la asociación entre propiedades físicas y químicas del suelo con CEa (Sudduth *et al.*, 2005; Moral *et al.*, 2010; Terrón *et al.*, 2011; Simón *et al.*, 2013;) o se ha evaluado la utilidad de la CEa en identificar zonas de manejo (Fraisse *et al.*, 2001; Kitchen *et al.*, 2005; Dang *et al.*, 2011; Diacono *et al.*, 2013), fueron realizados en situaciones donde la variabilidad presente tanto en CEa como en otras características del suelo se situó en valores medios a altos. Sin embargo, resta conocer qué sucede cuando se trabaja en sitios con rangos de variabilidad ubicados en niveles inferiores.

Los objetivos del presente estudio fueron: i) cuantificar las relaciones de CEa del suelo con algunas propiedades edáficas y del terreno y ii) determinar si a partir de CEa se pueden identificar zonas diferentes en cuanto a las propiedades que afectan a los cultivos en un sector de una chacra agrícola ubicada en el litoral oeste de Uruguay.

Materiales y métodos

Sitio experimental y muestreo de suelos

La investigación se realizó en una chacra comercial ubicada en el paraje El Tala (S -33,28° O -57,41°), Departamento de Soriano, Uruguay, manejada en agricultura

continúa en siembra directa desde hace 15 años. El trabajo se extendió durante las zafas agrícolas 2011-2012 y 2012-2013. El área del sitio en estudio fue de 4,2 ha e intentó abarcar todas las posiciones topográficas presentes en el campo, incluyendo una loma, ladera alta y ladera media. La región donde se localizó el sitio tiene un paisaje dominado por colinas suaves y los suelos predominantes son Brunosoles Éutricos típicos (Argiudoles Típicos) transicionales entre las unidades Riso y Cuchilla de Corralito según la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay (Altamirano *et al.*, 1976). En cultivos anteriores al trabajo se realizó fertilización uniforme con P y K.

Se realizaron muestreos de suelo siguiendo una grilla sistemática de 22 m X 30 m totalizando 64 sitios de muestreo, donde cada uno comprendió un área circular de 4 a 5 m de radio desde el punto central. En noviembre de 2011, luego de la cosecha de trigo y previo a la siembra de soja, se tomaron muestras de suelo de la capa superficial (0-15 cm) compuestas por 12 tomas con calador, que a su vez se dividieron en dos profundidades (0-7,5 cm y 7,5-15 cm). Las muestras se conservaron en bolsas plásticas en refrigerador hasta ser secadas en estufa de aire forzado a 40 °C durante 48 h y posteriormente molidas hasta pasar a través de una malla de 2 mm. Se realizó extracción de bases intercambiables con acetato de amonio ($\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$) 1M con una relación suelo solución 1:10, a partir de la cual se analizó K y sodio (Na) por espectrofotometría de emisión, y calcio (Ca) y Mg intercambiables por lectura en espectrofotómetro de absorción atómica modelo 373 (Perkin Elmer Inc., Waltham, MA, EUA). A su vez fueron analizados P disponible mediante Bray 1 (Bray y Kurtz, 1945) y materia orgánica por el método de oxidación con dicromato (Walkley y Black, 1934). Todos los análisis químicos se realizaron a ambas profundidades, siendo promediados posteriormente dentro de cada sitio asumiendo densidad aparente constante, para obtener datos correspondientes a la profundidad 0-15 cm. Adicionalmente se formaron muestras compuestas de cada sitio, con iguales proporciones de las dos profundidades (0-7,5 cm y 7,5-15 cm), donde se analizó la distribución de tamaños de partículas por el método del hidrómetro, con oxidación previa de materia orgánica (Gee y Or, 2002). Se registraron la profundidad del horizonte A y profundidad total del suelo mediante perforaciones realizadas con barreno en la mitad de los sitios de muestreo, de forma tal que cada sitio no muestreado contó a sus lados con otros en que se relevó la profundidad.

En diciembre de 2012 durante la implantación de un cultivo de soja se midió la resistencia a la penetración del

suelo, a través del método Índice de Cono con penetrómetro electrónico Rimik CP 20. Se registraron valores a intervalos verticales de 2 cm hasta una profundidad de 40 cm. Por sitio de muestreo se realizaron dos inserciones, siendo promediados los datos de ambas. Posteriormente se calcularon valores promedio para intervalos de 4 cm. En el mismo momento se realizaron mediciones de CE directa, insertando un sensor en el suelo a dos profundidades, 7 y 40 cm, con un equipo portátil Spectrum EC110. Dichas mediciones se realizaron en dos lugares dentro de cada sitio, para luego promediarlos. Tanto la medición de resistencia a la penetración como la de conductividad eléctrica directa con el equipo portátil fueron ejecutadas en condiciones de humedad del suelo próximas a capacidad de campo.

Mediciones de CEa

Los datos de CEa se recolectaron en invierno de 2013, con un equipo Veris 3100 (Veris Technologies Inc., Salina, KS, EUA) asociado a un GPS con corrección diferencial, que permitió georreferenciar las mediciones. En ese momento la chacra estaba en barbecho y las condiciones de humedad fueron próximas a capacidad de campo. El relevamiento del área se realizó traccionando el dispositivo con un vehículo en transectas espaciadas aproximadamente 11 m entre sí. La CEa del suelo, en miliSiemens por metro (mS m^{-1}) se registró en intervalos de 1 s, brindando puntos espaciados entre 2,5 y 3,5 m. El Veris 3100 permite realizar dos lecturas de CEa en forma simultánea, una superficial (CEa-s) en que el 90% de la respuesta es obtenido de los primeros 30 cm del suelo, y una lectura profunda (CEa-p) en que el 90 % de la respuesta corresponde a una profundidad de suelo de 100 cm (Sudduth *et al.*, 2005). Simultáneamente a la ubicación de las mediciones de CEa el GPS registró datos de elevación del terreno, a partir de los cuales se calcularon atributos topográficos.

Manejo y análisis de datos

A partir de los datos de CEa y elevación se realizaron interpolaciones mediante el procedimiento geoestadístico Kriging ordinario, siguiendo los pasos indicados por Webster y Oliver (2007). De esa forma se logró un modelo digital de elevación y mapas de CEa-s y CEa-p para toda el área en estudio. Luego los valores interpolados se rasterizaron a una grilla de 2 X 2 m. A partir del modelo digital de elevación se calcularon atributos del terreno empleando los algoritmos correspondientes en ArcMap 10.0 (Environmental System Research Institute, Redlands, CA, EUA). Los

atributos primarios del terreno calculados fueron pendiente, aspecto, curvatura del perfil y curvatura del plano y área específica de cuenca (Wilson y Gallant, 2000), en tanto los atributos secundarios fueron Índice topográfico de humedad (TWI), Índice de poder de escorrentía (SPI) e Índice de capacidad de transporte de sedimentos (LS) (Moore *et al.*, 1993). Se calcularon valores de atributos del terreno y CEa promedio para cada sitio de muestreo a partir de los píxeles comprendidos en un radio de 5 m desde el punto central.

Para todas las variables se determinaron los estadísticos descriptivos media, desvío estándar, coeficiente de variación, rango, percentil 15 y percentil 85. Con los datos relevados en todos los sitios de muestreo se calcularon coeficientes de correlación de Pearson entre propiedades del suelo y atributos del terreno con CEa. El coeficiente de correlación si bien provee medidas promedio de las relaciones entre variables evaluadas, no toma en cuenta la ubicación espacial de las mediciones. Para las variables en que no se encontraron relaciones lineales significativas, se estudió la existencia de relaciones cuadráticas.

Con el fin de identificar zonas homogéneas dentro del campo en cuanto a CEa, se realizó un análisis de clusters (Khattree y Naik, 2000). Para formar los grupos (clusters) se consideraron en forma conjunta la CEa-s y CEa-p para cada sitio de muestreo. Los grupos fueron creados con un procedimiento de medias-c difusas, que consiste en una clasificación continua no supervisada, mediante el software Management Zone Analyst (MZA) (Fridgen *et al.*, 2004). Se utilizaron dos índices para definir el número óptimo de grupos a formar, el índice de desempeño difuso (FPI) y el de clasificación de entropía normalizada (NCE) (Fridgen *et al.*, 2004). Posteriormente se estudiaron mediante análisis de varianza las diferencias entre grupos en propiedades físicas y químicas de suelo, y del terreno que se correlacionaron significativamente con CEa, con el fin de caracterizar cada zona e identificar diferencias. Las medias se compararon con el Test de Tukey ($P < 0,05$). Los análisis se efectuaron con el paquete estadístico Infostat/E.

Resultados

Los estadísticos descriptivos para las variables físicas y químicas de suelo, atributos del terreno y CEa se resumen en el Cuadro 1. La textura superficial presentó proporciones similares de arcilla, limo y arena, correspondiendo a la clase textural franco arcilloso. A su vez los rangos de variación de las fracciones granulométricas fueron estrechos, con valores máximos cercanos a 5 % cuando no se consideran los valores extremos. El Ca fue el catión predominante

en el complejo de bases de intercambio, ocupando 87 % de las bases totales. A su vez todos los nutrientes presentaron coeficientes de variación entre 10 y 15 %, siendo el más variable el P disponible. Por su parte la CE medida en forma directa se incrementó con la profundidad. Las dos mediciones de CEa fueron las propiedades edáficas con menor coeficiente de variación.

La población de datos originales de CEa recabados con el sensor Veris 3100 presentó valores de media y mediana similares entre sí, con 59,6 y 59,7 mS m^{-1} , para CEa-s, y con 79,1 y 78,7, respectivamente para CEa-p. En tanto el sesgo fue de -0,33 y 0,52, para CEa-s y CEa-p respectivamente; y el coeficiente de kurtosis fue de 2,2 y 0,8, para CEa-s y CEa-p respectivamente. Dichas relaciones de parámetros se encuentran en lo aceptado para una distribución de tipo normal (Webster y Oliver, 2007). Por su parte el coeficiente de variación tomó valores de 9,1 y 5,7 % para CEa-s y CEa-p, respectivamente.

En las dos mediciones de CEa los modelos que mejor ajustaron para representar la variación espacial fueron de forma exponencial, al evaluarlos mediante el error de predicción en la validación cruzada. El error medio estandarizado y de la raíz cuadrada media estandarizada de los valores predichos, fueron 0,001 y 0,9592 para CEa-s y de 0,0004 y 0,9841 para CEa-p. Para CEa-s y CEa-p se calcularon las relaciones nugget / meseta de los modelos ajustados, cuyos resultados fueron 0,38 y 0,30, respectivamente. Las estructuras de correlación descritas por los semi-variogramas se utilizaron para realizar estimaciones de los valores de CEa para toda el área mediante el procedimiento de Kriging ordinario. Los mapas de valores estimados en ambas variables se presentan en la Figura 1.

En los Cuadros 2 y 3 se presentan coeficientes de correlación de Pearson vinculando CEa-s y CEa-p con atributos del terreno y propiedades físicas y químicas del suelo, únicamente para las relaciones que resultaron significativas ($P < 0,05$). De las propiedades químicas evaluadas solo para P Bray 1 no se encontraron correlaciones significativas con alguna de las mediciones de CEa, mientras que para los atributos topográficos calculados no se encontraron correlaciones significativas de CEa y aspecto, curvatura del perfil y del plano, área de cuenca, SPI ni TWI. Para las propiedades físicas medidas no hubo correlación entre CEa y porcentaje de arena, profundidad de horizonte A y resistencia a la penetración a las profundidades de 0 a 4, de 8 a 12, de 12 a 16, de 16 a 20 y de 24 a 28 cm. Entre las propiedades químicas, K y Ca presentaron las mayores correlaciones positivas con CEa-s, siendo variables que caracterizan la capa superficial del suelo. En cambio, K y

Cuadro 1. Estadística descriptiva de propiedades físicas, químicas y topográficas de 64 sitios de muestreo ubicados en un área de 4,2 ha de un campo agrícola en el litoral del Uruguay. MO: % de materia orgánica; CE 7 cm: conductividad eléctrica directa a 7 cm de profundidad; CE 40 cm: conductividad eléctrica directa a 40 cm de profundidad; CEa-s: conductividad eléctrica aparente en superficie; CEa-p: conductividad eléctrica aparente en profundidad; RP 4-8 kPa: resistencia a la penetración 4 a 8 cm; RP 24-28 kPa: resistencia a la penetración 24 a 28 cm; RP 28-32 kPa: resistencia a la penetración 28 a 32 cm; SPI: Índice de poder de escorrentía; TWI: Índice topográfico de humedad; LS: Índice de capacidad de transporte de sedimentos; DE: desvío estándar; CV: coeficiente de variación; P(15): percentil 15%; P(85): percentil 85 %.

Variable	Media	DE	CV	Rango	P(15)	P(85)
Arcilla (%)	30,09	2,93	9,73	15,4	27,42	32,52
Limo (%)	37,82	3,8	10,04	22,3	34,72	40,98
Arena (%)	32,08	2,43	7,57	8,7	29,19	34,95
K 0-15 cm (cmol kg ⁻¹)	0,45	0,05	11,36	0,22	0,41	0,51
Na 0-15 cm (cmol kg ⁻¹)	0,37	0,06	15,26	0,37	0,32	0,4
Ca 0-15 cm (cmol kg ⁻¹)	22,72	2,39	10,53	11,99	21,2	24,52
Mg 0-15 cm (cmol kg ⁻¹)	2,65	0,3	11,48	1,29	2,31	3
P Bray 1 0-15 cm (mg kg ⁻¹)	13,7	2,12	15,49	9,9	11,5	16,1
MO 0-15 cm (%)	3,94	0,29	7,41	2,01	3,75	4,15
CE 7 cm (mS cm ⁻¹)	629	69,4	11	368	582,5	696
CE 40 cm (mS cm ⁻¹)	1390,6	102,9	7,4	618,5	1303	1489
Profundidad Horizonte A (cm)	25,58	3,69	14,41	16	22	29
Profundidad Total (cm)	84,71	16,04	18,94	59	68	110
CEa-s (mS m ⁻¹)	59,71	2,92	4,89	16,31	57,31	62,23
CEa-p (mS m ⁻¹)	79,25	3,35	4,23	13,16	75,62	83,63
RP 4-8 cm (kPa)	996,7	171,4	17,2	709	809,9	1193
RP 20-24 cm (kPa)	1290,4	159,4	12,35	679,5	1116	1471,9
RP 28-32 cm (kPa)	1295,2	172,1	13,29	788,3	1107,2	1462,2
Elevación (m)	98,25	2,08	2,11	7,8	95,7	100,8
Pendiente (°)	2,4	0,85	35,27	3,64	1,3	3,2
Aspecto	257,9	37,7	14,5	160,4	219,3	299,3
Curvatura del perfil	0,03	0,12	377,29	0,61	-0,09	0,15
Curvatura del plano	-0,02	0,2	1186,7	1,01	-0,15	0,14
Área de cuenca (m ² m ⁻¹)	23,45	41,42	176,61	192,42	3,39	22,23
SPI	0,89	1,6	180,11	9,32	0,1	1,13
TWI	5,2	0,86	16,45	3,85	4,3	5,99
LS	0,26	0,21	78,43	1,12	0,07	0,44

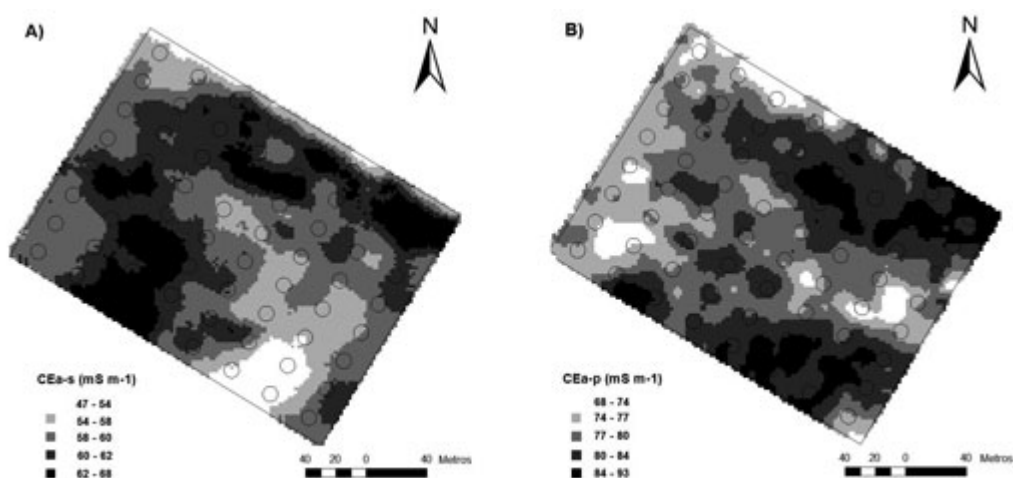


Figura 1. Mapas interpolados de conductividad eléctrica aparente en superficie (CEa-s) (A) y en profundidad (CEa-p) (B) en un sector de 4,2 ha dentro de una chacra en el litoral de Uruguay.

Ca se correlacionaron negativamente con CEa-p y con valores bajos. Materia orgánica y porcentaje de arcilla fueron otras de las variables que correlacionaron positivamente con CEa-s, pero con coeficientes bajos. En atributos del terreno, la pendiente se relacionó negativamente con CEa-s y CEa-p, en tanto elevación y CEa-p se correlacionaron positivamente. La CEa-s mostró relación positiva con conductividad eléctrica medida en forma directa a 7 cm de

profundidad, mientras que CEa-p se correlacionó positivamente con CE directa a 40 cm. La profundidad total del suelo se correlacionó negativamente con CEa-s, en tanto no se vinculó a CEa-p. La resistencia a la penetración mostró relaciones positivas con CEa-s en las profundidades 4-8 cm, 20-24 cm y 28-32 cm. Ninguna de las variables con correlaciones de Pearson no significativas presentaron relaciones cuadráticas significativas.

Cuadro 2. Coeficientes de correlación de Pearson ($P < 0,05$) de conductividad eléctrica aparente en superficie (CEa-s) y en profundidad (CEa-p) con propiedades químicas del suelo y atributos del terreno, para las relaciones significativas, medidos en 64 sitios de muestreo ubicados en un área de 4,2 ha en una chacra en el litoral del Uruguay. K: potasio 0-15 cm (cmol kg^{-1}); Na: sodio 0-15 cm (cmol kg^{-1}); Ca: calcio 0-15 cm (cmol kg^{-1}); Mg: magnesio 0-15 cm (cmol kg^{-1}); MO: porcentaje de materia orgánica; Elev: elevación (m); Pend: pendiente ($^{\circ}$); LS: Índice de capacidad de transporte de sedimentos; NS: no significativo.

	K	Na	Ca	Mg	MO	Elev.	Pend.	LS
CEa-s	0,52	-0,37	0,7	NS	0,35	NS	-0,26	-0,31
CEa-p	-0,29	0,39	-0,34	0,62	-0,31	0,42	-0,59	-0,41

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Pearson ($P < 0,05$) de conductividad eléctrica aparente en superficie (CEa-s) y en profundidad (CEa-p) con propiedades físicas del suelo, para las relaciones significativas, medidos en 64 sitios de muestreo ubicados en un área de 4,2 ha en una chacra en el litoral del Uruguay. CE 7 cm: conductividad eléctrica directa a 7 cm de profundidad; CE 40 cm: conductividad eléctrica directa a 40 cm de profundidad; Pr. Total: profundidad total de suelo (cm); RP 4-8: resistencia a la penetración 4 a 8 cm (kPa); RP 24-28: resistencia a la penetración 24 a 28 cm (kPa); RP 28-32: resistencia a la penetración 28 a 32 cm (kPa); NS: no significativo.

	CE 7 cm	CE 40 cm	Arcilla %	Limo %	Pr.Total	RP 4-8 cm	RP 20-24 cm	RP 28-32 cm
CEa-s	0,65	NS	0,36	-0,25	-0,66	0,25	0,27	0,31
CEa-p	NS	0,4	NS	NS	NS	-0,27	NS	-0,28

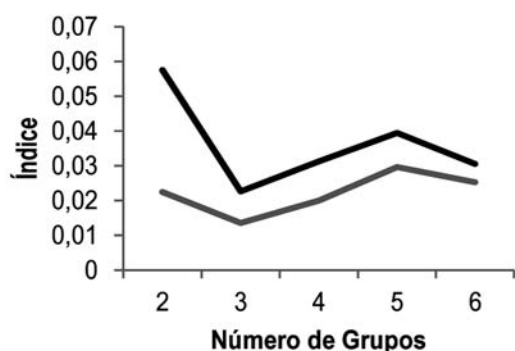


Figura 2. Índice de desempeño difuso (línea negra superior) e Índice de clasificación de entropía normalizada (línea gris inferior) según número de grupos formados mediante clasificación de medias-c difusas a partir de conductividad eléctrica aparente en superficie y en profundidad.

Buscando identificar zonas más homogéneas dentro del área de estudio se realizó un análisis de clusters en que se incorporaron como variables los registros de CEa interpo-

Cuadro 4. Análisis de varianza de propiedades químicas de suelo según grupos formados mediante clasificación de medias-c difusas a partir de conductividad eléctrica aparente en superficie y en profundidad. K: potasio 0-15 cm (cmol kg^{-1}); Na: sodio 0-15 cm (cmol kg^{-1}); Ca: calcio 0-15 cm (cmol kg^{-1}); Mg: magnesio 0-15 cm (cmol kg^{-1}); MO: porcentaje de materia orgánica 0-15 cm

Grupo	K	Na	Ca	Mg	MO
1	0,46 a	0,35 b	23,21 a	2,52 b	4,01 a
2	0,33 b	0,54 a	14,85 b	2,83 a	3,04 b
3	0,46 a	0,36 b	23,00 a	2,75 ab	3,97 a
p valor	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0046	<0,0001

Cuadro 5. Análisis de varianza de propiedades físicas del suelo según grupos formados mediante clasificación de medias-c difusas a partir de conductividad eléctrica aparente en superficie y en profundidad. Ac: porcentaje de arcilla; L: porcentaje de limo; CE 7 cm: conductividad eléctrica directa a 7 cm de profundidad (mS cm^{-1}); CE 40 cm: conductividad eléctrica directa a 40 cm de profundidad (mS cm^{-1}); Pr. total: profundidad total del suelo (cm); RP 4-8: resistencia a la penetración 4 a 8 cm (kPa); RP 24-28: resistencia a la penetración 24 a 28 cm (kPa); RP: resistencia a la penetración 28 a 32 cm (kPa).

Grupo	Ac	L	CE 7 cm	CE 40 cm	Pr. total	RP 4-8 cm	RP 24-28 cm	RP 28-32 cm
1	30,4 a	37,6	633,2 a	1366,5 b	86 b	1044 a	1326	1330 a
2	24,9 b	40,8	420,0 b	1498,1 a	115 a	854 b	1118	1041 b
3	30,1 a	37,9	639,7 a	1399,2 b	78 b	972 a	1288	1283 a
p valor	0,032	0,518	<0,0001	0,03	0,0048	0,0464	0,1664	0,016

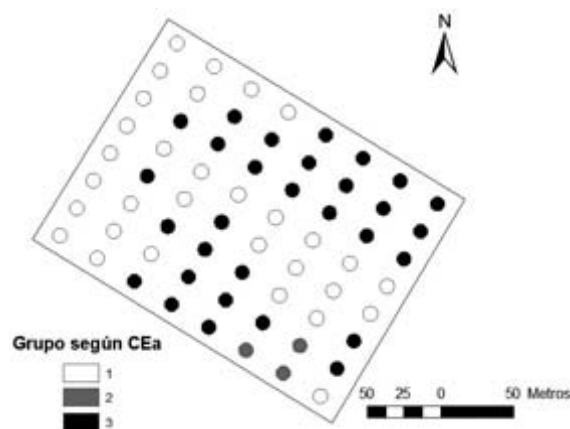


Figura 3. Mapa de zonas delimitadas a partir de clasificación con medias-c difusas usando conductividad eléctrica aparente (CEa) superficial y profunda en un sector de 4,2 ha dentro de una chacra en el litoral de Uruguay.

lados para ambas profundidades en los sitios de muestreo. Los índices FPI y NCE se calcularon para un rango de dos a seis grupos, resultando que ambos lograron los menores valores cuando se formaron tres grupos, por tanto se escogió esa cantidad para realizar la clasificación (Figura 2). Si bien el análisis de clusters no toma en cuenta la ubicación espacial de las observaciones, los grupos formados se dispusieron en el área de estudio agrupados geográficamente (Figura 3).

En los Cuadros 4, 5 y 6 se exponen los resultados de análisis de varianza y test Tukey de comparación de medias entre los grupos identificados, para las propiedades edáficas y topográficas que se correlacionaron con CEa. El Grupo 2 se destacó por presentar un menor contenido de K, Ca y materia orgánica respecto a los otros, y una mayor cantidad de Na intercambiable. Las bases totales promedio en el Grupo 2 fueron $18,6 \text{ cmol kg}^{-1}$, respecto a $26,5$ y $26,6$

Cuadro 6. Análisis de varianza de atributos del terreno según grupo formado mediante clasificación de medias-c difusas a partir de conductividad eléctrica aparente en superficie y en profundidad. LS: Índice de capacidad de transporte de sedimentos.

Grupo	Pendiente (°)	LS	Elevación (m)
1	2,84 a	0,34 ab	97,51 ab
2	2,71 a	0,36 a	97,06 b
3	1,92 b	0,18 b	99,13 a
p valor	<0,0001	0,0064	0,0045

cmol kg⁻¹ en los Grupos 1 y 3 respectivamente. El Grupo 2 fue el de menor contenido de arcilla en superficie, lo que determinó a su vez que presentara menor resistencia a la penetración en las profundidades 4-8 cm y 28-32 cm, por las correlaciones entre ellos ($r=0,35$ entre porcentaje arcilla y resistencia a penetración 4-8 cm y $r=0,29$ entre arcilla y resistencia a penetración 28-32 cm). En cuanto a la profundidad total de suelo los mayores valores estuvieron en el Grupo 2. En atributos del terreno el Grupo 3 presentó la menor pendiente, mayor elevación y menor riesgo de erosión medido a través del factor LS.

Discusión

Gran parte de las investigaciones en las que se ha evaluado la utilidad de CEa en definir zonas de manejo y/o se ha estudiado su asociación con variables edáficas han sido realizadas en sitios donde la variación en propiedades del suelo fue superior a la registrada en el presente estudio. Los coeficientes de variación calculados para los nutrientes en el área relevada, inferiores a 15 %, son sensiblemente menores a los niveles expuestos por Mulla y McBratney (2002) como característicos de suelos agrícolas, situados entre 39 y 157 %. Lo mismo sucede con la materia orgánica, donde los valores indicados varían entre 21 y 41 %. Los valores de coeficiente de variación reportados para CEa en general superan al 25% (Kitchen *et al.*, 2005; Sudduth *et al.*, 2005; Moral *et al.*, 2010; Simón *et al.*, 2013). Por otra parte, los rangos de variación encontrados para CEa y otras variables de suelo como textura, materia orgánica y bases comúnmente superan a los registrados por nosotros (Corwin *et al.*, 2003; Carroll y Oliver, 2005; Moral *et al.*, 2010; Dang *et al.*, 2011; Terrón *et al.*, 2011; Diacono *et al.*, 2013). Terra *et al.* (2010), trabajando en chacras de la misma zona de este estudio y con suelos similares, midieron coeficientes

de variación para CEa-s de 29,7 % en una situación y de 26,0 % en otra, valores superiores a los registrados en nuestro trabajo.

Tanto CEa-s como CEa-p presentaron grados de dependencia espacial moderada, al evaluarla mediante la relación nugget / meseta. Según Cambardella *et al.* (1994) valores de dicha relación menores a 0,25 indicarían una fuerte relación espacial, entre 0,25 y 0,75 indicarían dependencia espacial moderada y mayor a 0,75 indicarían débil dependencia espacial. Esto permite tener una mayor confianza en los mapas obtenidos a partir de los muestreos semi discretos de CEa.

En nuestro estudio se identificaron grupos de sitios con diferencias en características edáficas y topográficas a partir de la CEa medida a dos profundidades. Además, la cantidad de grupos óptima según los índices propuestos por Fridgen *et al.* (2004) y su distribución espacial fue tal que sería posible separarlas para asignar manejos diferentes, en contraposición a una mayor cantidad de zonas y localización en parches. Las diferencias encontradas en propiedades químicas podrían ameritar el manejo específico de la nutrición de cultivos según la zona. En especial para K esto sería posible porque los valores encontrados en el Grupo 2 están próximos al nivel crítico tentativo de 0,34 cmol kg⁻¹ propuesto para ese nutriente (Barbazán *et al.*, 2011), en tanto los Grupos 1 y 3 presentaron valores situados en zonas consideradas de no respuesta a la aplicación de K. También, los valores de materia orgánica 25 % inferiores en el Grupo 2 respecto a los otros, permiten esperar un comportamiento diferente en la dinámica del nitrógeno por su dependencia de compuestos orgánicos (Tisdale *et al.*, 1993). El menor contenido de bases totales del Grupo 2 posiblemente sea consecuencia de los niveles más bajos de arcilla y materia orgánica, ya que estos son los que aportan las posiciones de intercambio a las que se unen los cationes (Tisdale *et al.*, 1993).

El menor riesgo de erosión existente en el Grupo 3, cuantificado a través del factor LS, se debería a que los sitios correspondientes al mismo recibieron una menor cantidad de agua desde otras ubicaciones y con menos energía, por estar en lugares más altos y con menor pendiente. Esas variaciones se podrían considerar para definir rotaciones de cultivos con diferencias en las pérdidas de suelo ocasionadas por el manejo.

La existencia de correlaciones entre variables edáficas y topográficas con CEa fue lo que permitió identificar los grupos de sitios con características diferentes. Los cationes Ca y K, materia orgánica y porcentaje de arcilla se

correlacionaron positivamente con CEa-s, siendo conocido que estas dos últimas características se asocian a posiciones de intercambio catiónico que sirven de vías al movimiento de las cargas eléctricas (Corwin y Lesch, 2005; Friedman, 2005). Las correlaciones positivas entre CEa-s y el contenido de arcilla se han encontrado en forma más frecuente en situaciones donde el rango de variación en el porcentaje de arcilla fue de dos a tres veces superior al de este trabajo (Carroll y Oliver, 2005; Morari *et al.*, 2009; Moral *et al.*, 2010). La correlación negativa de K y Ca con CEa-p es considerada un efecto indirecto consecuencia de relaciones más fuertes con otras variables no identificadas, pues solo un 15 % de la respuesta de la lectura profunda del Veris corresponde a los primeros 15 cm del perfil (Sudduth *et al.*, 2005). Una situación similar a la anterior se supone que sucedió con la relación entre CEa-s y Na.

Aunque no fue significativa la relación entre CEa-p y profundidad del suelo, otros estudios han encontrado este tipo de correlaciones en situaciones donde un contacto lítico determina la profundidad del suelo (Serrano *et al.*, 2013), y no una capa de material generador degradado y de consistencia friable como en nuestro caso.

Las correlaciones de CEa con atributos del terreno permitirían interpretar que los sitios ubicados en posiciones de mayor altitud y con menor pendiente fue donde se registraron los mayores valores de CEa del suelo. En tanto la correlación positiva entre los datos de CEa y conductividad eléctrica directa permitiría confirmar que si bien son formas diferentes de tomar las mediciones los registros varían de manera similar, y que los datos de CEa obtenidos por el sensor de contacto empleado representan a distintas capas del suelo. A su vez el incremento de la conductividad eléctrica en profundidad, medido tanto en forma directa como para el perfil, se interpreta que está asociado al incremento en el contenido de arcilla característico de esos suelos, indicado en la Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano *et al.*, 1976).

La asociación entre la resistencia a la penetración del suelo y CEa-s es consecuencia de que dicha propiedad edáfica, cuantificada a través del Índice de Cono, guarda una estrecha relación con la densidad aparente del mismo (Hernanz *et al.*, 2000), la cual es otra de las variables que influyen la CEa (Friedman, 2005).

Conclusiones

La CEa se relacionó con diversas propiedades físicas y químicas del suelo al relevarlas en forma intensa y a una escala pequeña aún en un sitio con reducida variabilidad en

esas características edáficas. La delimitación de zonas dentro del área estudiada a partir de CEa permitió separar sitios con diferentes características edáficas y que podrían recibir manejos diferenciales en esquemas de agricultura de precisión.

Agradecimientos

Los autores agradecen al International Plant Nutrition Institute y Canpotex por haber financiado parcialmente la actividad a través del proyecto «Fertilización K y P: estudios de largo plazo»; a Miguel Carballal y Martín Luzardo por aportar el sitio experimental y colaborar en las tareas logísticas; a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por haber apoyado el proyecto mediante una beca de maestría (POS_2011_1_3545); a ISUSA por aportar los fertilizantes y a la Asociación Uruguaya de Siembra Directa por el apoyo institucional.

Bibliografía

- Altamirano A, Da Silva H, Durán A, Echeverría A, Panario D, Puentes R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Tomo I: Clasificación de suelos. Montevideo: MAP.
- Barbazán MM, Bautés C, Beux L, Bordoli JM, Cano JD, Ernst O, García A, García F, Quincke A. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia Uruguay*, 15(2): 93 - 99.
- Bray RH, Kurtz LT. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science*, 59: 39 - 45.
- Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 1501 - 1511.
- Carroll ZL, Oliver MA. 2005. Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity. *Geoderma*, 128(3-4): 354 - 374.
- Cook PG, Walker GR. 1992. Depth profiles of electrical conductivity from linear combinations of electromagnetic induction measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 1015 - 1022.
- Corwin DL, Lesch SM. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1-3): 11 - 43.
- Corwin DL, Lesch SM. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles and guidelines. *Agronomy Journal*, 95(3): 455 - 471.
- Corwin DL, Lesch SM, Shouse PJ, Soppé R, Ayars JE. 2003. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. *Agronomy Journal*, 95(2): 352 - 364.
- Cox MS, Gerard P, Wardlaw M, Abshire M. 2003. Variability of selected soil properties and their relationships with soybean yield. *Soil Science Society of America Journal*, 67(4): 1296 - 1302.
- Dang YP, Dalal RC, Pringle MJ, Biggs AJ, Darr S, Sauer B, Moss J, Payne J, Orange D. 2011. Electromagnetic induction sensing of soil identifies constraints to the crop yields of north-eastern Australia. *Soil Research*, 49(7): 559 - 571.

- Diacono M, De Benedetto D, Castrignano A, Rubino P, Vittì C, Abdelrahman HM, Sollitto D, Coccoza C, Ventrella D.** 2013. A combined approach of geostatistics and geographical clustering for delineating homogeneous zones in a durum wheat field in organic farming. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 64-65(September): 47 - 57.
- Fraisse CW, Sudduth K, Kitchen N.** 2001. Delineation of site specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Transactions of the ASAE*, 44(1): 155 - 166.
- Fridgen JJ, Kitchen NR, Sudduth KA, Drummond ST, Wiebold WJ, Fraisse CW.** 2004. Management Zone Analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal*, 96: 100-108.
- Friedman SP.** 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1-3), 45-70.
- Gee G, Or D.** 2002. Particle-Size Analysis. En: Dane JH, Topp GC. [Eds.]. *Methods of soil analysis: Part 4: Physical methods*. Madison: Soil Science Society of America. pp. 812 - 815.
- Green TR, Salas JD, Martínez A, Erskine R.** 2007. Relating crop yield to topographic attributes using Spatial Analysis Neural Networks and regression. *Geoderma*, 139(1-2): 23 - 37.
- Hernanz JL, Peixoto H, Cerisola G, Sánchez-Giron V.** 2000. An empirical model to predict soil bulk density profiles in field conditions using penetration resistance, moisture content and soil depth. *Journal of Terramechanics*, 37(4): 167 - 184.
- Kaspar T, Pulido D, Fenton T, Colvin T, Karlen D, Jaynes D, Meek D.** 2004. Relationship of corn and soybean yield to soil and terrain properties. *Agronomy Journal*, 96(3): 700 - 709.
- Khattree R, Naik DN.** 2000. *Multivariate data reduction and discrimination with SAS® software*. 1 ed. Cary: SAS Inst. 558p.
- Kitchen N, Sudduth K, Myers ST, Drummond ST, Hong SY.** 2005. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96: 285 - 308.
- Kravchenko AN, Bullock D.G.** 2000. Spatial variability; correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*, 92(1): 75 - 83.
- Kravchenko AN, Thelen KD, Bullock DG, Miller NR.** 2003. Relationship among crop grain yield, topography, and soil electrical conductivity studied with cross-correlograms. *Agronomy Journal*, 95(5): 1132 - 1139.
- Lark R, Wheeler H.** 2003. A method to investigate within-field variation of the response of combinable crops to an input. *Agronomy Journal*, 95: 1093 - 1104.
- McNeill JD.** 1992. Rapid, accurate mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters. En: Topp GC, Reynolds WD, Green RE. [Eds.]. *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*. Madison: Soil Science Society of America. pp. 209 - 229.
- Moore ID, Gessler PE, Nielsen GA, Peterson GA.** 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science*, 57: 443 - 452.
- Moral FJ, Terrón JM, Marques da Silva JR.** 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research*, 106(2): 335 - 343.
- Morari F, Castrignano A, Pagliarin C.** 2009. Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors. *Computers and Electronics in Agriculture*, 68(1): 97 - 107.
- Mulla DJ, McBratney AB.** 2002. Soil Spatial Variability. En: Warrick AW. [Ed.]. *Soil physics companion*. Boca Raton: CRS Press. pp. 343 - 373.
- Parent AC, Bélanger MC, Parent LE, Santerre R, Viau AA, Antil F, Bolinder MA, Tremblay C.** 2008. Soil properties and landscape factors affecting maize yield under wet spring conditions in eastern Canada. *Biosystems Engineering*, 99(1): 134 - 144.
- Plant RE.** 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30: 9 - 29.
- Serrano J, Shahidian S, Marques da Silva JR.** 2013. Apparent electrical conductivity in dry versus wet soil conditions in a shallow soil. *Precision Agriculture*, 14(1): 99 - 114.
- Simón M, Peralta N, Costa JL.** 2013. Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes. *Ciencia del suelo*, 31: 45 - 55.
- Sudduth KA, Kitchen NR, Wiebold WJ, Batchelor WD, Bollero GA, Bullock DG, Clay DE, Palm HL, Pierce FJ, Schuler RT, Thelen KD.** 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1-3): 263 - 283.
- Terra J, Melo D, Sawchik J.** 2010. Atributos edáficos y topográficos relacionados a los patrones de variación de rendimiento de cultivos agrícolas en Uruguay [Cd-Rom]. En: 1a Reunión Técnica Sociedad Uruguaya de las Ciencias del Suelo: Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos, Montevideo.
- Terra J, Shaw J, Reeves D, Raper R, van Saten E, Schwab E, Mask P.** 2006. Soil management and landscape variability affects field-scale cotton productivity. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 98 - 107.
- Terrón JM, Marques da Silva JR, Moral FJ, García-Ferrer A.** 2011. Soil apparent electrical conductivity and geographically weighted regression for mapping soil. *Precision Agriculture*, 12(5): 750 - 761.
- Tisdale SL, Nelson WL, Beaton JD, Havlin JL.** 1993. *Soil fertility and fertilizers*. 5th ed. Nueva York: Macmillan Publishing Co. 634p.
- Walkley A, Black IA.** 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29 - 38.
- Webster R, Oliver MA.** 2007. *Geostatistics for Environmental Scientists*, 2a ed. Chichester: Wiley. 332p.
- Wilson, J.P., Gallant, J.C.,** 2000. Digital Terrain Analysis. En: Wilson JP, Gallant JC. [Eds.]. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Chichester: Wiley pp. 1 - 27.
- Woolenhaupt NC, Mulla DJ, Gotway Crawford CA.** 1997. Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties. En: Pierce FJ, Sadler EJ. [Ed.]. *The state of site-specific management for agriculture*. Madison: ASA, CSSA, SSSA. pp. 19 - 53.