

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

**CARRERA DE MAGISTER SCIENTIAE EN MECANIZACION
AGRARIA**



**Conductividad Eléctrica aparente como herramienta
para delimitar Zonas de Manejo Sitio Especifico en Maíz
(*Zea mays*) en la Provincia de Corrientes**

Tesis para acceder al grado de Magíster Scientiae en Mecanización Agraria

Presentada por: Ing. Agr. Esp. Luciana G. Herber

16 de Diciembre de 2011

INDICE

| | |
|--|------|
| INDICE DE TABLAS..... | IV |
| INDICE DE FIGURAS..... | VI |
| INDICE DE FOTOS..... | VIII |
| ABREVIATURAS..... | IX |
| RESUMEN..... | X |
| ABSTRACT..... | XI |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Planteo del Problema..... | 1 |
| 1.2. Antecedentes Específicos..... | 5 |
| 1.3. Justificación del Trabajo..... | 7 |
| 2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DEL TRABAJO..... | 8 |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 10 |
| 3.1. Sitios Experimentales..... | 10 |
| 3.2. Sensor Veris 3100 y Medición de CEa..... | 12 |
| 3.3. Mapas de CEa..... | 13 |
| 3.4. Determinación de Puntos de Muestreo de Suelo..... | 16 |
| 3.5. Muestreo de Suelo..... | 16 |
| 3.6. Análisis de Laboratorio..... | 16 |
| 3.7. Medición de Altimetría..... | 17 |
| 3.8. Correlación entre Mapas de CEa y Mapas de Altimetría..... | 18 |
| 3.9. Correlación entre Mapas de CEa y Rendimiento del cultivo de maíz..... | 18 |
| 3.10. Análisis de la información..... | 19 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 20 |
| 4.1. Variabilidad de la CEa en el Suelo..... | 20 |
| 4.1.1. Mercedes..... | 22 |
| 4.1.2. Perugorría..... | 25 |
| 4.1.3. El Sombrero..... | 26 |
| 4.2. Variabilidad espacial de las Propiedades de Suelo medidas..... | 29 |
| 4.2.1. Mercedes..... | 29 |
| 4.2.2. Perugorría..... | 32 |
| 4.2.3. El Sombrero..... | 34 |
| 4.3. Correlaciones entre Parámetros de suelo medidos y CEa para las tres | |

| | |
|--|----|
| localidades de Trabajo..... | 36 |
| 4.3.1. Relación entre CEa y Textura..... | 36 |
| 4.3.2. Relación entre CEa y Humedad del Suelo..... | 40 |
| 4.3.3. Relación entre CEa y CEe..... | 43 |
| 4.3.4. Relación entre CEa y MO..... | 45 |
| 4.3.5. Relación entre CEa y P extractable..... | 48 |
| 4.3.6. Relación entre CEa-Cationes y CEa-Suma de Bases..... | 49 |
| 4.3.7. Relación entre CEa y pH..... | 53 |
| 4.4. Relación entre CEa y Altimetría..... | 56 |
| 4.4.1. Mercedes..... | 56 |
| 4.4.2. Perugorría..... | 63 |
| 4.5. Relación entre CEa y Rendimiento del Cultivo de Maíz..... | 70 |
| 4.6. Delineamiento de Zonas de MSE a partir de Rangos de CEa. Aval de los parámetros medidos..... | 73 |
| 4.6.1. Mercedes..... | 73 |
| 4.6.2. Perugorría..... | 76 |
| 4.6.3. El Sombrero..... | 79 |
| 5. CONSIDERACIONES FINALES..... | 81 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 83 |
| 7. PERSPECTIVAS FUTURAS..... | 83 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA..... | 84 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Estadística descriptiva de la medición de la Conductividad Eléctrica aparente..... | 20 |
| Tabla 2. Parámetros de ajuste del Semivariograma para la Conductividad Eléctrica aparente del suelo – Mercedes..... | 23 |
| Tabla 3. Conductividad Eléctrica aparente en Mercedes 0-90 cm..... | 24 |
| Tabla 4. Parámetros de ajuste del Semivariograma para la Conductividad Eléctrica aparente del suelo – Perugorría..... | 25 |
| Tabla 5. Rangos de Conductividad Eléctrica aparente en Perugorría 0-90 cm..... | 26 |
| Tabla 6. Parámetros de ajuste del Semivariograma para la Conductividad eléctrica aparente del suelo – El Sombrero..... | 27 |
| Tabla 7. Rangos de Conductividad Eléctrica aparente en El sombrero 0-90 cm... | 28 |
| Tabla 8. Parámetros estadísticos para las variables físico-químicas de suelo medidas – Mercedes..... | 31 |
| Tabla 9. Parámetros estadísticos para las variables físico-químicas de suelo medidas – Perugorría..... | 33 |
| Tabla 10. Parámetros estadísticos para las variables físico-químicas de suelo medidas – El Sombrero..... | 35 |
| Tabla 11. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Textura del suelo..... | 37 |
| Tabla 12. Contenido de Arena, Arcilla+Limo para los tres rangos de Conductividad Eléctrica aparente y las tres Localidades de trabajo..... | 40 |
| Tabla 13. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Humedad..... | 41 |
| Tabla 14. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Conductividad Eléctrica del extracto de saturación. | 44 |
| Tabla 15. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Materia Orgánica..... | 46 |
| Tabla 16. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Fósforo extractable..... | 48 |
| Tabla 17. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Cationes..... | 50 |

| | |
|---|----|
| Tabla 18. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Suma de Bases..... | 51 |
| Tabla 19. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y pH..... | 54 |
| Tabla 20. Parámetros de ajuste del Semivariograma para la variable Altimetría Mercedes..... | 57 |
| Tabla 21. Parámetros de ajuste del Semivariograma para la variable Altimetría Perugorría..... | 63 |
| Tabla 22. Valores de parámetros de suelo obtenidos para la localidad de Mercedes en función de su posición del terreno y rango de Conductividad Eléctrica aparente..... | 68 |
| Tabla 23. Valores de parámetros de suelo obtenidos para la localidad de Perugorría en función de su posición del terreno y rango de Conductividad Eléctrica aparente..... | 69 |
| Tabla 24. Correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Rendimiento..... | 70 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Sendas de conductancia eléctrica que contribuyen a la medición de Conductividad Eléctrica aparente..... | 3 |
| Figura 2. Intensidad de conductancia (mS metro^{-1}) de arena, limo, arcilla y condiciones de salinidad del suelo..... | 4 |
| Figura 3. Localidades sobre las que se realizó el trabajo en la Provincia de Corrientes..... | 10 |
| Figura 4. Esquema del Veris 3100 empleado para las determinaciones de Conductividad Eléctrica aparente..... | 12 |
| Figura 5. Representación gráfica de un semivariograma teórico y sus partes constituyentes..... | 15 |
| Figura 6. Distribución de Frecuencias de Conductividad Eléctrica aparente – Mercedes..... | 21 |
| Figura 7. Distribución de Frecuencias de Conductividad Eléctrica aparente – Perugorría..... | 21 |
| Figura 8. Distribución de Frecuencias de Conductividad Eléctrica aparente – El Sombrero..... | 22 |
| Figura 9. Semivariograma experimental y ajuste de modelo esférico para la variable Conductividad Eléctrica aparente – Mercedes (0-90 cm)..... | 23 |
| Figura 10. Mapa de distribución espacial de la Conductividad Eléctrica aparente (dS m^{-1}) – Mercedes (0-90 cm)..... | 24 |
| Figura 11. Semivariograma experimental y ajuste de modelo teórico esférico para la variable Conductividad Eléctrica aparente - Perugorría (0-90 cm)..... | 25 |
| Figura 12. Mapa de distribución espacial de la Conductividad Eléctrica aparente (dS m^{-1}) - Perugorría (0-90 cm)..... | 26 |
| Figura 13. Semivariograma experimental y ajuste de modelo teórico gaussiano para la variable Conductividad Eléctrica aparente - El Sombrero (0-90 cm)..... | 27 |
| Figura 14. Mapa de distribución espacial de la Conductividad Eléctrica aparente (dS m^{-1}) – El Sombrero (0-90 cm)..... | 28 |
| Figura 15. Puntos de muestreo de suelo – Mercedes..... | 29 |
| Figura 16. Puntos de muestreo de suelo – Perugorría..... | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura 17. Puntos de muestreo de suelo - El Sombrero..... | 34 |
| Figura 18. Disponibilidad de nutrientes en función del pH del suelo..... | 55 |
| Figura 19. Semivariograma experimental y ajuste de modelo esférico para la variable Altimetría – Mercedes..... | 56 |
| Figura 20. Mapa de altimetría – Mercedes..... | 58 |
| Figura 21. Mapa de contorno en grilla 10x10 metros de Altimetría – Mercedes..... | 59 |
| Figura 22. Mapa de contorno en grilla 10x10 metros de Conductividad Eléctrica aparente – Mercedes..... | 60 |
| Figura 23. Correlación entre Conductividad Eléctrica aparente y Altimetría – Mercedes..... | 61 |
| Figura 24. Mapas con Transectas de Altimetría y Conductividad Eléctrica aparente – Mercedes..... | 62 |
| Figura 25. Análisis de Transectas: Perfil de Altimetría (arriba) y Conductividad Eléctrica aparente (abajo) – Mercedes..... | 62 |
| Figura 26. Semivariograma experimental y ajuste de modelo gaussiano para la variable Altimetría – Perugorría..... | 63 |
| Figura 27. Mapa de Altimetría – Perugorría..... | 64 |
| Figura 28. Mapa de contorno en grilla 10x10 metros de Altimetría – Perugorría..... | 65 |
| Figura 29. Mapa de contorno en grilla 10x10 metros de Conductividad Eléctrica aparente – Perugorría..... | 66 |
| Figura 30. Correlación entre Conductividad Eléctrica aparente y Altimetría – Perugorría..... | 66 |
| Figura 31. Mapas con Transectas de Altimetría y Conductividad Eléctrica aparente – Perugorría..... | 67 |
| Figura 32. Análisis de Transectas: Perfil de Altimetría (arriba) y Conductividad Eléctrica aparente (abajo) – Perugorría..... | 67 |
| Figura 33. Porcentaje de Arcilla+Limo para cada rango de Conductividad Eléctrica aparente – Mercedes..... | 74 |
| Figura 34. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Materia Orgánica (%) a 0-90 cm – Mercedes..... | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 35. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Suma de Bases (meq 100 gr suelo ⁻¹) a 0-90 cm – Mercedes..... | 75 |
| Figura 36. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Potasio (meq 100 gr suelo ⁻¹) a 0-90 cm – Mercedes..... | 75 |
| Figura 37. Porcentaje de Arcilla+Limo para cada rango de Conductividad Eléctrica aparente – Perugorría..... | 76 |
| Figura 38. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Suma de Bases (meq 100 gr suelo ⁻¹) a 0-90 cm – Perugorría..... | 77 |
| Figura 39. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Conductividad Eléctrica del extracto de Saturación (mmho cm ⁻¹) a 0-90 cm – Perugorría..... | 77 |
| Figura 40. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Potasio (meq 100 gr suelo ⁻¹) a 0-90 cm – Perugorría..... | 78 |
| Figura 41. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Rendimiento (kg ha ⁻¹) – Perugorría..... | 78 |
| Figura 42. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Fósforo (ppm) a 0- 0-90 cm – El Sombrero..... | 79 |
| Figura 43. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y pH a 0-90 cm – El Sombrero..... | 80 |

ÍNDICE DE FOTOS

| | |
|---|----|
| FOTO 1. Veris 3100 en posición de trabajo..... | 13 |
| FOTOS 2 y 3. GPS para medición de Altimetría: Módulo estacionario (izquierda), instalación del módulo móvil sobre el techo de la camioneta (derecha)..... | 17 |

ABREVIATURAS

Ca – Calcio

CEa - Conductividad Eléctrica aparente

CEe - Conductividad eléctrica extracto de saturación

K- Potasio

LC – Labranza convencional

Mg – Magnesio

MO - Materia Orgánica

Na – Sodio

P – Fósforo

SB - Suma de Bases.

SD – Siembra directa

RESUMEN

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE COMO HERRAMIENTA PARA DELIMITAR ZONAS DE MANEJO SITIO ESPECIFICO EN MAÍZ (*Zea mays*) EN LA PROVINCIA DE CORRIENTES

La productividad de los suelos está determinada por factores naturales y por la acción antrópica. Esta última puede aumentar significativamente el rango de variación y la heterogeneidad espacial de las propiedades del suelo, incluso dentro de un mismo lote. La creciente adopción de la Agricultura de Precisión ofrece diferentes métodos para detectar y mapear los patrones de la condición de suelo relacionada a la variación espacial, donde una técnica en incremento es la medición de la CEa con el Sensor Veris 3100. El objetivo de este trabajo fue Identificar áreas con características de suelo similares en un mismo lote por medio del uso del Veris 3100 para ser utilizadas en un programa de agricultura de precisión. El estudio se realizó en tres localidades de la Provincia de Corrientes: Mercedes, Peruggorría y El Sombrero. Se midió la CEa por medio del sensor Veris 3100 a una profundidad de 0-90 cm y en una serie de transectas separadas de 5 a 15 metros. Posteriormente se realizó la confección los semivariogramas experimentales a los cuales se les ajustó un modelo matemático buscando obtener el menor Cuadrado Medio del Error. Finalmente por interpolación se confeccionaron los mapas de CEa. A los mismos se los dividió en tres rangos de CEa donde posteriormente se tomaron las muestras de suelo, a partir de un Muestreo al Azar Estratificado a 0-30, 30-60 y 60-90 cm. Se hicieron determinaciones de Textura, contenido hídrico del suelo, MO, pH, CEe, P extractable, Ca, Mg, Na, K, y SB. También se hicieron mediciones de Altimetría y se midió rendimiento del cultivo de maíz. La correlación entre la CEa y las propiedades de suelo y planta estudiadas, fueron analizadas con el procedimiento PROC CORR de SAS y el ANOVA de los datos obtenidos utilizando el procedimiento PROC MIXED de SAS. La CEa correlacionó con Textura de suelo, MO, SB, cationes, Rendimiento del cultivo pH y CEe, P extractable y Altimetría del terreno dependiendo de la localidad bajo estudio. La humedad del suelo no correlacionó con la CEa en ninguna de las tres localidades. Este estudio avala la división y clasificación provista por el Veris 3100 en tres zonas de manejo sitio específico (Alta – Media – Baja) para cada una de las tres localidades estudiadas.

Palabras claves: Agricultura de Precisión, Conductividad eléctrica aparente, maíz, Veris 3100.

ABSTRACT

APPARENT ELECTRICAL CONDUCTIVITY AS A TOOL FOR DETERMINING SITE SPECIFIC MANAGEMENT ZONES IN CORN (*Zea mays*) IN CORRIENTES

Soil productivity is determined by natural factors and mainly by human action. The latter can significantly increase the range of variation and spatial heterogeneity of soil properties, even within the same field. The increasing adoption of Precision Agriculture offers different methods to detect and map the patterns of soil condition related to the spatial variation, where a technique in increase is the measurement of ECa with the Veris 3100 sensor. The aim of this study was to identify areas with similar soil characteristics in the same lot by using the Veris 3100 to be used in a precision agriculture program. The study was conducted in three locations in Corrientes province: Mercedes, Peruggorría and El Sombrero. ECa was measured by Veris 3100 sensor at a depth of 0-90 cm and at separate series of transects from 5 to 15 meters. The experimental semivariograms were fitted with a mathematical model looking for the lowest Mean Square Error. Finally, interpolation maps of ECa were produced. They were divided into three ranges of ECa where soil sampling was conducted by a stratified random sampling at 0-30, 30-60 and 60-90 cm. Physical measurements included soil texture and water content. Chemical measurements consisted of soil OM, pH, ECe, exchangeable P, Ca, Mg, Na, K, and SB. Also evaluated elevation and corn yield. Correlations between the ECa, soil and plant properties were analyzed with the PROC CORR procedure of SAS and the ANOVA was done using the PROC MIXED procedure of SAS. ECa correlated with soil texture, OM, sum of bases, cations, pH, crop yield ECe, extractable P and elevation depending on the location under study. Soil moisture did not correlate with ECa in any of the three locations. This study supports the division and classification provided by the Veris 3100 in three site-specific management zones (High - Medium - Low) for each of the three localities.

Key words: Precision agriculture, apparent electrical conductivity, corn, Veris 3100.

1.- INTRODUCCION

1.1.- Planteo del problema

La productividad de los suelos está determinada por factores naturales como clima, topografía, material parental, actividad biológica y, la acción antrópica a través de la historia de uso del lote y el manejo del mismo. El hombre, a través de las prácticas de manejo, puede aumentar significativamente el rango de variación y la heterogeneidad espacial de las propiedades del suelo, incluso dentro de un mismo lote (Bouma and Finke, 1993; Cambardella *et al.*, 1994; Cambardella and Karlen, 1999; Mallarino *et al.*, 1999; Mallarino and Wittry, 2004). Esta variabilidad no es aleatoria y afecta la distribución de frecuencia de las variables físicas y/o químicas, impidiendo el uso de técnicas estadísticas que no sean sensibles al supuesto de independencia de las observaciones y normalidad (Giménez, 2009). Para corregir esta eventualidad debe recurrirse a la teoría de las “Variables Regionalizadas”, la cual establece que los valores de la mayoría de las propiedades del suelo no poseen un patrón aleatorio de distribución en el espacio, sino que están espacialmente correlacionadas, es decir, poseen dependencia espacial (Matheron, 1971; Timlin *et al.*, 1998; Kravchenko and Bullock, 2000; Zhang *et al.*, 2002; Kaspar *et al.*, 2003; 2004).

Existen diferentes métodos para detectar y mapear los patrones de la condición de suelo relacionada a la variación espacial, por ejemplo Lark *et al.* (1999) uso un muestreo en grilla intensivo (a intervalos de 20 m) basada en textura de suelo y profundidad; Francis and Schepers (1997) y Fraisse *et al.* (2001) trabajaron con propiedades relacionadas con atributos de suelo y paisaje; MacMillan *et al.* (1998), Van Alpen and Stoorvogel (1998) y Franzen *et al.* (2000) realizaron clasificación de suelos a partir de Mapas de Elevación Digital (DEM); y Ahn *et al.* (1999) a través del uso de imágenes de sensores remotos.

Hoy en día, la creciente adopción de la Agricultura de Precisión, los avances tecnológicos en software, sistemas de posicionamiento global y sensores para medición a escala de campo, brindan nuevas oportunidades para el mapeo de las variaciones del suelo que subrayan y definen el rendimiento del cultivo. Una de estas herramientas son los mapas de rendimiento. Estos mapas proporcionan información sobre la variabilidad de la productividad de un cultivo proveyendo las bases para implementar un manejo sitio-específico del mismo. Esto permite localizar cuáles son los lugares del lote en los que es necesario variar los aportes de nutrientes en función

de la productividad obtenida en años anteriores (Long, 1998). Sin embargo, los mapas de rendimiento por si solos no pueden generar información sobre las fuentes de variación y por lo tanto proveer lineamientos confiables. Se hace necesario entonces contar con información relacionada a la variabilidad climática, de plagas, enfermedades (Van Uffelen *et al.*, 1997) y estudiar el suelo desde el punto de vista de la variabilidad espacial y temporal de sus propiedades físicas y químicas así como otras características del terreno (Ruffo *et al.*, 2006).

Conocida la variabilidad de las propiedades del suelo, se lo podría manejar en forma de sitio específico subdividiendo los lotes en áreas homogéneas. Con esto se lograría aumentar la eficiencia en el uso de insumos, mejorar la sustentabilidad de la empresa, la protección del medio ambiente y el beneficio económico al productor (Dinnes *et al.*, 2002).

Una técnica que viene incrementando su popularidad debido a su practicidad y confiabilidad, es la medición de la **conductividad eléctrica aparente** (CEa), usada como estimador indirecto de la variabilidad sitio-específica; dando información de base para la agricultura de precisión (Rhoades *et al.*, 1999; Corwin and Lesch 2003). El principio físico de las mediciones de CEa, se basan en las diferencias en el potencial eléctrico basado en tres sendas que actúan en paralelo (Rhoades *et al.*, 1999; Corwin and Lesch, 2005):

- a) Senda 1 o Fase Sólido/Líquida: Cationes intercambiables asociados a los minerales de arcilla o Materia Orgánica (Fig. 1)
- b) Senda 2 o Fase Líquida: Sólidos disueltos contenidos en el agua que esta retenida en los poros grandes del suelo (Fig. 1)
- c) Senda 3 o Fase Sólida: Partículas de suelo que están en contacto directo y continuo con otras partículas (Fig. 1)

La Fase gaseosa no tiene impacto sobre la CEa ya que el aire actúa como aislante.

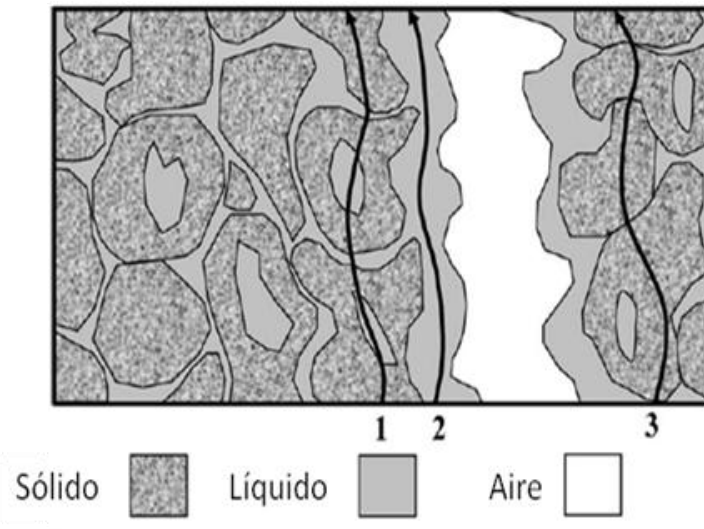


Fig. 1. Sendas de conductancia eléctrica que contribuyen a la medición de Conductividad Eléctrica aparente (Corwin and Lesh, 2003)

La variación de CEa en el suelo se atribuye a diferentes propiedades del mismo, donde las más importantes son:

Textura, siendo importante tipo y porcentaje de arcilla (Fig. 2) (Williams and Hoey, 1987; Lund *et al.*, 1999; Aueswald *et al.*, 2001; Farahani *et al.*, 2005)

Humedad del suelo en conjunto con tamaño de poros, tortuosidad y espacio poroso lleno de agua (Sheets and Hendricx, 1995; Sudduth *et al.*, 1995; Jaynes, 1996; Khakural *et al.*, 1996; Friedman, 2005)

Salinidad de la solución del suelo (Fig. 2) (Rhoades and Corwin, 1991; Lesch *et al.*, 1995a; Malicki, 1999; Johnson *et al.*, 2001)

CIC y cationes (McBride *et al.*, 1990; Jaynes *et al.*, 1994; Kitchen *et al.*, 2000; Hartsock *et al.*, 2000; Heiniger *et al.*, 2003)

Elevación y pendiente como atributos de suelo que tienen influencia sobre la distribución hídrica (Moore *et al.*, 1993; Gessler *et al.*, 2000)

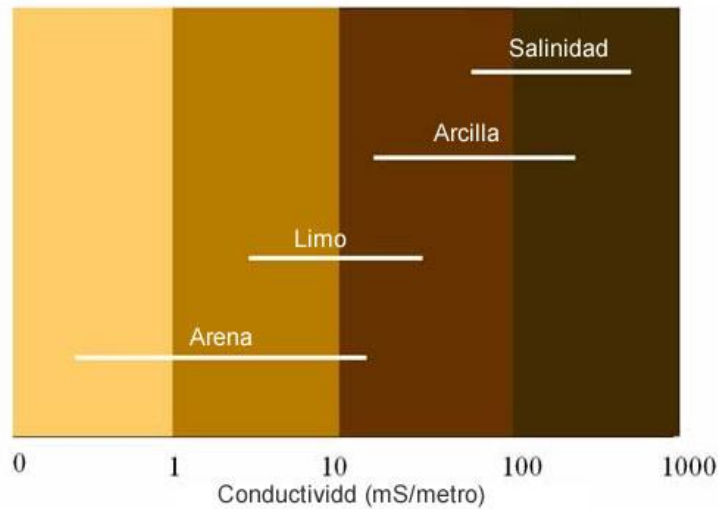


Fig. 2. Intensidad de conductancia (mS metro^{-1}) de arena, limo, arcilla y condiciones de salinidad del suelo (Grisso et al., 2007)

Para un suelo en particular, uno o más de estos factores domina la medición de la CEa, por lo tanto es posible usarla como una medición indirecta de otras propiedades de suelo que influyen en la productividad de cultivos (Jaynes, 1996; Bullock and Bullock, 2000; King *et al.*, 2001; Taylor *et al.*, 2003; Corwin and Lesch, 2003). Una ventaja adicional que posee este método, es que solamente sus magnitudes (valores de los rangos de CEa) cambian en el tiempo; pero no los patrones de distribución de la CEa en el terreno, por lo que las áreas delimitadas son repetibles en el tiempo, aún bajo distintas condiciones de humedad y de compactación de suelo (Veris Technologies, 2001; Šarec *et al.*, 2002; Lück *et al.*, 2005; Farahani *et al.*, 2005). A su vez, esta metodología permite reducir el número de muestras de suelo a tomar para describir la variabilidad de un suelo en particular (Sudduth *et al.*, 1996; Corwin and Lesch, 2003; 2005a; Corwin *et al.*, 2003a; Lesch, 2005).

Si bien la CEa no tiene una relación directa con crecimiento y rendimiento de los cultivos, hay posibilidades de predecir el rendimiento de los cultivos por medio de este método (Jaynes *et al.*, 1993, 1995; Kitchen and Sudduth, 1996; Lund and Christy, 1998; Rhoades *et al.*, 1999; Fritz *et al.*, 1999; Sudduth *et al.*, 1999; Kitchen *et al.*, 1999; Lund *et al.*, 1999; Johnson *et al.*, 2001; Corwin *et al.*, 2003). Esta efectividad en la predicción del rendimiento a través de la CEa, va a depender del grado en cual propiedades de suelo que afecten la misma, sean las que influyan en la productividad del cultivo (Sudduth *et al.*, 1995). Varios autores han hallado relación entre mapas de

CEa y mapas de rendimiento de los cultivos (Jaynes *et al.*, 1995; Kitchen and Sudduth, 1996; Lund and Christy, 1998; Lund *et al.*, 1999; 2001). Se han determinado relaciones entre CEa y rendimiento debidas a la textura como factor determinante de la CEa (Sudduth *et al.*, 1995; Kitchen and Sudduth, 1996; Lund and Christy, 1998; Kitchen *et al.*, 1999), al contenido hídrico del suelo (Kachanoski *et al.*, 1990; Jaynes *et al.*, 1993, 1995; Sudduth *et al.*, 1995; Johnson *et al.*, 2001; Lund *et al.*, 2001, Morgan *et al.*, 2001; Corwin *et al.*, 2003), a la topografía (Timlin *et al.*, 1998) y posibles problemas de penetración de raíces (Kitchen *et al.*, 2003).

La geo-referenciación in situ de la CEa se realiza a escala comercial por medio de Sensores de Medición Directa (SMD), donde el mas difundido es el Veris 3100 (Veris Technologies, 2001) por su practicidad, precisión y costo. El mismo posee tres pares de discos como electrodos que permiten realizar la medición de CEa del suelo en tiempo real a 0-30 y 0-90 cm de profundidad.

1.2.- ANTECEDENTES ESPECÍFICOS

La CEa del suelo se ha vuelto una de las medidas más confiables y usadas para caracterizar la variabilidad de los lotes a los que se va a aplicar agricultura de precisión debido a su fácil medición y confiabilidad (Rhoades *et al.*, 1999; Corwin and Lesch, 2003) y a que ésta, permite clasificar los lotes en zonas con diferentes rangos de CEa, que se traducen en diferencias de producción potencial a nivel de cultivo (Johnson *et al.*, 2001; Corwin and Lesch, 2005; Kitchen *et al.*, 2005; Cockx *et al.*, 2006; Vitharana *et al.*, 2006).

Con respecto a la relación entre CEa y parámetros de suelo, autores como McBride *et al.* (1990) encontraron fuertes correlaciones entre CEa y atributos de suelo relacionados con la actividad forestal incluyendo extracto saturado de CE en suelo, Ca y Mg intercambiables y CIC. Jaynes (1996) propone que la intensidad de la CEa del suelo está determinada primariamente por el tipo y porcentaje de arcilla, la humedad del suelo, el tamaño de poros y su tortuosidad y salinidad de la solución del suelo; donde uno o más de estos factores dominará la medida. Kaspar *et al.* (2004) hallaron que la CEa mostró alta correlación con propiedades del suelo como el contenido de arcilla, contenido hídrico, la salinidad del suelo, contenido de materia orgánica del suelo y la capacidad de intercambio catiónico. A su vez, encontró que más del 80% de la variación en CEa, arena, limo, arcilla, C, N, color del suelo, pendiente, P y Zn fueron explicados por 4 factores que denominó posición del paisaje, depresiones cerradas,

pH y curvatura. Omonode and Vyn (2006) realizaron un estudio con fines de evaluar la relación entre CEa y MO, P y K; y a su vez caracterizar la dependencia espacial de estos parámetros en dos órdenes de suelo: molisol y alfisol. Las correlaciones entre CEa y las propiedades químicas fueron generalmente débiles y variaron con el año cuando analizaron ambos suelos juntos. Schepers *et al.*, (2004) propuso caracterizar la variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo y el rendimiento del cultivo a partir del uso de CEa y elevación. Lograron delimitar cuatro zonas diferentes donde analizaron pH, MO, CEe y P extractable en cada una. En los niveles de MO encontraron hasta un 50% de diferencia en el contenido de la misma desde las zonas más bajas hacia las más altas. Con respecto a pH y CEe los valores de suelo aumentaron con el aumento de la elevación (suelos calcáreos) mientras que para fósforo se observó lo contrario. Johnson *et al.* (2003) trabajaron en una región semi-árida buscando correlación entre la CEa (0-30 y 0-90 cm), parámetros de suelo y rendimiento de maíz. Con respecto a la CEa (0-30 cm) tuvieron una correlación positiva con la densidad aparente, el contenido de arcilla y el pH (variables asociadas a la erosión). Por otro lado, el contenido hídrico, MO, C, N y P (variables asociadas al rendimiento del cultivo) mostraron una correlación negativa. Con respecto a la asociación entre CEa y rendimiento del cultivo la CEa (0-90 cm) coincide significativamente con diferencias en el rendimiento del maíz. Udayakantha *et al.* (2008) concluyeron que en el área de loess Europeo, con interacciones complejas de paisaje; la CEa, el pH, y la elevación pueden definirse como propiedades claves para delinear clases potenciales de manejo para agricultura de precisión.

Con respecto a la relación entre CEa y rendimiento del cultivo, Rhoades *et al.* (1999) opinan que las mediciones de CEa permiten obtener información espacial detallada de forma rápida y económica sobre propiedades del suelo que influyen el rendimiento de los cultivos y sus patrones espaciales de comportamiento. A su vez, Corwin *et al.* (2003) consideran que esta herramienta provee una alternativa viable cuando el monitoreo de rendimiento no está disponible. Jaynes *et al.* (1993); Kitchen *et al.* (1999) y Johnson *et al.* (2001) proponen que la CEa puede ser usada como un indicador del potencial de rendimiento de los cultivos. Martin *et al.* (2005) hallaron una alta correlación entre CEa (30-90 cm), MO y pH con el rendimiento del cultivo de soja durante los años 2000 y 2001. Jaynes *et al.* (1995) y Sudduth *et al.* (1995) lograron predecir el rendimiento de cultivos a partir de que la CEa detectara diferencias en el contenido hídrico del suelo a nivel de lote. La geo-refrenciación in-situ para la

estimación de la CEa se hace a escala de campo usando sensores de contacto directo que miden resistencia y sensores de “no contacto” basados en la tecnología de inducción electromagnética (Doolittle *et al.*, 1994; Jaynes, 1996), ambos presentan resultados equivalentes y proveen alta correlación en las medidas de CEa y la productividad del cultivo desde la superficie hasta profundidades de 90 cm (Fritz *et al.*, 1999; Sudduth *et al.*, 1999).

Otra ventaja de la aplicación de la CEa, es que la misma puede utilizarse de base para un esquema de muestreo de suelos (Corwin and Lesch, 2003; 2005; Lesch, 2005). Sudduth *et al.* (1996) realizaron una correlación entre rendimiento y análisis de suelos (pH, P, K, Mg y Ca) comparando muestreo de suelos al azar versus un muestreo dirigido generado a partir de rangos de CEa y elevación. Los resultados mostraron correlaciones más altas y ajustadas al trabajar en el muestreo dirigido de suelos. Corwin *et al.* (2003) y Lesch *et al.* (1995; 1995a) usaron las mediciones de CEa para hacer un muestreo directo de suelos obteniendo buena respuesta en el diseño de muestreo superficial, lo que permitió delinear unidades de manejo sitio específico basadas en propiedades edáficas y antropogénicas que influyen el rendimiento del cultivo. Para caracterizar la calidad del suelo, Johnson *et al.* (2001) usó un muestreo de suelo estratificado basado en cuatro rangos de CEa georeferenciados. Sus resultados mostraron una correlación positiva entre CEa y porcentaje de arcilla, densidad aparente, pH, CE1:1 sobre profundidades de suelo 0-30 cm, y una correlación negativa con la humedad del suelo, la MO particulada, C y N total, C y N de la biomasa microbiana. Corwin *et al.* (2003a) caracterizaron la calidad de suelos salino-sódicos usando un diseño de muestreo de suelos superficial. Hallaron correlaciones positivas entre CEa y propiedades como contenido de agua volumétrica, CEe (conductividad eléctrica del extracto de saturación), Cl^- , NO_3^- , SO_4^- , Na^+ , K^+ , Mg^+ y C orgánico e inorgánico. Una cantidad de propiedades de suelo (densidad aparente, porcentaje de arcilla, pH Ca^{2+} , CIC, N total) no se relacionaron con la medición de CEa.

1.3.- Justificación del Trabajo

A partir de la expansión agrícola hacia zonas extra pampeanas, la Provincia de Corrientes se incorporó dentro de los nuevos horizontes de producción agrícola

generando la necesidad de investigar la adaptación del cultivo de maíz a la zona y de acondicionar la tecnología disponible para obtener altos rendimientos. Junto con esto, la concentración de hacienda en la provincia implica aumentar la cantidad y calidad de alimento para la misma, siendo el maíz una opción importante (Lopez Valiente, 2008).

Dado que en la provincia de Corrientes, existe un complejo ecosistema en el cual los factores formadores de los suelos contribuyeron en la generación de las diversas regiones naturales; la provincia cuenta con siete de los once órdenes que contempla la taxonomía del sistema Americano vigente (Alfisoles (29,4 %), Molisoles (28,3 %), Entisoles (18,8 %), Inceptisoles (7 %), Vertisoles (6,3 %), Ultisoles (4,2 %) e Histoiles (3,9 %) (Escobar et al., 1996). Dicha variabilidad del suelo juega un papel significativo en el rendimiento del cultivo de maíz, especialmente en condiciones de secano, ya que las variaciones en la textura del suelo pueden mostrar el efecto de la escasez de humedad sobre varios componentes del cultivo.

A partir de los motivos expuestos y dado que la revisión bibliográfica no muestra antecedentes de este tipo de trabajos en la Provincia, se considera que los conocimientos adquiridos en esta investigación serán de utilidad para detectar la variabilidad existente en los lotes de manera práctica y a bajo costo permitiendo delimitar diferentes zonas de manejo para el cultivo de maíz, y a su vez constituirían la base para comenzar con un futuro Programa de Agricultura de Precisión dentro de la Provincia.

2.- Hipótesis y Objetivos del Trabajo

Hipótesis

Fundamental

La variación espacial en el rendimiento de maíz se ve afectada por la variabilidad espacial de las propiedades físico-químicas del suelo. Esta última puede ser delimitada en zonas homogéneas a través de la CEa medida por el Veris 3100.

De trabajo

- 1.- La Textura presenta variabilidad espacial que puede ser delimitada por la medición de CEa 0-90 cm.
- 2.- La Humedad del suelo presenta un patrón que se encuentra asociado a la CEa 0-90 cm.
- 3.- Los parámetros químicos de suelo medidos (MO, pH, P, CE extracto saturación, Ca, Mg, Na, K y Suma de Bases) presentan variabilidad espacial asociada a la CEa 0-90 cm.
- 4.- La Altimetría presenta un patrón de comportamiento inverso asociado a la CEa 0-90 cm.
- 5.- En condiciones de campo, la CEa 0-90 cm y el rendimiento de maíz, tienen una distribución espacial que puede delimitar áreas de manejo sitio específico dentro de cada lote de producción.

Objetivos

General

Delimitar áreas diferentes, con características de suelo similares en un mismo lote por medio del uso del Veris 3100 para ser utilizadas en un programa de agricultura de precisión.

Específicos

- 1.- Identificar áreas con similar CEa 0-90 cm, y relacionarlas con textura, humedad del suelo y altimetría en cada zona de CEa homogénea
- 2.- Identificar áreas con similar CEa 0-90 cm, y relacionar cada una de ellas con las variables *químicas* medidas dentro de cada zona de CEa homogénea
- 3.- Comprobar asociaciones significativas entre la CEa 0-90 cm y el rendimiento del cultivo de maíz.

3.- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.- Sitios experimentales

Este trabajo se llevó a cabo en tres localidades de la Provincia de Corrientes, Argentina: Mercedes, Peruggorría y El Sombrero (Fig. 3).

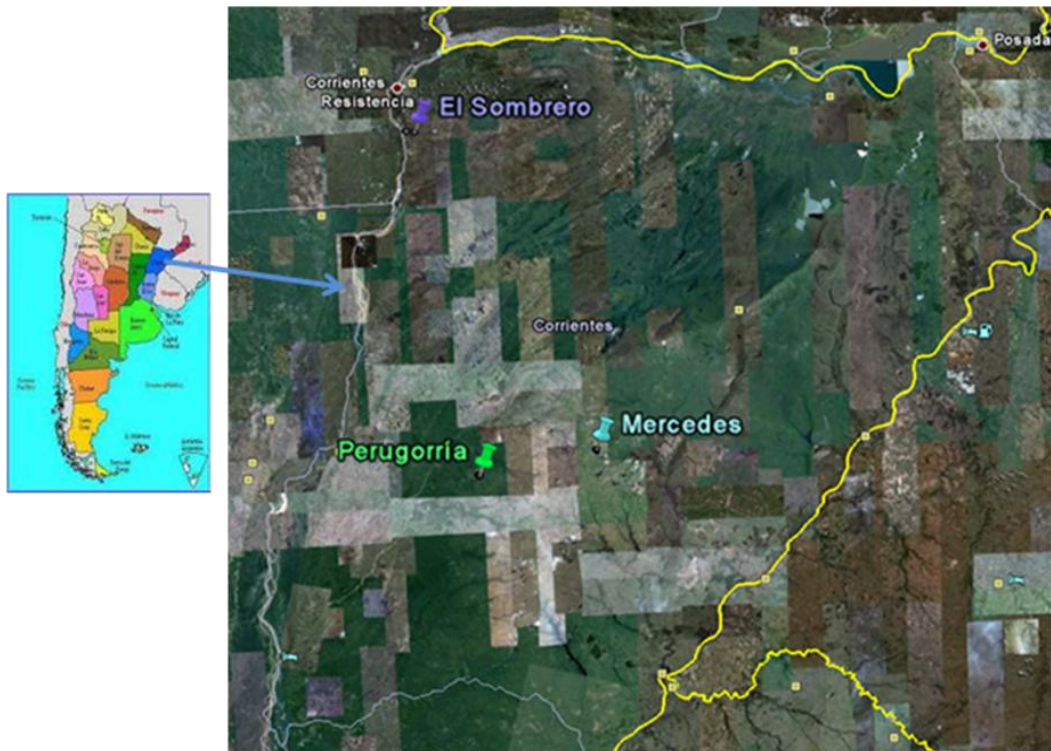


Fig. 3. Localidades sobre las que se realizó el trabajo en la Provincia de Corrientes.

La localidad de **Mercedes** se encuentra ubicada en el centro sur de la Provincia de Corrientes. El lote bajo estudio ($29^{\circ} 8,757' S$ $57^{\circ} 55,070' O$) tiene una superficie de 60 has y pertenece a la unidad Cartográfica 17a / h-D, la cual está formada por una asociación de suelos Argiacuoles vérticos (Serie Caneto), Argiudoles típicos (Serie Puerto Colonia), Paleudalfes arénicos (Serie Pueblito) con predominio de los primeros (Escobar *et al.*, 1996). La Serie Caneto posee una clase de Capacidad de uso IIIe, se ubica en relieve normal, posición de loma a media loma baja con pendiente de 0,5 a 1%. El escurrimiento es medio a lento, la permeabilidad lenta y el drenaje imperfecto. Poseen un epipedón mólico, gris parduzco a pardo oscuro, de textura arcillosa. El horizonte subyacente es argílico, de color gris oscuro a pardo muy oscuro, de textura arcillosa, de reacción neutra a ligeramente alcalina en profundidad. Presenta mediana

provisión de bases de cambio, pero bajo nivel de potasio, el contenido de materia orgánica es mediano a bajo y es deficiente en fósforo. (Escobar *et al.*, 1996).

La localidad de **Perugorría** se encuentra ubicada al sur oeste de Mercedes. El lote bajo estudio (29° 14,369´S 58° 31,014´O) tiene una superficie de 80 has y pertenece a la unidad Cartográfica 56a / h-D, la cual está formada por una asociación de suelos Argiudoles vérticos (Serie María Isabel), Hapludertes énticos (Serie Sellares), Argiudoles ácuicos (Serie La Pradera) con predominio de estos últimos (Escobar *et al.*, 1996). La Serie La Pradera posee una clase de Capacidad de uso es IIIes, se ubica en relieve normal, en lomas con pendientes de 3 a 5%. El drenaje es moderado a imperfecto, con escurrimiento medio permeabilidad moderadamente lenta a moderada. El horizonte A1 es mólico, negro y de textura franco arenosa, con moteados en su parte inferior. Le sigue un BA, luego un Bt, argílico, franco arcilloso, negro, fuertemente estructurado, con moteados en la parte superior y de reacción débilmente ácida a neutra. Son suelos moderadamente fértiles, medianamente ricos en materia orgánica y con niveles moderados de fósforo en la parte superior del mólico (Escobar *et al.*, 1996).

La localidad **El Sombrero** se encuentra situada en la zona noroeste de la Provincia, a 30 Km al sur de la ciudad de Corrientes capital. El lote bajo estudio (27° 40,407´S 58° 45,656´O) (1,5 has) pertenece a la unidad cartográfica 95a / h-D-A, la cual está formada por una asociación de suelos Argiudoles ácuicos (Serie Treviño), Endoacualfes típicos (Serie Valencia) y Epiacualfes típicos (Serie Tala) con predominio de los primeros (Escobar *et al.*, 1996). La Serie Treviño pertenece a la clase de Capacidad de uso IIIe, los suelos se ubican en relieve normal, media loma alta a media loma, con pendientes de 1 a 1,5%. Son moderadamente bien drenados, con escurrimiento medio a lento y permeabilidad moderadamente lenta a moderada, encharcables por cortos períodos. Presenta un epipedón mólico de 40 cm de profundidad, que incluye un BAT; franco arenoso, color pardo grisáceo muy oscuro y reacción débilmente ácida. El horizonte argílico (Bt), franco arcillo arenoso, fuertemente estructurado, tiene color negro y reacción neutra. Son suelos moderadamente fértiles, con valores intermedios de bases de cambio, especialmente en el Bt y de materia orgánica en el epipedón; muy pobres en fósforo (Escobar *et al.*, 1996).

La selección de cada uno de los lotes se realizó en base al estudio del mapa de suelos y la variabilidad observada en cada lote. En el caso de las localidades Perugorría y Mercedes, se contrastó esta información con los profesionales encargados de cada

campo. Con respecto al lote de la EEA Corrientes, el mismo es un lote donde se realizan ensayos experimentales en parcelas.

3.2.- Sensor Veris 3100 y Medición de la CEa

La CEa fue medida mediante el empleo un SMD denominado Veris 3100 (Veris Technologies, 2001) (Fig. 4).

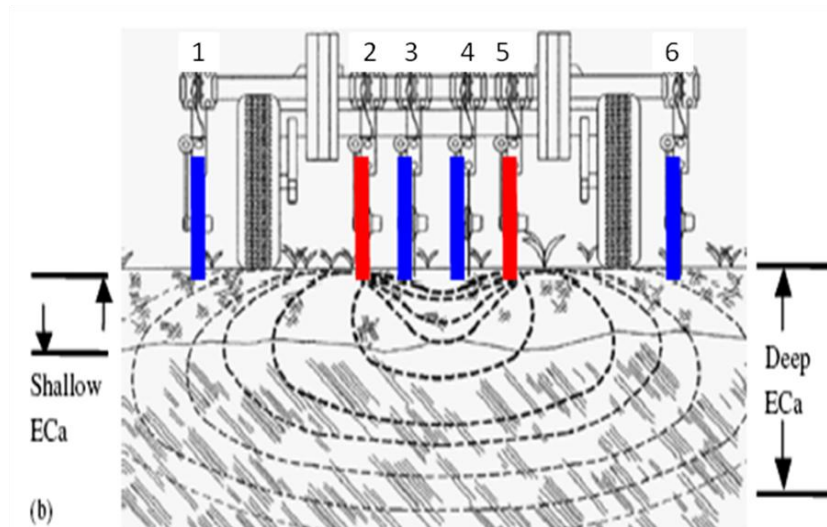


Fig. 4. Esquema del Veris 3100 empleado para las determinaciones de Conductividad Eléctrica aparente (Farahani *et al.*, 2005)

El mismo posee tres pares de discos como electrodos para determinar la CEa del suelo. Los discos están montados sobre un bastidor con ruedas y levante hidráulico, lo que permite arrastrarlo por el terreno a evaluar montado a un vehículo. Los discos penetran en la superficie del suelo a una profundidad de aproximadamente 5-6 cm. El par de discos 2 y 5 (Fig. 4) tiene la función de emitir una corriente eléctrica en el suelo, mientras que los discos 1, 3, 4 y 6 detectan el grado de disminución en la corriente eléctrica emitida a causa de su transmisión a través del suelo (resistencia). El par central, (discos 3 y 4) lee la resistencia ofrecida por el suelo de 0-30 cm de profundidad, mientras que el par externo, (discos 1 y 6) lee la resistencia de 0-90 cm de profundidad. El grabador de datos del equipo trabaja acoplado a un DGPS (Sistema de Posicionamiento Global Diferencial), donde almacenan un dato por segundo de conductividad eléctrica ($1/\text{resistencia} = \text{conductividad}$) en decisiemens por metro (dS m^{-1}) y la posición exacta (latitud y longitud) al momento de la medición (Veris Technologies, 2001; Johnson *et al.*, 2001).

El instrumento fue calibrado según las instrucciones del manual, previo al inicio de recolección de datos. Luego fue remolcado a través de cada lote por una camioneta en series de transectas paralelas separadas aproximadamente 5 metros en la localidad de El sombrero y de 15 metros en las localidades de Mercedes y Perugorría con el propósito de ser más eficientes en el tiempo de muestreo manteniendo la precisión de la medición. Según Farahani and Flinn (2007) no existen diferencias en la eficiencia de predicción del mapa en transectas separadas entre 2,5 y 30 metros; por encima de este valor (separaciones entre 30 a 50 metros) la reducción en la calidad del mapa generado es solamente de un 10%. La velocidad promedio de trabajo fue de 15 km h⁻¹.

Cada uno de los lotes comprometidos en este estudio fue mapeado individualmente para obtener la CEa previo a la siembra del cultivo (Foto. 1). Para esta investigación se trabajó con los datos de CEa en profundidad (0-90 cm) ya que se consideró que esta medida es más representativa de la variabilidad del suelo para la profundidad de crecimiento de raíces del cultivo de maíz.



Foto. 1. Veris 3100 en posición de trabajo

3.3.- Mapas de CEa

Con los datos obtenidos en cada lote se confeccionaron los mapas de CEa mediante el Programa *ArcGis* 9.2 (ESRI, 2008). El primer paso en la realización de estos mapas fue la confección del **semivariograma experimental**. El mismo es una

función básica que describe cuantifica la dependencia espacial de una variable, es decir, su autocorrelación espacial (Vieira, 2000; Vieira et al., 2002) y viene definido por la expresión (Ec. 1):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \left[Z(x_i) - Z(x_i + h) \right]^2 \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

$\gamma(h)$ = valor del semivariograma en función de la separación entre dos puntos

$Z(x_i)$ = valor de la variable de interés en el punto x_i

$Z(x_i + h)$ = valor de la variable de interés en el punto $x_i + h$

$E[\]$ = Expectativa estadística del operador

Este modelo representa la dependencia espacial de los valores de una variable registrados en dos puntos separados a una cierta distancia h . A medida que aumenta la distancia entre dos puntos, las diferencias entre valores registrados se van incrementando, por lo que la correlación espacial disminuye (Journel and Huibregts; 1978). Además, se asume el principio de *estacionariedad*, que consiste en que si dos lugares están a una distancia y dirección similar tendrán similares diferencias al cuadrado entre sus valores (estacionariedad de segundo orden).

La expresión gráfica del semivariograma se encuentra en la Figura 5. Sus partes constituyentes son *efecto pepita* (C_0), el mismo representa la variabilidad de la propiedad estudiada para distancias inferiores a la menor de las distancias entre muestras vecinas. Se interpreta como una discontinuidad en el origen que puede ser debida a errores de medida o a una microregionalización del fenómeno. La semivarianza (diferencia entre $Z(x_i + h) - Z(x_i)$) con frecuencia aumenta con la distancia hasta un valor máximo en el que se estabiliza denominado *umbral* ($C_0 + C_1$). El *alcance* (a), es la distancia a la que $\gamma(h)$ alcanza la meseta. Representa el radio de un círculo dentro del cual los valores de la propiedad estudiada son tan similares entre sí que están espacialmente correlacionados (Davis, 1973; Journel and Huibregts, 1978). A partir de esta distancia la correlación entre las variables es nula, pasando a tener una distribución aleatoria y ser independientes entre sí (Morales, 2004; Giménez, 2009). Posteriormente se procede al ajuste de un **Modelo Teórico** que describa esa variabilidad. La selección del modelo se realiza haciendo coincidir la curva del semivariograma experimental con la curva de la función matemática buscando obtener

el menor Cuadrado Medio del Error (CME). Los modelos teóricos más comunes son: Lineal, Esférico, Exponencial, Pepita puro y Gaussiano.

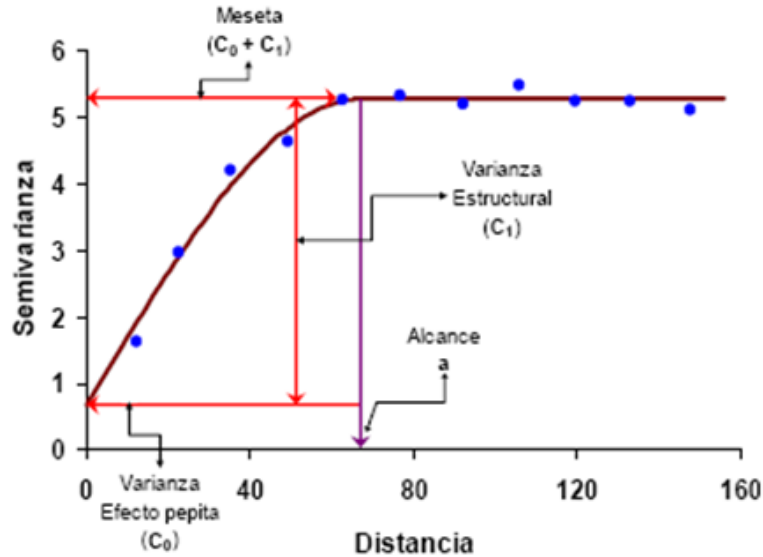


Fig. 5. Representación gráfica de un semivariograma teórico y sus partes constituyentes (Morales, 2004)

A su vez es importante destacar que la mayoría de las variables de la Ciencia del Suelo tienen carácter *anisotrópico*, es decir, la variación espacial es diferente en las distintas direcciones h estudiadas (Samper y Carrera, 1990), con lo cual se hace importante realizar este ajuste al modelo empleado. Finalmente se realiza la predicción de las propiedades estudiadas en puntos dentro del área de estudio donde no se han tomado muestras. El método clásico de interpolación en Geoestadística es el krigado o “**kriging**”, nombre dado por Matheron (1971) en honor al matemático surafricano Krige (Giménez, 2009). El valor interpolado con este método *carece de sesgo* (ya que la interpolación de las variables en un punto de medida devuelve el valor de la variable en ese punto con un error de estimación nulo), posee *varianza mínima* y su metodología de interpolación consiste en *asignar distintos pesos de ponderación a las variables* de las que dispone los cuales dependen directamente de la variabilidad espacial (Vieira, 2000). El estimador utilizado en el krigado también se llama **BLUP** iniciales de Mejor Predictor Lineal Insesgado (del inglés Best Linear Unbiased Predictor) que resume las condiciones que debe de cumplir el estimador (Hawkins and Cressie, 1984). Existen diferentes tipos de kriging, donde los más comunes son el

krigging ordinario o *krigging puntual* y el *krigging universal* empleando cada uno según las necesidades de interpolación.

Cada uno de los mapas obtenidos fue procesado dividiéndolo en 3 rangos de CEa, con el objetivo de que resulten útiles y potencialmente aplicables por el productor. Posteriormente dentro de cada uno de ellos se sacaron las muestras de suelo para realizar la correlación entre las variables de suelo medidas y la CEa. Los valores y amplitud de los rangos de CEa para cada lote se determinaron en función de la distribución observada en los histogramas generados con los datos de cada lote.

3.4.- Determinación de puntos de muestreo de suelo

La determinación de puntos de muestreo dentro de cada lote, se basó en un Muestreo al Azar Estratificado. Para obtener este tipo de muestra inicialmente se dividió a la población en sub-poblaciones llamadas *estratos*, cuya característica es ser más homogéneos que la población en un todo (los estratos, fueron cada uno de los Rangos de CEa). Finalmente se seleccionaron los puntos de muestreo al azar dentro de cada estrato de tal forma de lograr la mayor representatividad de los parámetros de suelos. Dentro de cada estrato se realizaron 3 repeticiones y a su vez se tomaron tres sub-muestras de suelo dentro de cada repetición, tomando como referencia puntos con latitud y longitud específica de CEa.

3.5.- Muestreo de suelos

El muestreo de suelo se realizó manualmente en pre siembra del cultivo en todos los lotes, con barreno en los puntos de GPS determinados anteriormente a tres profundidades 0-30, 30-60 y 60-90 cm con fines exploratorios, ya que los Mapas de suelos existentes en la provincia están realizados con poco detalle (escala 1:500.000) y se busco cubrir la mayor variabilidad posible de los parámetros medidos.

3.6.- Análisis en laboratorio

Se tomo parte de cada una de las muestras de suelo extraídas para determinación de Humedad (%) por el Método gravimétrico (diferencia de peso húmedo y peso seco obtenido por secado de la misma en estufa a 105°C) por 24 hs. El resto de

cada muestra se dejó secar a temperatura ambiente y se molió hasta pasar por tamices de malla de 1 y 2 mm para posterior determinación de Textura por el Método de Bouyucus (% arcilla, arena y limo), Materia Orgánica (*MO*, %) por Walkley & Black, *pH* (agua 1:2,5), Conductividad Eléctrica del extracto de saturación (*CEe*, mmho cm^{-1}) por medio de conductímetro, Fósforo extractable (*P*, ppm) por el método Bray & Kurtz 1, Calcio (*Ca*, meq 100 gr suelo⁻¹) y Magnesio (*Mg*, meq 100 gr suelo⁻¹) por Complejidad con EDTA, Sodio (*Na*, meq 100 gr suelo⁻¹) y Potasio (*K*, meq 100 gr suelo⁻¹) con Espectrofotómetro de llama y Suma de Bases (*SB*, meq 100 gr suelo⁻¹) según lo descrito en Sparks *et al.* (1996).

3.7.- Medición de Altimetría

La medición de Altimetría se realizó con el GPS geodésico Trimble GeoXH (error estándar < 30 cm) (Trimble, 2008) solamente para las localidades de Mercedes y Peruggorría por la superficie de los lotes trabajados. El equipo consta de dos partes: un módulo estacionario que funciona como altura de referencia y un módulo móvil que va instalado en la camioneta junto con el almacenador de datos del equipo que es el encargado de almacenar latitud, longitud y altura (metros) de cada punto tomado (Foto 2 y 3). Para obtener esta medición se recorrió el lote con el vehículo en una serie de transectas paralelas separadas aproximadamente 20 metros entre sí.



Fotos 2 y 3. GPS para medición de Altimetría: Módulo estacionario (izquierda), instalación del módulo móvil sobre el techo de la camioneta (derecha)

Para la confección de los mapas de Altimetría se realizó el mismo procedimiento explicado anteriormente para generación de mapas de CEa. Se confeccionó el semivariograma experimental al que luego se le ajustó un modelo matemático teórico. Finalmente se realizó la predicción de las propiedades estudiadas en puntos dentro del área de estudio donde no se han tomado muestras por interpolación o “kriging”.

3.8.- Correlación entre Mapas de CEa y Mapas de Altimetría

Se tomaron los mapas de CEa 0-90 cm y de altimetría y se procesaron para dividirlos en una malla o rejilla regular (método grid) de 10 x 10 metros, en la que cada celda toma el valor de la variable calculada mediante el promedio de todos los pares que caen dentro de esa celda. Se tomó este valor en cada uno de los mapas con su correspondiente localización en el espacio (latitud y longitud) y se realizó un análisis de correlación entre los puntos logrados.

Finalmente se hizo un estudio de Transectas dentro de ambos mapas para comparar estos parámetros. Este estudio consiste en realizar “un corte” en un lugar del mapa seleccionado, y el programa ArcGis 9.0 (ESRI, 2008) presenta gráficamente la variabilidad de los parámetros a modo de transecta en el terreno.

3.9.- Correlación entre Mapas de CEa y Rendimiento del cultivo de maíz

En la Localidad de Mercedes, el cultivo se sembró en un lote con antecesor soja de primavera en SD. Se utilizó el híbrido MASS494hx y la fertilización de base fue de 90 Kg ha⁻¹ de fosfato monoamónico incorporado con la semilla. En el estadio de 6 hojas (V6) se realizó una aplicación foliar de Solmix a razón de 80 lts ha⁻¹.

En Peruggorría el maíz se sembró en un lote con antecesor maíz, en siembra directa. El híbrido utilizado fue NK900 y la fertilización de base fue 140 Kg ha⁻¹ de una mezcla física NPK (6,6-31-24). En el estadio de V6 se aplicaron 100 Kg ha⁻¹ de urea al voleo.

En El Sombrero, el cultivo se sembró sobre un barbecho de avena, en LC. La fertilización de base fue de 90 Kg ha⁻¹ fosfato diamónico + 45 Kg ha⁻¹ Cloruro de Potasio incorporados con la semilla. Se sembró el híbrido SPS 3904 y en el estadio de V6 se aplicó urea al voleo a razón de 100 Kg ha⁻¹.

En todas las localidades, la cosecha se realizó en forma manual dentro de cada rango de CEa definido anteriormente. Se cortaron al azar 20 líneas de 20 metros de largo cada una (en las localidades de Mercedes y Perugorría) y 10 líneas de 20 metros cada una en el lote ubicado en El Sombrero. Las mismas fueron tomadas partiendo de los mismos puntos geo-referenciados para el muestreo de suelo. Inmediatamente después de la cosecha, las espigas fueron secadas a estufa a 45 °C durante 48 horas y luego pesadas para determinación de rendimiento. Posteriormente se realizó el análisis de correlación entre ambas variables.

3.10.- Análisis de la Información

El análisis de la información se realizó sobre las tres localidades bajo estudio, teniendo en cuenta que se realizó un experimento en cada localidad. Se consideró la localidad y los rangos de CEa como efectos fijos y las repeticiones en el muestreo de suelos como efectos aleatorios.

Con el objetivo de determinar la correlación entre la CEa y las propiedades de suelo y planta estudiadas, fueron construidas las matrices de correlación entre los pares de datos con el procedimiento PROC CORR de SAS versión 9.2 (SAS Institute, 2009), y análisis de varianza de los datos obtenidos utilizando el procedimiento PROC MIXED de SAS versión 9.2 (SAS Institute, 2009), utilizando un nivel de significancia de 0,01 a 0,05 tanto para la evaluación de varianzas como para la comparación de medias.

Para la exploración de la estructura espacial de cada una de las propiedades del sitio y posterior determinación de los puntos no muestreados se utilizó el sistema de información geográfica ArcGis 9.2 (ESRI, 2008). Este programa, junto al Google Earth, 2010, se utilizaron para la organización, manipulación y visualización gráfica de los resultados obtenidos.

4.- RESULTADOS y DISCUSIÓN

4.1.- Variabilidad de la Conductividad Eléctrica aparente en el Suelo (CEa)

La Tabla 1 muestra los datos obtenidos luego de la medición de CEa por medio del sensor Veris 3100 para la localidad de Mercedes, Perugorría y El Sombrero.

Tabla 1. Estadística descriptiva de la medición de Conductividad Eléctrica aparente

| Localidad | n | Mín. | Máx. | Media | Desv. Est. | EE | CV (%) |
|------------------|----------|-------------|-------------|--------------|-------------------|-----------|---------------|
| Mercedes | 4313 | 29 | 83 | 49,48 | 9,63 | 0,15 | 20,27 |
| Perugorría | 7213 | 28 | 147,4 | 82,01 | 24,74 | 0,31 | 31,54 |
| El Sombrero | 922 | 15,10 | 56 | 32,87 | 7,76 | 0,26 | 24,18 |

n: número de medidas; Mín: Valor mínimo; Máx: Valor máximo; Desv. Est: Desvío Estándar; EE: Error estándar; CV: Coeficiente de Variación (%)

El valor medio más alto de CEa junto con el mayor CV (%) se obtuvieron para la localidad de Perugorría, mientras que el menor CV (%) fue para los datos de Mercedes (Tabla 1). Estos resultados son similares a los hallados por Vitharana *et al.* (2008) quienes estudiaron el uso de datos de CEa para el mapeado digital de suelos en Bélgica, y encontraron un valor de CV de 25,30%. También concuerdan con los valores reportados por Siqueira (2009) quien halló valores de CV de 20,7%; 15,34% y 22,07% en tres fechas de medición de CEa.

El análisis gráfico de estos datos a partir de Histogramas muestra que para Mercedes y El Sombrero los valores de CEa están concentrados cerca del valor medio, indicando la presencia de normalidad de los datos, supuesto necesario para el cálculo de los semivariogramas (Vieira *et al.*, 2002). A diferencia de las localidades anteriores, el histograma obtenido en Perugorría presenta una distribución bimodal, con dos máximos diferenciados (Figuras 6, 7 y 8).

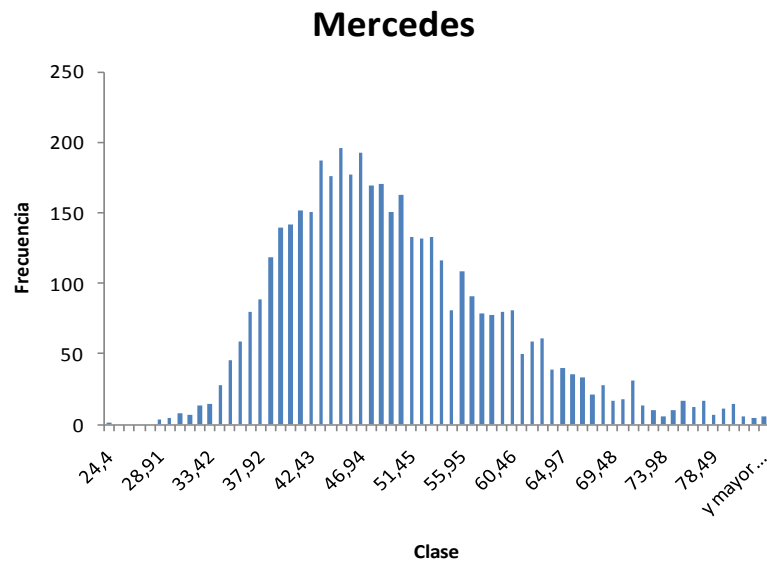


Fig. 6. Distribución de Frecuencias de Conductividad Eléctrica aparente - Mercedes

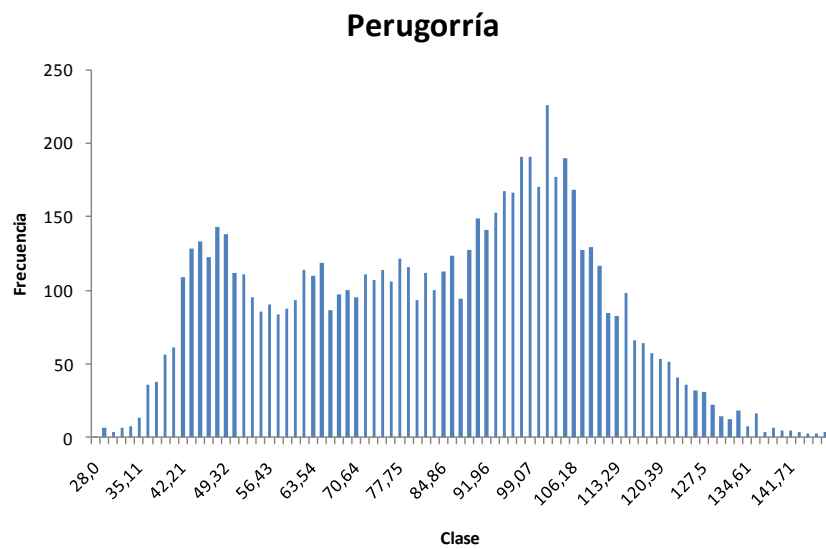


Fig. 7. Distribución de Frecuencias de Conductividad Eléctrica aparente - Peruggorría

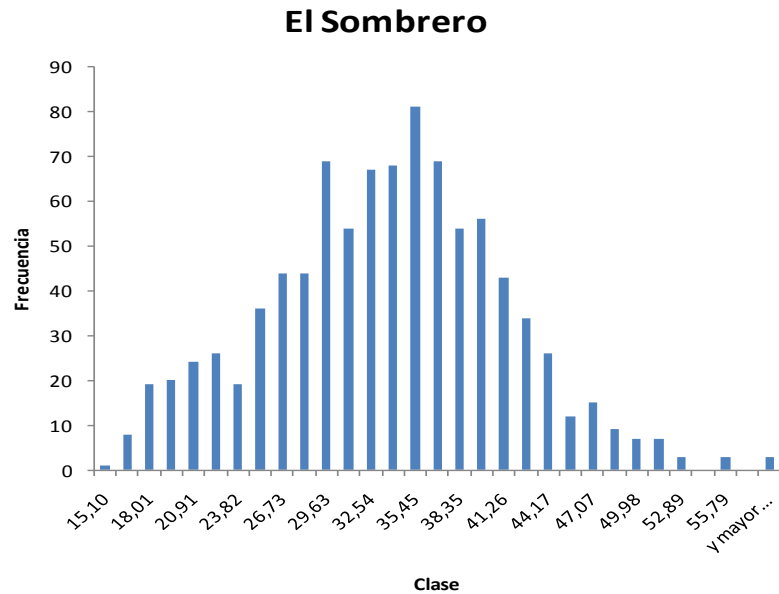


Fig. 8. Distribución de Frecuencias de Conductividad Eléctrica aparente - El Sombrero

A partir de la información obtenida en los Histogramas, se realizaron los semivariogramas empíricos (representación de los puntos obtenidos) para cada localidad bajo estudio. Posteriormente se les ajustó el modelo matemático correspondiente. Este paso es fundamental para la realización de los mapas de CEa; ya que cuanto más preciso sea el ajuste del modelo también lo serán las estimaciones de la CEa en los lugares donde no hay datos y, consecuentemente el mapa generado.

4.1.1.- Mercedes

Para la Localidad de Mercedes el modelo matemático que obtuvo el menor Cuadrado Medio del Error (CME) fue el *esférico*. Este modelo tiene un comportamiento lineal a distancias de separación pequeñas cerca del origen, pero se va aplanando a mayores distancias. Inmediatamente sobrepasa el umbral el modelo se hace cero, hecho que indica que la covarianza sería nula a partir de esa distancia (Vieira et al., 2002) (Fig. 9).

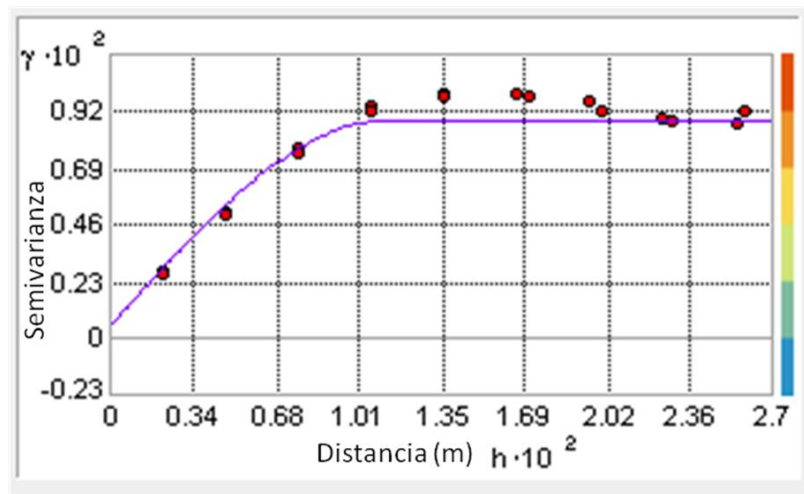


Fig. 9. Semivariograma experimental y ajuste de modelo esférico para la variable Conductividad Eléctrica aparente - Mercedes (0-90 cm)

El efecto pepita representa el valor de la variación en microescala, que para esta localidad, tuvo un valor de 4,6. La estabilidad de la la semivarianza se alcanzó con un umbral de 83,47; mientras que la autocorrelación espacial de la CEa (alcance) ocurre hasta una distancia de 110,13 metros (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros de ajuste del Semivariograma para la Conductividad Eléctrica aparente del suelo - Mercedes

| Localidad | Modelo | Efecto pepita | Umbral | alcance (m) |
|-----------|----------|---------------|--------|-------------|
| Mercedes | Esférico | 4,6 | 83,47 | 110,13 |

A partir de estos datos se confeccionó el mapa de distribución espacial de la CEa por krigging ordinario (Fig. 10).

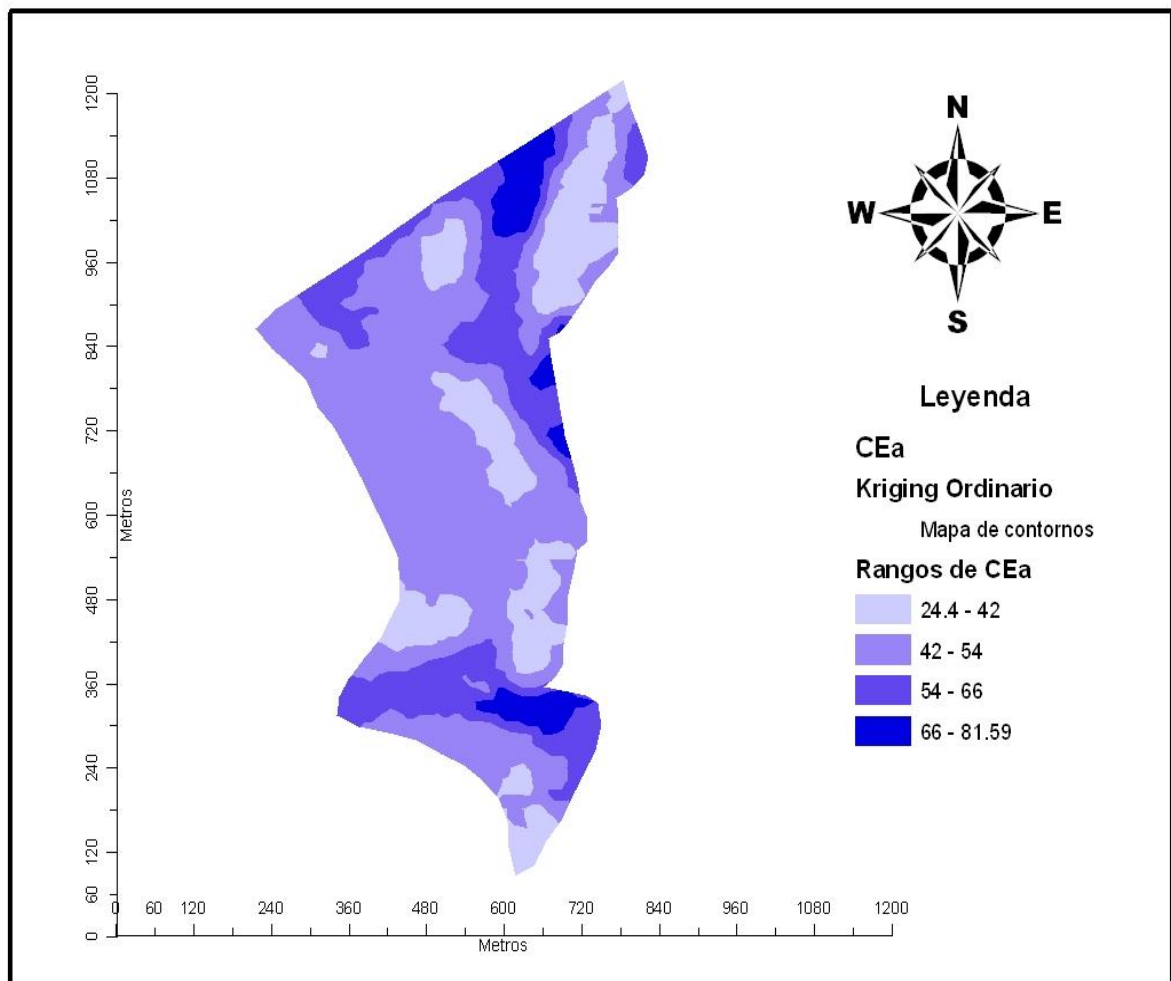


Fig. 10. Mapa de distribución espacial de la Conductividad Eléctrica aparente (dS m^{-1}) – Mercedes (0-90 cm)

En el mapa de distribución espacial el programa determinó cuatro rangos de CEa. Como es muy pequeña la superficie que ocupa el rango más alto de CEa en el terreno ($66 - 81,59 \text{ dS m}^{-1}$), el mismo fue incluido dentro de la categoría anterior, quedando así solamente tres rangos de CEa sobre los cuales trabajar (Tabla 3).

Tabla 3. Rangos de Conductividad Eléctrica aparente en Mercedes 0-90 cm

| Rangos de CEa | Valor (dS.m^{-1}) |
|---------------|------------------------------|
| Bajo | 29 – 42 |
| Medio | 43 – 54 |
| Alto | Mayor 54 |

4.1.2.- Perugorría

Para la Localidad de Perugorría el modelo matemático para los datos de CEa que obtuvo el menor Cuadrado Medio del Error (CME) también fue el esférico (Fig. 11).

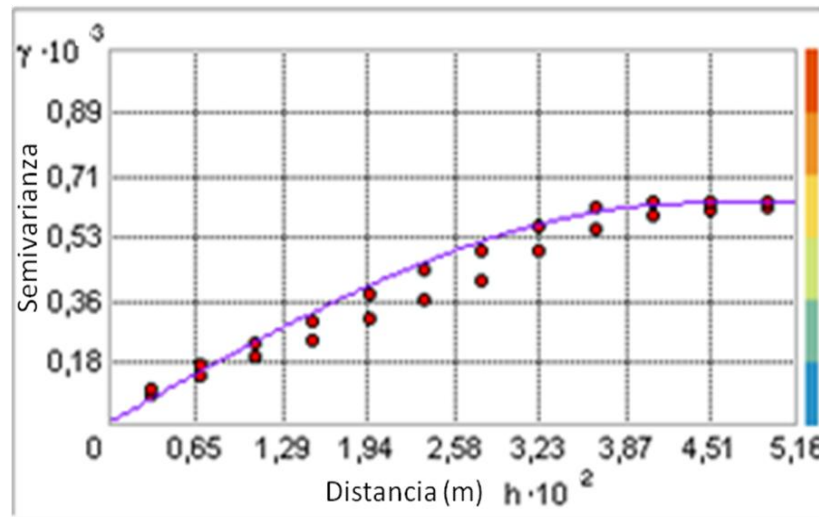


Fig. 11. Semivariograma experimental y ajuste de modelo teórico esférico para la variable Conductividad Eléctrica aparente - Perugorría (0-90 cm)

La variación en microescala (efecto pepita) tomó un valor de 6,27, la estabilidad de la semivarianza se alcanzó con un umbral de 624,36; mientras que la autocorrelación espacial de la CEa (alcance) ocurre hasta una distancia de 359,28 metros (Tabla 4).

Tabla 4. Parámetros de ajuste del Semivariograma para la Conductividad Eléctrica aparente del suelo - Perugorría

| Localidad | Modelo | Efecto pepita | Umbral | alcance (m) |
|------------|----------|---------------|--------|-------------|
| Perugorría | Esférico | 6,27 | 624,36 | 359,28 |

En la Figura 12 se presenta el mapa de distribución espacial de CEa obtenido por krigging ordinario para Perugorría con sus respectivos rangos (Tabla 5). Para esta localidad se tomo en cuenta el mismo criterio que Mercedes, dada la poca superficie en el terreno que ocupaba el mayor rango de CEa, el mismo fue incluido dentro de la categoría inmediatamente anterior.

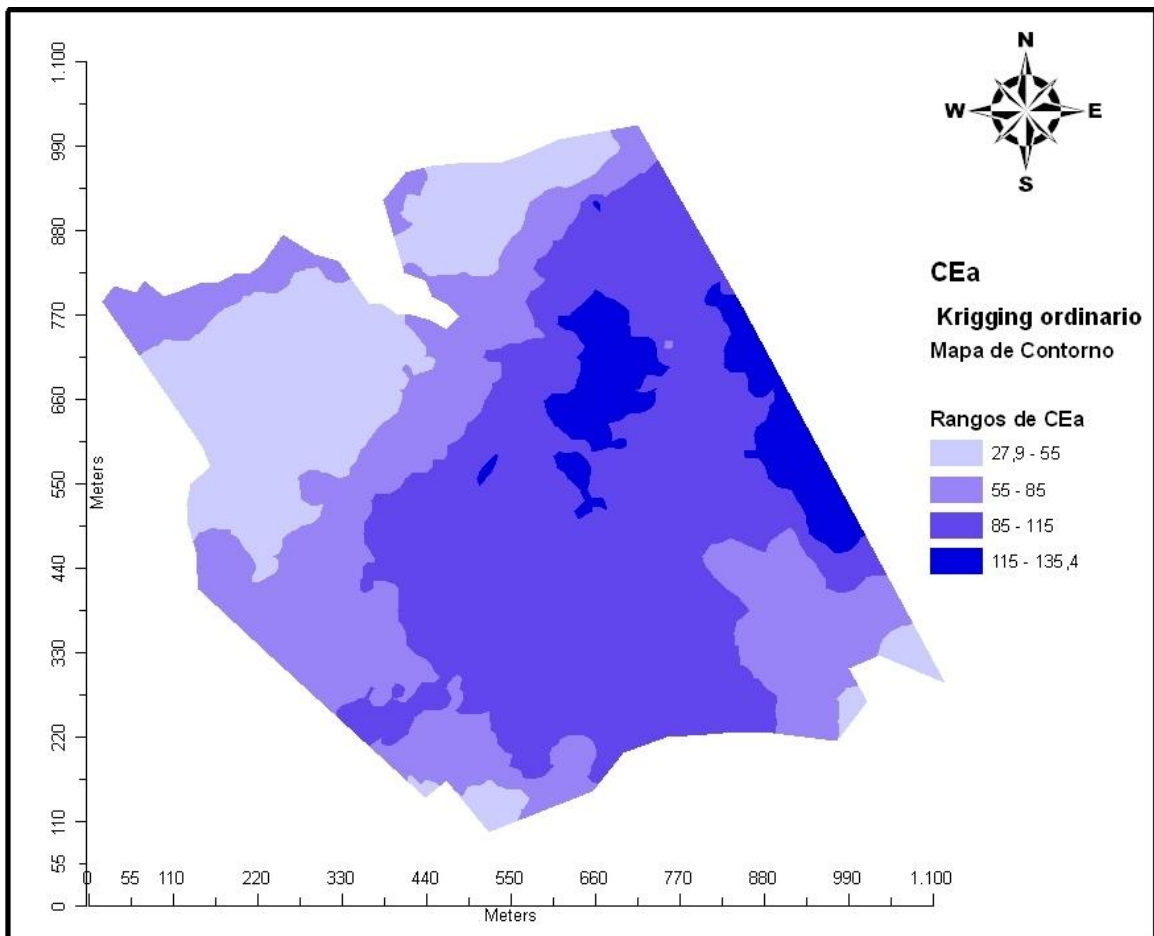


Fig. 12. Mapa de distribución espacial de la Conductividad Eléctrica aparente (dS.m^{-1}) - Perugorria (0-90 cm)

Tabla 5. Rangos de Conductividad Eléctrica aparente en Perugorria 0-90 cm.

| Rangos de CEa | Valor (dS.m^{-1}) |
|---------------|------------------------------|
| Bajo | 27,9 – 55 |
| Medio | 55 – 85 |
| Alto | Mayor 85 |

4.1.3.- El Sombrero

Los datos del semivariograma experimental de esta localidad obtuvieron el menor Cuadrado Medio del Error (CME) con un modelo *gaussiano* (Fig. 13). Este

modelo tiende a alcanzar la meseta asintóticamente, y el alcance se define como la distancia a la cual el semivariograma alcanza el 95% de la meseta (Vieira et al., 2002).

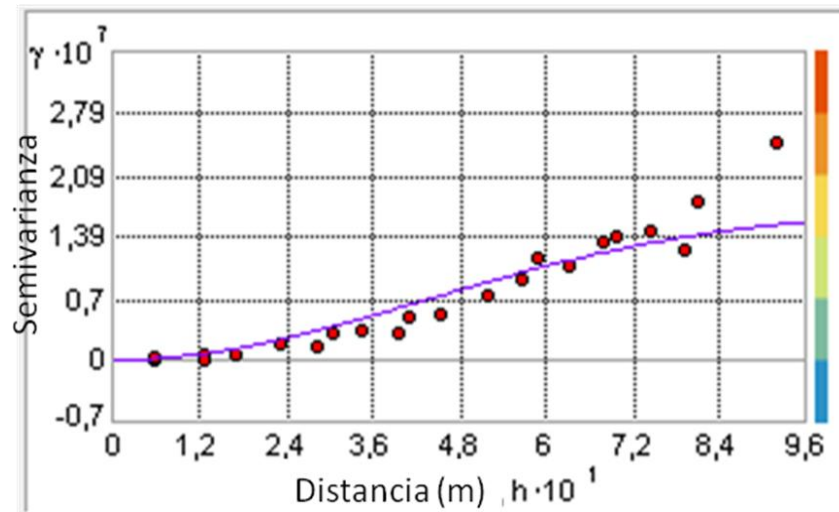


Fig. 13. Semivariograma experimental y ajuste de modelo teórico gaussiano para la variable Conductividad Eléctrica aparente - El Sombrero (0-90 cm)

Este modelo no posee efecto pepita; la semivarianza se estabiliza en un umbral de $1,69 \times 10^7$ mientras que la autocorrelación de esta variable llega a los 95,2 metros (Tabla 6).

Tabla 6. Parámetros de ajuste del Semivariograma para la Conductividad Eléctrica aparente del suelo - El Sombrero

| Localidad | Modelo | Efecto pepita | Umbral | alcance (m) |
|-------------|-----------|---------------|--------------------|-------------|
| El sombrero | Gaussiano | 0 | $1,69 \times 10^7$ | 95,2 |

En la Fig. 14 se presenta el mapa de distribución espacial obtenido para esta localidad con la identificación de sus respectivos rangos (Tabla 7).

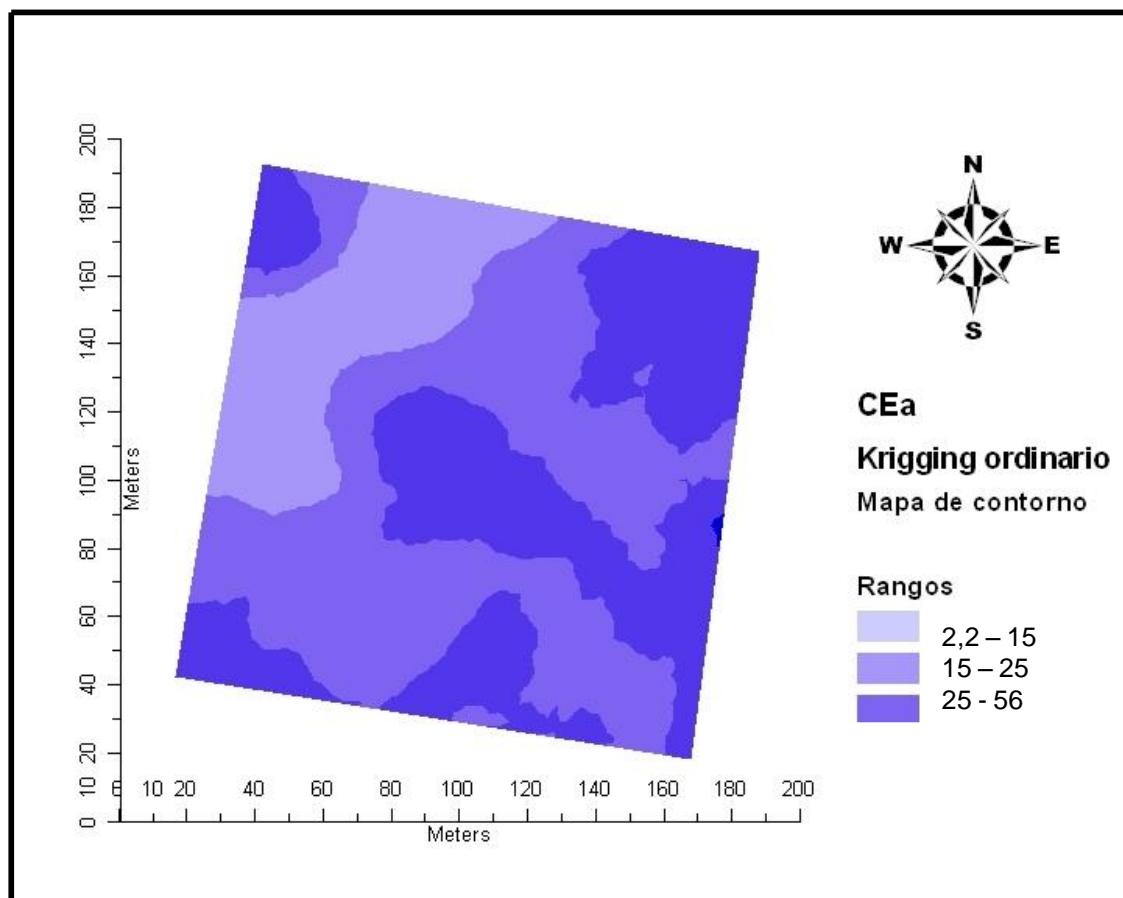


Fig. 14. Mapa de distribución espacial de la Conductividad Eléctrica aparente (dS.m^{-1}) - El sombrero (0-90 cm)

Tabla 7. Rangos de Conductividad Eléctrica aparente en El sombrero 0-90 cm.

| Rangos de CEa | Valor (dS.m^{-1}) |
|---------------|------------------------------|
| Bajo | 2,2 – 15 |
| Medio | 15 – 25 |
| Alto | Mayor 25 |

En los tres mapas obtenidos se puede observar que existe variabilidad espacial en los lotes analizados y que a su vez ésta tiene una distribución heterogénea. Pudo comprobarse que dentro de una vecindad en el espacio, la CEa tiene una fuerte probabilidad de ser similar (variable regionalizada y dependencia espacial), y que esta probabilidad disminuye respecto a valores de una vecindad separados por una distancia mínima de 100 metros dependiendo del lote. Gracias a esta comprobación se pudieron especificar tres categorías diferentes para esta variable (Alto-Medio-Bajo) en cada una de las localidades estudiadas. Las mismas están dispuestas en grandes

zonas homogéneas aplicables por el productor, lo que impulsa la idea de comenzar con un estudio de manejo sitio específico en cada una de ellas.

4.2.- Variabilidad espacial de las Propiedades de suelo medidas

Las Tablas 8, 9 y 10 proveen información sobre el número de muestras extraídas (n), valor medio, mínimo y máximo de los parámetros de suelo analizados para 0-30; 30-60; 60-90 y 0-90 cm.

4.2.1.- Mercedes

En la Fig. 15 se presenta el mapa de contorno CEa con los puntos donde se tomaron las muestras de suelo.

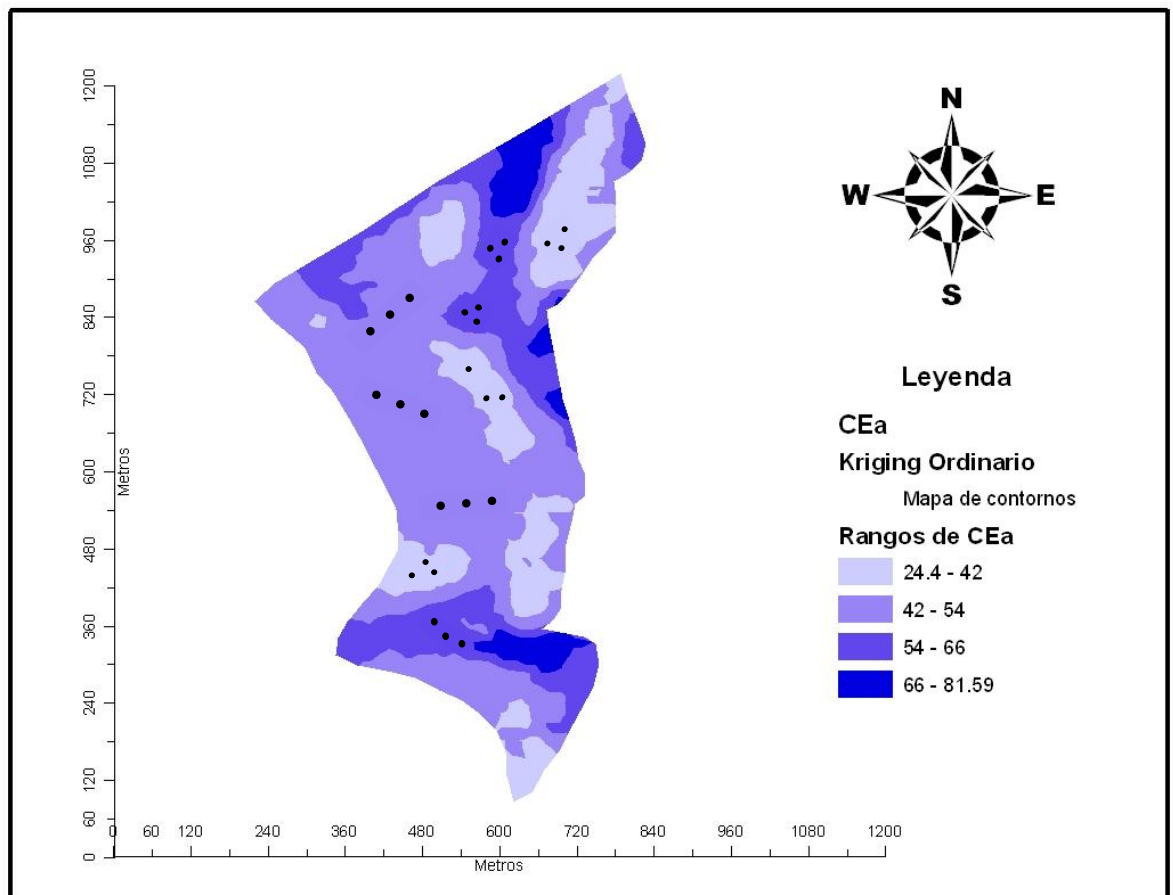


Fig. 15. Puntos de muestreo de suelo - Mercedes

El contenido de Humedad del suelo se mantuvo estable en las tres profundidades de medición del perfil, sin embargo fue uno de los parámetros que presentó mayor CV (%), con valores de 68% en el estrato de 60-90 cm. En el caso de pH y CEE los valores medios presentaron poca variación conforme aumentaba la profundidad de muestreo, y a su vez tuvieron bajos CV (%).

El contenido de P del suelo disminuyó en profundidad. Este nutriente es de vital importancia para la producción agropecuaria por las funciones que cumple en el crecimiento de las plantas y toma mayor relevancia en la provincia por la baja concentración natural del mismo en los suelos (3 a 4 ppm). Los mayores valores hallados en superficie de este macronutriente se deben a una acumulación del mismo por reiteradas fertilizaciones junto con la semilla. En general presentó poca variabilidad entre los estratos estudiados.

El contenido de MO se encuentra estratificado en el perfil, hallándose los mayores contenidos de la misma en superficie dada la continua acumulación de restos vegetales tras las cosechas, a su vez tuvo un bajos CV (%).

Tanto los valores de Ca como los de Mg aumentan conforme aumenta la profundidad de muestreo del suelo. El Mg presentó los mayores CV con valores entre 50 y 97 %. El potasio es uno de los macronutrientes esenciales más importantes que permiten el funcionamiento de sistemas agropecuarios. Si bien en gran parte de los suelos de la Región Pampeana su disponibilidad edáfica aún no es limitante; en zonas tropicales y subtropicales como Corrientes el agregado de K a través del uso de fertilizantes es una práctica cotidiana. Esto hace que sea un nutriente básico a la hora de realizar una planificación de manejo sitio específico en esta zona. En este trabajo, este nutriente presentó concentraciones bajas en todos los estratos medidos.

La SB presentó bajo nivel de variación en el suelo al igual que la textura del mismo (Tabla 8).

Tabla 8. Parámetros estadísticos para las variables físico-químicas de suelo medidas – Mercedes

| Profundidad 0-30 cm | | | | | | |
|----------------------|--------------------|----|-------|------|-------|-------|
| Variable | | n | Media | Mín | Máx | CV |
| Humedad | % | 27 | 9,62 | 4,2 | 22,5 | 49,53 |
| pH | | 27 | 5,34 | 5,07 | 6,2 | 3,81 |
| CE e | mmho cm-1 | 27 | 0,11 | 0,05 | 0,19 | 24,43 |
| P | ppm | 27 | 10,47 | 6,77 | 15,88 | 25,31 |
| MO | % | 27 | 2,36 | 1,88 | 3,45 | 14,73 |
| Ca | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 4,77 | 3,5 | 6,5 | 19,18 |
| Mg | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,91 | 0,2 | 4,8 | 97,42 |
| K | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,48 | 0,37 | 0,68 | 18,21 |
| Na | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,06 | 0,04 | 0,08 | 19,34 |
| SB | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 6,03 | 4,26 | 8,56 | 17,99 |
| Profundidad 30-60 cm | | | | | | |
| Humedad | % | 27 | 9,83 | 4,4 | 21,8 | 45,14 |
| pH | | 27 | 5,95 | 5,62 | 6,33 | 2,85 |
| CE e | mmho cm-1 | 27 | 0,04 | 0,03 | 0,06 | 24,58 |
| P | ppm | 27 | 4,35 | 2,65 | 8,67 | 31,47 |
| MO | % | 27 | 1,6 | 1,06 | 2,71 | 22,38 |
| Ca | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 6,87 | 4,9 | 9 | 15,4 |
| Mg | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 1,81 | 0,2 | 4,8 | 67,72 |
| K | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,51 | 0,39 | 0,72 | 17,73 |
| Na | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,06 | 0,03 | 0,09 | 26,15 |
| SB | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 9,24 | 6,25 | 14,36 | 21,74 |
| Profundidad 60-90 cm | | | | | | |
| Humedad | % | 27 | 9,03 | 3,1 | 34,3 | 68,87 |
| pH | | 27 | 6,65 | 5,65 | 7,37 | 6,25 |
| CE e | mmho cm-1 | 27 | 0,05 | 0,03 | 0,07 | 29,37 |
| P | ppm | 27 | 3,41 | 1,71 | 6,39 | 31,26 |
| MO | % | 27 | 0,95 | 0,52 | 1,84 | 28,9 |
| Ca | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 8,3 | 4,3 | 11,6 | 21,81 |
| Mg | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 2,38 | 0,3 | 5,7 | 60,88 |
| K | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,53 | 0,43 | 0,75 | 15,02 |
| Na | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,08 | 0,05 | 0,12 | 26,04 |
| SB | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 11,21 | 7,89 | 15,17 | 18,46 |
| Profundidad 0-90 cm | | | | | | |
| Humedad | % | 27 | 9,5 | 5,6 | 18,2 | 33,45 |
| pH | | 27 | 5,98 | 5,45 | 6,63 | 21,34 |
| CE e | mmho cm-1 | 27 | 3,21 | 1,9 | 6,1 | 32,93 |
| P | ppm | 27 | 6,08 | 4,15 | 9,46 | 17,6 |
| MO | % | 27 | 1,63 | 1,25 | 2,67 | 18,29 |
| Ca | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 6,64 | 4,83 | 8,93 | 16,47 |
| Mg | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 1,7 | 0,43 | 4,37 | 52,42 |
| K | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,51 | 0,44 | 0,64 | 10,26 |
| Na | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,07 | 0,04 | 0,09 | 21,85 |
| SB | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 8,83 | 6,49 | 11,59 | 18,14 |
| Arcilla | % | 27 | 29,73 | 20,5 | 41,7 | 18,86 |
| Arena | % | 27 | 33,76 | 18 | 49,3 | 28,48 |
| Limo | % | 27 | 36,51 | 19,8 | 46,9 | 15,83 |
| Rendimiento | Kg ha-1 | 27 | 4227 | 2389 | 7615 | 31,87 |

n: número de medidas; Mín: Valor mínimo; Máx: Valor máximo; CV: Coeficiente de Variación (%); Conductividad eléctrica medida en laboratorio (CEe); fósforo (P); Materia Orgánica (MO); Suma de Bases (SB).

4.2.2.- Perugorría

La Fig. 16 presenta los puntos de muestreo de suelo para la localidad de Perugorría.

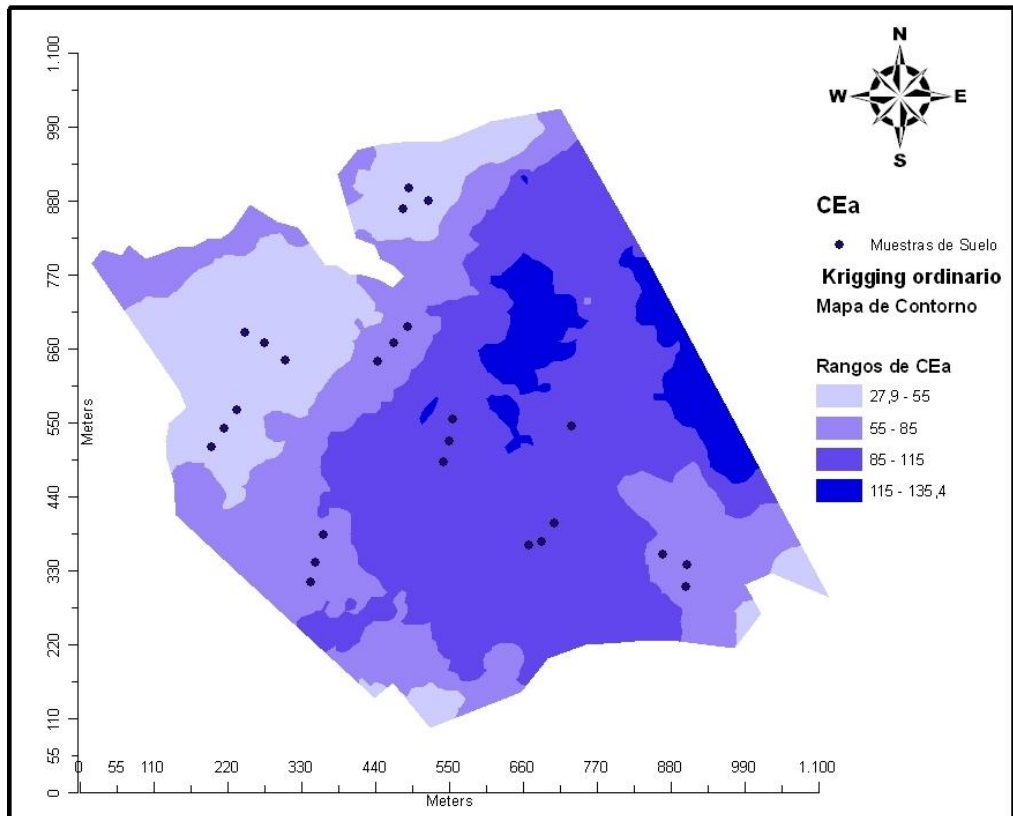


Fig. 16. Puntos de muestreo de suelo – Perugorría

Los resultados de Estadística Descriptiva para estas variables indicaron que el contenido de Mg del suelo resultó ser el parámetro con mayor CV en los primeros 0-60 cm con valores de 63 %. La CEA presentó valores estables a través de los estratos de medición, sin embargo el CV fue en aumento con la profundidad de muestreo con valores que van de 43 a 68% (Tabla 9).

Tabla 9. Parámetros estadísticos para las variables físico-químicas de suelo medidas - Perugorria

| Profundidad 0-30 cm | | | | | | |
|----------------------|--------------------|----|-------|------|-------|-------|
| Variable | | n | Media | Mín | Máx | CV |
| Humedad | % | 25 | 9,1 | 4,1 | 17,4 | 39,88 |
| pH | | 25 | 5,43 | 5,1 | 5,8 | 3,61 |
| CE e | mmho cm-1 | 25 | 0,12 | 0,05 | 0,23 | 43,85 |
| P | ppm | 25 | 9,9 | 3,19 | 16,7 | 37,02 |
| MO | % | 25 | 3,14 | 2,37 | 4,25 | 16,1 |
| Ca | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 6,64 | 5 | 10,3 | 19,8 |
| Mg | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 1,16 | 0,3 | 2,7 | 61,17 |
| K | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 0,1 | 0,07 | 0,14 | 23,48 |
| Na | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 0,32 | 0,13 | 0,67 | 50,43 |
| SB | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 8,2 | 5,8 | 11,87 | 20,34 |
| Profundidad 30-60 cm | | | | | | |
| Humedad | % | 25 | 9,56 | 4,9 | 19,4 | 39,19 |
| pH | | 25 | 6,01 | 5,7 | 6,4 | 3,34 |
| CE e | mmho cm-1 | 25 | 0,09 | 0,04 | 0,18 | 49,24 |
| P | ppm | 25 | 3,15 | 1,71 | 6,3 | 36,27 |
| MO | % | 25 | 1,57 | 1,15 | 2 | 14,73 |
| Ca | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 8,54 | 6 | 14,3 | 24,73 |
| Mg | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 2,07 | 0,4 | 4,6 | 64,78 |
| K | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 0,12 | 0,07 | 0,16 | 21,12 |
| Na | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 0,4 | 0,2 | 0,75 | 40,03 |
| SB | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 11,12 | 7,54 | 16,06 | 21,23 |
| Profundidad 60-90 cm | | | | | | |
| Humedad | % | 25 | 8,14 | 4,9 | 13,7 | 30,67 |
| pH | | 25 | 6,7 | 6 | 7,8 | 8,01 |
| CE e | mmho cm-1 | 25 | 0,14 | 0,04 | 0,32 | 67,97 |
| P | ppm | 25 | 2,94 | 1,25 | 5,7 | 39,14 |
| MO | % | 25 | 1,07 | 0,81 | 1,9 | 24,43 |
| Ca | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 11,25 | 6,3 | 18 | 31,08 |
| Mg | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 2,08 | 0,6 | 3,9 | 39,1 |
| K | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 0,13 | 0,09 | 0,17 | 17,23 |
| Na | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 0,46 | 0,21 | 0,78 | 32,95 |
| SB | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 13,93 | 8,91 | 20,74 | 25,94 |
| Profundidad 0-90 cm | | | | | | |
| Humedad | % | 25 | 8,93 | 6,1 | 15,4 | 22,73 |
| pH | | 25 | 6,05 | 5,7 | 6,6 | 4,27 |
| CE e | mmho cm-1 | 25 | 0,12 | 0,06 | 0,24 | 50,74 |
| P | ppm | 25 | 5,33 | 2,39 | 8 | 27,56 |
| MO | % | 25 | 1,93 | 1,54 | 2,45 | 14,19 |
| Ca | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 8,81 | 6,47 | 13,53 | 23,94 |
| Mg | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 1,77 | 0,6 | 3 | 39,28 |
| K | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 0,12 | 0,08 | 0,15 | 15,93 |
| Na | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 0,39 | 0,18 | 0,73 | 38,37 |
| SB | meq 100 gr suelo-1 | 25 | 11,08 | 7,65 | 15,97 | 22,1 |
| Arcilla | % | 25 | 28,99 | 22,9 | 36,5 | 14,92 |
| Arena | % | 25 | 47,05 | 38,7 | 60,4 | 16,28 |
| Limo | % | 25 | 23,96 | 14,6 | 32,3 | 19,24 |
| Rendimiento | Kg ha-1 | 25 | 6080 | 4451 | 8386 | 15,28 |

n: número de medidas; Mín: Valor mínimo; Máx: Valor máximo; CV: Coeficiente de Variación (%); Conductividad eléctrica medida en laboratorio (CEe); fósforo (P); Materia Orgánica (MO); Suma de Bases (SB).

4.2.3- El Sombrero

La Fig. 17 muestra los puntos de muestreo de muestreo de suelo para El Sombrero en cada uno de los rangos de CEa estudiados.

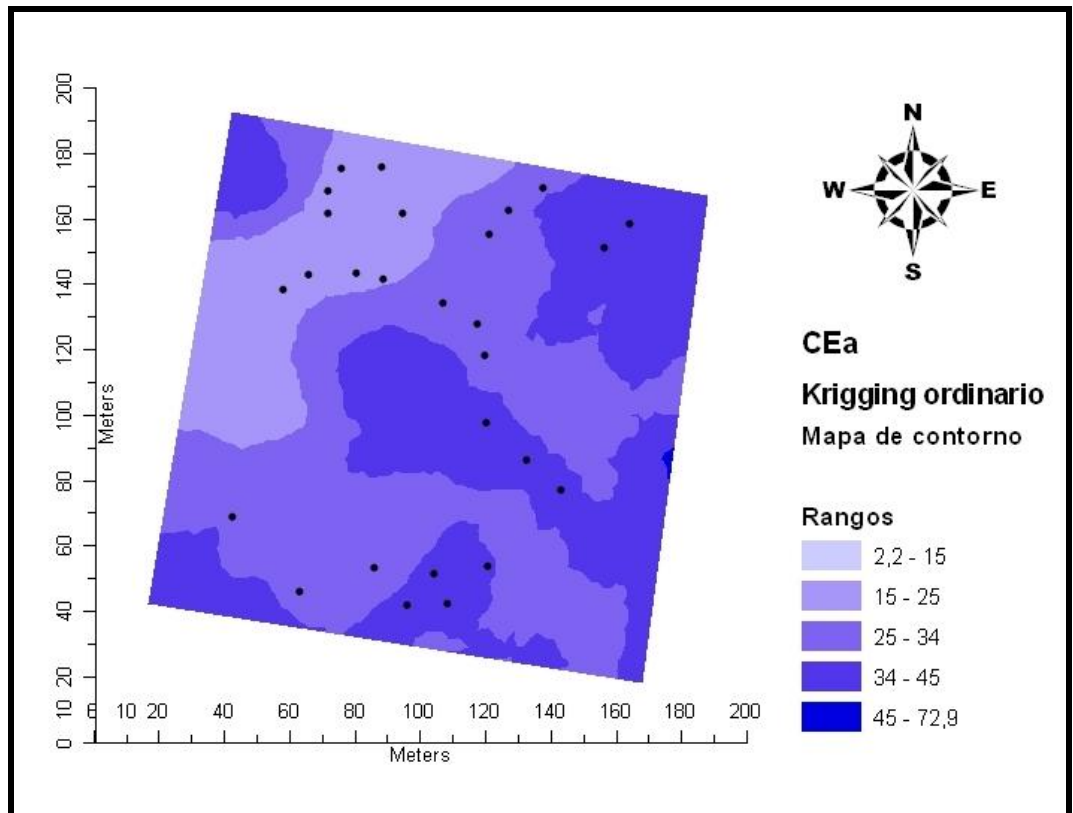


Fig.17. Puntos de muestreo de suelo - El Sombrero

En el caso de El Sombrero, los parámetros en general tuvieron bajo CV (%), salvo el contenido de Mg del suelo que nuevamente presentó altos CV en los estratos de 0-60 cm (Tabla 10).

Tabla 10. Parámetros estadísticos para las variables físico-químicas de suelo medidas – El Sombrero

| Profundidad 0-30 cm | | | | | | |
|----------------------|--------------------|----|---------|------|-------|-------|
| Variable | | n | Media | Mín | Máx | CV |
| Humedad | % | 27 | 8,67 | 4,5 | 14,40 | 25,17 |
| pH | | 27 | 6,01 | 5,27 | 6,59 | 5,96 |
| CE e | mmho cm-1 | 27 | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 21,66 |
| P | ppm | 27 | 6,9 | 2,5 | 12 | 39,94 |
| MO | % | 27 | 1,57 | 1,06 | 2,07 | 17,2 |
| Ca | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 2,66 | 1,6 | 5,40 | 32,57 |
| Mg | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,78 | 0,2 | 1,8 | 57,98 |
| K | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,07 | 0,03 | 0,1 | 22,52 |
| Na | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,49 | 0,21 | 0,74 | 27,84 |
| SB | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 4 | 2,54 | 7,12 | 27,66 |
| Profundidad 30-60 cm | | | | | | |
| Humedad | % | 27 | 7,52 | 1,7 | 11,2 | 31 |
| pH | | 27 | 6,49 | 5,62 | 7,51 | 5,53 |
| CE e | mmho cm-1 | 27 | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 34,59 |
| P | ppm | 27 | 3,74 | 1,1 | 7 | 42,01 |
| MO | % | 27 | 1,17 | 0,39 | 1,49 | 22,7 |
| Ca | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 5,91 | 4,2 | 8 | 13,03 |
| Mg | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 1,51 | 0,1 | 3,4 | 53,81 |
| K | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,11 | 0,05 | 0,15 | 21,18 |
| Na | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,6 | 0,23 | 0,98 | 30,29 |
| SB | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 8,14 | 5,42 | 10,32 | 15,41 |
| Profundidad 60-90 cm | | | | | | |
| Humedad | % | 27 | 7,21 | 3,6 | 10,2 | 26,51 |
| pH | | 27 | 7,24 | 6,27 | 7,8 | 4,39 |
| CE e | mmho cm-1 | 27 | 0,06 | 0,02 | 0,2 | 69,1 |
| P | ppm | 27 | 3,87 | 0,4 | 6,4 | 38,47 |
| MO | % | 27 | 0,71 | 0,49 | 1 | 21,17 |
| Ca | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 6,49 | 4,9 | 8,6 | 15,41 |
| Mg | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 3,06 | 0,1 | 5,6 | 39,03 |
| K | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,15 | 0,04 | 0,22 | 25,29 |
| Na | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,68 | 0,17 | 1,06 | 32,41 |
| SB | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 10,37 | 7,16 | 12,34 | 11,09 |
| Profundidad 0-90 cm | | | | | | |
| Humedad | % | 27 | 7,8 | 5,3 | 10,4 | 17,1 |
| pH | | 27 | 6,59 | 5,8 | 7,1 | 4,55 |
| CE e | mmho cm-1 | 27 | 0,04 | 0,02 | 0,09 | 37,34 |
| P | ppm | 27 | 4,84 | 2,1 | 7,74 | 33,74 |
| MO | % | 27 | 1,15 | 0,83 | 1,39 | 13,85 |
| Ca | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 5,02 | 3,6 | 6,5 | 10,3 |
| Mg | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 1,79 | 0,8 | 2,8 | 27,58 |
| K | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,11 | 0,05 | 0,14 | 19,98 |
| Na | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 0,59 | 0,24 | 0,86 | 26,58 |
| SB | meq 100 gr suelo-1 | 27 | 7,5 | 6,06 | 8,85 | 9,81 |
| Arcilla | % | 27 | 19,5 | 15,2 | 31,5 | 19,81 |
| Arena | % | 27 | 58,13 | 49 | 64 | 7,68 |
| Limo | % | 27 | 22,37 | 17,7 | 29,2 | 12,06 |
| Rendimiento | Kg ha-1 | 27 | 3953,11 | 2757 | 5940 | 19,95 |

n: número de medidas; Mín: Valor mínimo; Máx: Valor máximo; CV: Coeficiente de Variación (%); Conductividad eléctrica medida en laboratorio (CEe); fósforo (P); Materia Orgánica (MO); Suma de Bases (SB).

4.3.- Correlaciones entre Parámetros de suelo medidos y CEa para las tres

Localidades de trabajo

4.3.1- Relación entre CEa y Textura

La distribución del tamaño de partículas en el perfil del suelo es un importante factor que contribuye a la medición de la CEa (Sudduth *et al.*, 2003; 2005). Para la localidad de Mercedes, la relación existente entre CEa y la fracción gruesa del suelo fue negativa con $r = -0,93$ ($p < 0,0001$), sucediendo lo mismo en Perugorría donde el valor de correlación fue de $r = -0,88$ ($p < 0,0001$). En cambio se hallaron relaciones positivas entre CEa y arcilla (%), limo (%) y la suma de los dos componentes Arcilla+Limo (%) para ambas localidades mencionadas anteriormente. Para Mercedes, los valores de correlación fueron $r = 0,75$ ($p < 0,0001$), $r = 0,81$ ($p < 0,0001$) y $r = 0,93$ ($p < 0,0001$) respectivamente, a su vez puede observarse que al sumar ambas fracciones finas del suelo, el coeficiente de correlación aumenta. En el caso de Perugorría la relación entre CEa y arcilla (%) fue de $r = 0,93$ ($p < 0,0001$), CEa y limo (%) fue de $r = 0,58$ ($p = 0,0022$) y CEa y arena (%) fue negativa con un valor de $r = -0,87$ ($p < 0,0001$). Para la localidad de El Sombrero, no se hallaron correlaciones significativas entre CEa y textura de suelo (Tabla 11).

Tabla 11. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Textura de suelo

| Localidad | Parámetro medido | r | valor p |
|------------------|-------------------------|--------------|-------------------|
| Mercedes | Arcilla (%) | 0,75 | <0,0001 |
| | Arena (%) | -0,93 | <0,0001 |
| | Limo (%) | 0,81 | <0,0001 |
| | Arcilla+Limo (%) | 0,93 | <0,0001 |
| Peruggorría | Arcilla (%) | 0,93 | <0,0001 |
| | Arena (%) | -0,87 | <0,0001 |
| | Limo (%) | 0,58 | 0,0022 |
| | Arcilla+Limo (%) | 0,87 | <0,0001 |
| El Sombrero | Arcilla (%) | 0,21 | NS |
| | Arena (%) | -0,31 | NS |
| | Limo (%) | 0,21 | NS |
| | Arcilla+Limo (%) | 0,31 | NS |

Estos resultados muestran la asociación positiva de la CEa con las partículas más finas de suelo, y concuerdan con lo hallado por Johnson *et al.* (2001) quien también halló una correlación positiva entre CEa y porcentaje de arcilla en los primeros 30 cm de suelo, pero con valores de correlación menores que los encontrados en este trabajo ($r = 0,50$; $p = 0,001$) sin hallar correlación significativa entre CEa y arena, dado que el contenido de la misma fue uniforme a través del lote. Banton *et al.* (1997) obtuvo coeficientes de correlación para CEa y contenido de arcilla de $r = 0,54-0,64$ para suelos en Quebec, lo que coincide con lo expresado por McBride *et al.* (1990) y Jaynes *et al.* (1995).

Jung *et al.* (2005) y Mueller *et al.* (2003) también hallaron correlaciones positivas y significativas con el contenido de arcilla, con valores de $r = 0,70$ ($p = 0,001$) en el estrato de 15-30 cm para el primer autor y $r = 0,58$ a $0,86$ ($p = 0,01$) para el segundo en 4 localidades y dos fechas de medición en cada una. En contraste, ambos

tuvieron correlaciones negativas entre la CEa y el contenido de limo del suelo con valores de $r = -0,74$ ($p = 0,001$) y $r = -0,70$ a $-0,90$ respectivamente.

Hanquet *et al.* (2002) realizaron un ensayo midiendo en tres fechas consecutivas; bajo estas condiciones, hallaron una correlación positiva entre CEa y contenido de arcilla $r = 0,74; 0,85; 0,79$ ($p \leq 0,05$) y correlaciones negativas entre contenido de limo $r = -0,55; -0,70; -0,61$ ($p \leq 0,05$) y arena $r = -0,68; -0,70; -0,70$ ($p \leq 0,05$). Bronson *et al.* (2005) explicó que el contenido de arcilla estuvo positivamente correlacionado con CEa en tres de los sitios estudiados ($r^2 = 0,63 - 0,89$) y negativamente en uno de ellos ($r^2 = -0,38$ a $-0,56$).

Lilienthal *et al.* (2005) Realizó un ensayo con el objetivo de verificar la correlación entre CEa y textura del suelo en dos lotes de Alemania. Obtuvo relaciones significativas con las tres fracciones que componen la textura del suelo: arcilla ($r = 0,92$), limo ($r = 0,94$) y arena ($r = -0,93$) con un $p \leq 0,01$. Morari *et al.* (2009) Mostró correlaciones negativas sobre un suelo franco arcilloso entre CEa 0-30 cm y los componentes de textura gruesa del suelo: gravilla $r = -0,50$ y arena $r = -0,56$ ($p \leq 0,05$), no así con los componentes finos: limo $r = 0,69$ y arcilla $r = 0,67$ ($p \leq 0,05$) del mismo. Corwin and Lesch (2005) y Vitharana *et al.* (2008) reportaron resultados similares en lo que respecta a textura del suelo.

Carroll and Oliver (2005) examinaron las relaciones entre CEa y las propiedades físicas superficiales (0-15 cm) y sub-superficiales (30-60 cm) de dos campos arables al sur de Inglaterra: Crowmarsh y Yattendon. Para el primer sitio, las mayores correlaciones con CEa alcanzaron valores de $r = 0,70$, e hicieron referencia a contenido superficial de arena, limo (superficial y sub-superficial) y contenido volumétrico de agua en primavera. Para el caso de arena (sub-superficial), arcilla (superficial), contenido volumétrico de agua (en otoño) las correlaciones fueron moderadas ($r = 0,40$ a $0,70$). Para Yattendon, resultó significativa la relación entre CEa y contenidos sub-superficiales de arena ($r = -0,80$) y arcilla ($r = 0,82$).

Auerswald *et al.* (2001) trabajó en una regresión múltiple, investigando la relación entre CEa - contenido de arcilla y CEE - contenido de agua. Estas variables influenciaron en una proporción de 1 : 0,8 : 0,4 los datos de CEa. Esta regresión explicó el 84% de la variación en el set de datos de 145 combinaciones de suelo-humedad.

Kachanoski *et al.* (1988), examinaron suelos con baja concentración de electrolitos disueltos en Ontario, encontraron valores superiores de correlación entre

CEa y contenido hídrico del suelo ($r = 0,88$ a $0,94$) con respecto a CEa y contenido de arcilla ($r = 0,50$ a $0,70$).

Sudduth *et al.* (2003) halló correlaciones altas y persistentes a través de dos lotes ubicados en Missouri e Illinois para CEa 0-90 cm y contenido de arcilla con valores de $r = 0,70$ y $0,73$ respectivamente ($p \leq 0,05$). Resultados similares fueron obtenidos por Williams and Hoey (1987) con valores de regresión lineal entre CEa y contenido de arcilla ($r^2 = 0,73$) en suelos salinos de New South Wales ($n=210$).

Corwin *et al.* (2003a) Estudiaron la relación entre CEa y % arcilla del suelo (0-15 cm) en un cultivo de algodón, hallando relaciones significativas entre ambas propiedades de suelo con valores de $r = 0,76$ ($p \leq 0,01$). Mertens *et al.* (2008) documentaron la CEa en 3 campos de Alemania, donde hallaron relaciones significativas entre CEa y porcentaje de arcilla que variaron entre $r^2 = 0,67$ y $0,76$ para mediciones de 0-1,5 m. En cambio la relación entre CEa y arena fue significativa para uno de los campos solamente con valores de $r^2 = -0,69$.

Molin and Nunes de Castro (2008) Investigaron la relación entre CEa (0-30 y 0-90 cm) y contenido de arena del suelo, hallando correlaciones negativas significativas con valores de $r = -0,86$ y $r = -0,79$ ($p \leq 0,05$) para CEa superficial y en profundidad respectivamente. Para arcilla estos valores también fueron significativos y oscilaron entre $r = 0,75$ y $r = 0,66$ ($p \leq 0,05$) para ambas CEa. Sudduth *et al.* (2005) Buscaron relaciones entre CEa y textura en 12 lotes pertenecientes a 6 estados del centro-norte de EEUU. Las correlaciones entre CEa - arcilla fueron generalmente las más altas y persistentes a través de todos los campos y rangos de CEa hallados en cada uno ($r = 0,55$; $p \leq 0,05$), mientras que contenido de limo tuvo una correlación de $r \geq 0,50$ ($p \leq 0,05$).

McCutcheon *et al.* (2006) Evaluó la utilidad de de los mapas de CEa como herramienta para sustituir los mapas de textura. Si bien los coeficientes de correlación fueron significativos al $p \leq 0,05$, los mismos fueron muy bajos en promedio ($r = -0,27$ para arena y $r = 0,26$ para arcilla y limo) no pudiendo la CEa ser predictora de ningún parámetro textural. Kühn *et al.* (2009) Midieron la CEa en 11 lotes del este de Alemania donde hallaron que la variación en la CEa del suelo puede ser explicada por el contenido de arcilla del lote $r = 0,45$ a $0,49$ ($p \leq 0,05$).

En este trabajo, la alta correlación hallada entre CEa y textura está avalada principalmente por la senda de conducción relacionada con la *Fase sólida* del suelo (Fig. 1), la cual hace referencia al contacto directo entre partículas. Para los suelos de

Mercedes y Perugorría, en promedio el contenido de Arcilla+Limo predomina sobre el de Arena para todos los rangos de CEa (Tabla 12). Esta mayor proporción de partículas finas, implica un mayor contacto entre las mismas (Rhoades *et al.*, 1976; Corwin and Lesch, 2003) y por lo tanto una mayor correlación con la CEa del suelo.

Para El Sombrero, ocurre una situación inversa a los dos campos anteriores. La relación contenido de Arena versus Arcilla+Limo, favorece a las partículas gruesas del mismo. Debido a la forma no esférica de las mismas y a un menor contacto entre sí; las mediciones de CEa resultan en una muy baja correlación con estas partículas (Friedman, 2005) o ausencia de la misma como ocurre en este trabajo (Tabla 12).

Tabla 12. Contenido de Arena, Arcilla+Limo para los tres rangos de Conductividad Eléctrica aparente y las tres Localidades de trabajo

| Rango de CEa/ | Bajo | | Medio | | Alto | |
|--------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|
| Localidad | % Arena | % Arcilla + Limo | % Arena | % Arcilla + Limo | % Arena | % Arcilla + Limo |
| Mercedes (prom) | 43,22 | 56,78 | 36,34 | 63,66 | 21,71 | 78,29 |
| Perugorría (prom) | 56,00 | 44,00 | 43,96 | 56,04 | 39,51 | 60,49 |
| El Sombrero (prom) | 59,13 | 40,87 | 60,09 | 39,91 | 55,16 | 44,84 |

4.3.2- Relación entre CEa y Humedad de Suelo

Otro componente que contribuye a la correlación entre CEa y partículas del suelo es la *Fase líquida*, la cual depende del contenido de agua volumétrico del mismo (Rhoades *et al.*, 1976; Kachanoski *et al.*, 1990; Jaynes *et al.*, 1995; Sudduth *et al.*, 1995; Morgan *et al.*, 2001 y Friedman, 2005). Esto a su vez se asocia al número y tamaño de poros y su tortuosidad (Jaynes, 1996) que son dos factores gobernados por diferencias texturales (Sheets and Hendricx, 1995).

Si bien las mediciones se realizaron con contenidos hídricos acordes a los requerimientos propuestos por Veris Technologies (2001), donde se recomienda un contenido mínimo de humedad (10% por encima del punto de marchitez permanente), los resultados hallados en este trabajo en general fueron muy dispares, y variaron con el lote en estudio. Para la localidad de Mercedes se halló una correlación positiva significativa para el estrato de 60-90 cm $r = 0,43$ ($p = 0,02$). En el caso de Perugorría las correlaciones halladas también fueron positivas y se dieron en los estratos de 60-90 y 0-90 cm con $r = 0,61$ ($p = 0,0013$) y $r = 0,4$ ($p = 0,04$) respectivamente. La

localidad de El Sombrero mostró correlaciones significativas y negativas solamente en los estratos de 0-30 y 0-90 cm con valores de $r = -0,49$ ($p = 0,0093$) y $r = -0,50$ ($p = 0,0077$) (Tabla 13).

Tabla 13. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Humedad

| Localidad | Estrato (cm) | r | valor p |
|-------------|--------------|-------|---------------|
| Mercedes | 0-30 | 0,23 | NS |
| | 30-60 | -0,21 | NS |
| | 60-90 | 0,43 | 0,02 |
| | 0-90 | 0,21 | NS |
| Peruggorria | 0-30 | -0,09 | NS |
| | 30-60 | 0,32 | NS |
| | 60-90 | 0,60 | 0,0013 |
| | 0-90 | 0,4 | 0,04 |
| El Sombrero | 0-30 | -0,49 | 0,0093 |
| | 30-60 | -0,28 | NS |
| | 60-90 | -0,14 | NS |
| | 0-90 | -0,50 | 0,0077 |

Al igual que este trabajo, Sudduth *et al.* (2003) no halló relaciones significativas entre CEa y contenido de Humedad del suelo (CEa superficial ni CEa profundidad) para ninguna de las dos localidades estudiadas: Missouri e Illinois.

Por otra parte, Mueller *et al.* (2003) halló que la CEa correlacionó con el contenido volumétrico de agua $r = 0,53$ a $0,87$ ($p = 0,01$) del suelo en cuatro sitios estudiados. Corwin *et al.* (2003a) caracterizaron la calidad de suelos salino-sódicos usando un diseño de muestreo de suelos superficial (0-15 cm). Hallaron correlaciones positivas entre CEa y contenido de agua gravimétrica $r = 0,79$ ($p \leq 0,01$). Kachanoski *et al.* (1988) quienes examinaron suelos con baja concentración de electrolitos disueltos en Ontario, mostraron que la medición de la CEa está fuertemente

correlacionada con la capacidad de retención de humedad del suelo, hallando una correlación de ($r = 0,88 - 0,94$).

Hezarjaribi and Sourell (2007) mostró relaciones entre CEa y contenido hídrico disponible con valores de $r = 0,77$. Sudduth *et al.* (2005) Hallaron una relación significativa entre CEa y Humedad del suelo de $r \geq 0,50$ ($p \leq 0,05$), donde la misma dependió del campo analizado. Martinez and Vanderlinden (2007) analizaron la correlación entre CEa y contenido de humedad en tres lotes que provenían de distintos manejos de labranza. Los resultados globales indicaron correlaciones significativas entre estos dos parámetros con un $r = 0,50$ ($p \leq 0,05$).

Carroll and Oliver (2005) hallaron correlaciones significativas entre CEa y contenido de humedad del suelo medido en primavera ($r = 0,85$) versus el medido en otoño ($r = 0,53$), donde atribuyen la menor correlación obtenida en otoño a que los suelos estuvieron saturados de agua y hubo menos variación espacial que cuando el suelo estaba más seco en primavera.

Para evaluar las bajas correlaciones logradas entre CEa y contenido de humedad del suelo, se observaron las relaciones entre este último parámetro y los factores que gobiernan la misma, ya que McCutcheon *et al.* (2006) encontraron relaciones significativas entre CEa y contenido hídrico del suelo $r = 0,37$ a $0,76$ ($p \leq 0,05$) en cuatro fechas de mapeo y lo atribuyeron a la variación en la textura y materia orgánica dentro del lote, y a las posiciones del paisaje en el terreno. En la localidad de Mercedes, se hallaron relaciones positivas entre Humedad y Arcilla+Limo ($r = 0,42$; $p = 0,02$) y una relación inversa entre Humedad y Arena de $r = -0,42$ ($p = 0,02$) solamente para el estrato 60-90 cm. Para Perugorría sucedió lo mismo que en Mercedes, y estas relaciones fueron de $r = 0,56$ ($p = 0,003$) para Humedad y Arcilla+Limo y de $r = -0,56$ ($p = 0,003$) para la relación entre Humedad y Arena. El Sombrero no mostró no correlación entre Humedad del suelo y Textura del mismo.

En las tres localidades donde se llevo a cabo este trabajo, los suelos tuvieron bajo contenido hídrico al momento de la medición de CEa, y el mismo no mostró variabilidad entre rangos de CEa. La humedad del suelo con un valor medio de 9,5 % (Mínimo de 5,6 %; Máximo de 18,2 %; CV (%) 33,45) para la localidad de Mercedes (Tabla 8) y un valor medio de 8,93 % (Mínimo de 6,1 %; Máximo de 15,4 %; CV (%) 22,73) para la localidad de Perugorría (Tabla 9). El Sombrero exhibió valores medios de 7,8 % (Mínimo de 5,3 %; Máximo de 10,4 %; CV (%) 17,1) (Tabla 10). Con lo cual se apoya la idea propuesta por Rhoades *et al.* (1989) quienes plantean que cuando el

contenido de agua volumétrico es alto (cerca de saturación), la principal senda de medición para la CEa es a través de los poros grandes de suelo; pero cuando el contenido de agua volumétrico es bajo, la principal senda de medición de la CEa pasa a ser a través del contacto entre las partículas. Situación que puede explicar la falta de relación entre CEa y contenido hídrico del suelo para este trabajo.

4.3.3.- Relación entre CEa y CEe (extracto de saturación)

Es razonable esperar una relación significativa entre CEa y CEe debido a que en suelos no salinos, las variaciones en conductividad eléctrica del mismo son una función primaria de la *Fase Líquida* y la *Fase Sólido/Líquida del suelo* (Rhoades *et al.*, 1989; Kachanoski *et al.*, 1988). Para la localidad de Perugorría, la CEa correlacionó con la CEe en todos los estratos de suelo medidos, obteniéndose mayor nivel de significancia para los estratos de 30-60 cm; 60-90 cm y 0-90 cm con valores de $r = 0,84$; $0,88$ y $0,87$ ($p \leq 0,0001$). En El Sombrero, las correlaciones entre estos parámetros fueron menores, y se dieron en todos los estratos medidos salvo a nivel superficial, donde esta relación no fue significativa. Mercedes mostró correlación entre estos parámetros sólo para el estrato 60-90 cm ($r = 0,43$; $p = 0,02$) (Tabla 14).

Tabla 14. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Conductividad Eléctrica del extracto de saturación

| Localidad | Estrato (cm) | r | valor p |
|------------------|---------------------|----------|-------------------|
| Mercedes | 0-30 | -0,003 | NS |
| | 30-60 | 0,26 | NS |
| | 60-90 | 0,43 | 0,02 |
| | 0-90 | 0,31 | NS |
| Peruggorría | 0-30 | 0,66 | 0,0003 |
| | 30-60 | 0,84 | <0,0001 |
| | 60-90 | 0,88 | <0,0001 |
| | 0-90 | 0,87 | <0,0001 |
| El Sombrero | 0-30 | -0,33 | NS |
| | 30-60 | 0,47 | 0,01 |
| | 60-90 | 0,39 | 0,04 |
| | 0-90 | 0,44 | 0,02 |

Algunos autores como Corwin *et al.* (2003a) caracterizaron las relaciones entre CEa y CEe para el estrato superficial de suelo (0-15 cm), donde hallaron correlaciones positivas entre estos parámetros con valores de $r = 0,87$ ($p \leq 0,01$). Sudduth *et al.* (2003) luego de buscar relaciones entre CEe y CEa en dos lotes de Missouri e Illinois hallaron que la relaciones entre estos parámetros fue muy poco observada salvo para la capa superficial del lote de Missouri $r = 0,74$ ($p \leq 0,05$). Más tarde Sudduth *et al.* (2005) hallaron relaciones significativas positivas entre CEe y CEa con valores de $r \geq 0,50$ ($p \leq 0,05$) en algunos estados del centro-norte de EEUU.

Johnson *et al.* (2001) luego de utilizar un muestreo de suelo estratificado basado en cuatro rangos de CEa geo-referenciados, halló una correlación positiva entre CEa y CEe de $r = 0,44$ ($p = 0,001$) para los primeros 0-30 cm. Humphreys *et al.* (2004) halló relaciones significativas entre CEa y CEe superficial $r = 0,47$ ($p = 0,001$), no así entre CEa y CEe en profundidad. Stroh *et al.* (2001) hallaron una relación

positiva significativa entre CEa y la CEe $r^2 = 0,25$ ($p < 0,03$). Estos resultados son similares a los hallados por Kachanoski *et al.* (1988). A diferencia de los autores anteriores, Morari *et al.* (2009) mostró ausencia de correlación entre CEa y CEe, alegando que en estos suelos hay poca variación en su contenido de sales.

Para este trabajo, la relación entre la *Fase Líquida* del suelo y la CEe para ambas localidades, no fue significativa. Con lo cual se investigó la relación de la CEe y la *Fase Sólido/Líquida del suelo*.

Las correlaciones halladas entre CEa y CEe para la localidad de Perugorría estarían explicadas por la relación entre la CEe y la Suma de Bases con valores de correlación de $r = 0,84$ ($p < 0,0001$). Dentro de los cationes participantes en la SB, la mayor correlación con CEe se dió con el contenido de Potasio del suelo $r = 0,53$ ($p = 0,0037$) y en segunda medida con el contenido de Calcio del mismo ($r = 0,39$ $p = 0,04$). Para El Sombrero, la única relación hallada entre SB y CEe se dió con el contenido de Calcio del mismo $r = 0,60$ ($p = 0,0008$).

4.3.4.- Relación entre CEa y MO

En la Tabla 15 se presentan los coeficientes de correlación entre la CEa y el contenido de MO del suelo. En la misma puede observarse que la CEa ha tenido una correlación fuertemente positiva en todos los estratos medidos en Mercedes, con valores de correlación de $r = 0,84$ ($p \leq 0,0001$) para el estrato de 0-90 cm y de $r = 0,79$ ($p \leq 0,0001$) para el estrato superficial de 0-30 cm. Para Perugorría las correlaciones resultaron con menor fuerza que las halladas en el lote anterior, y solamente fueron significativas entre los estratos 0-30 y 0-90 cm con valores de $r = 0,53$ y $r = 0,42$ respectivamente. La localidad de El Sombrero no tuvo correlaciones entre estos parámetros en ninguno de los estratos medidos.

Tabla 15. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Materia Orgánica

| Localidad | Estrato (cm) | r | valor p |
|------------------|---------------------|----------|-------------------|
| Mercedes | 0-30 | 0,79 | <0,0001 |
| | 30-60 | 0,61 | 0,0007 |
| | 60-90 | 0,76 | <0,0001 |
| | 0-90 | 0,84 | <0,0001 |
| Peruggorría | 0-30 | 0,52 | 0,0069 |
| | 30-60 | 0,06 | NS |
| | 60-90 | 0,23 | NS |
| | 0-90 | 0,42 | 0,038 |
| El Sombrero | 0-30 | -0,26 | NS |
| | 30-60 | -0,005 | NS |
| | 60-90 | -0,34 | NS |
| | 0-90 | -0,26 | NS |

Kitchen *et al.* (2003) condujo un ensayo para investigar la relación entre CEa 0-30, 0-90 cm y parámetros de suelo para tres lotes ubicados en Kansas, Colorado y Missouri. Para estos últimos dos lotes halló correlaciones positivas significativas entre CEa 0-30 cm y MO del suelo $r \geq 0,80$ ($p \leq 0,01$). Valores similares de correlación para estos parámetros hallaron Molin and Nunes de Castro (2008) para CEa 0-30 cm ($r = 0,86$) y para CEa 0-90 cm ($r = 0,82$) ($p \leq 0,05$).

Kühn *et al.* (2009) trabajo en una localidad del este de Alemania, donde halló que la CEa se encontraba relacionada mayoritariamente con el contenido de MO $r = 0,59$ ($p \leq 0,05$). Los mismos resultados fueron hallados un año más tarde donde realizaron un ensayo en 11 lotes del mismo país y hallaron que la CEa puede ser explicada por el contenido de MO en un rango que va desde $r = 0,59$ a $0,65$ ($p \leq 0,05$). A su vez concluyen que la MO tiene una influencia más fuerte sobre CEa que el contenido de arcilla, lo que coincide con lo expuesto por Korsæth (2005).

Bekele *et al.* (2005) trabajaron en 6 lotes contiguos, sobre un suelo franco limoso de USA y hallaron relaciones positivas entre CEa y MO $r = 0,55$ ($p = 0,001$).

Carroll and Oliver (2005) examinaron las relaciones entre CEa y las propiedades superficiales (0-15 cm) y sub-superficiales (30-60 cm) para dos campos arables al sur de Inglaterra. Para uno de ellos (Yattendon) hallaron una relación significativa entre CEa y contenido de MO (en ambas profundidades) con valores inferiores a los presentados hasta ahora ($r = 0,37$ y $0,22$ respectivamente). Esto es atribuido principalmente a la capacidad de retención hídrica de la MO. Estos bajos resultados coinciden con los hallados por Hanquet *et al.* (2002), quienes luego de medir la CEa en tres fechas consecutivas hallaron relaciones significativas entre CEa y MO con valores de $r = 0,18$ a $0,21$ ($p \leq 0,05$). Al igual que en el Sombrero, Johnson *et al.* (2001) mostraron una correlación negativa con la MO del suelo ($r = -0,34$; $p = 0,001$).

Morari *et al.* (2009) hallaron correlaciones positivas entre CEa 0-30 cm y Carbono Orgánico del suelo $r = 0,43$ ($p \leq 0,05$). Esta correlación significativa aparece como una consecuencia indirecta del efecto de la textura sobre el C orgánico, más que un efecto directo del C orgánico sobre la CEa. Generalmente se observa en las arcillas eficiencia de conversión de grandes cantidades de C org y alta capacidad de adsorción del mismo, lo que permite la estabilización del C org y previene su mineralización. Confirmando esto, en este trabajo se observaron correlaciones positivas entre MO y contenido de arcilla del suelo ($r = 0,59$; $p = 0,001$) para Mercedes y Perugorría ($r = 0,49$; $p = 0,01$), mientras que se encontraron correlaciones negativas para contenido de MO y arena del suelo para ambas localidades $r = -0,80$ ($p < 0,001$) y $r = -0,52$ ($p = 0,006$) respectivamente. El Sombrero no mostró correlaciones entre MO y textura de suelo.

A su vez, Adhikari *et al.* (2009) propone que la MO juega un rol significativo en el mantenimiento de las propiedades físicas, en la retención e infiltración de agua (*Fase Líquida*) y en la CIC y disponibilidad de nutrientes para las plantas (*Fase Sólido/Líquida*), factores que tienen relación directa con la medición de CEa. En Mercedes se observaron correlaciones positivas entre MO y Ca ($r = 0,78$; $p < 0,0001$), K ($r = 0,75$; $p < 0,0001$), Mg ($r = 0,60$; $p = 0,0009$), Na ($r = 0,73$; $p < 0,0001$), Suma de Bases ($r = 0,79$; $p < 0,0001$) y en menor medida con Humedad del suelo ($r = 0,48$; $p = 0,0097$) y CEe ($r = 0,46$; $p < 0,01$). Para Perugorría se hallaron menor cantidad de correlaciones, en las mismas la MO mostró relación con P extractable ($r = 0,49$;

$p < 0,01$), Suma de Bases ($r = 0,47$; $p < 0,01$), CEe ($r = 0,50$; $p = 0,0094$) y Humedad del suelo ($r = 0,43$; $p = 0,01$).

4.3.5.- Relación entre CEa y P extractable

Este nutriente en el suelo merece especial importancia, ya que su nivel en los suelos de la provincia es naturalmente muy bajo y al fertilizar con formas solubles de este nutriente, el mismo suele fijarse al suelo (Brady and Weil, 1998). En la Tabla 16 se presenta los niveles de correlación entre CEa y contenido de P extractable. Como puede verse las correlaciones para Mercedes y Perugorría fueron bajas y se dieron solamente en uno de los cuatro estratos medidos en cada localidad. En cambio en El Sombrero se hallaron correlaciones para todo el perfil de suelo.

Tabla 16. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Fósforo extractable

| Localidad | Estrato (cm) | r | valor p |
|------------------|---------------------|----------|-------------------|
| Mercedes | 0-30 | 0,01 | NS |
| | 30-60 | 0,62 | 0,0005 |
| | 60-90 | 0,21 | NS |
| | 0-90 | 0,34 | NS |
| Perugorría | 0-30 | 0,4 | 0,05 |
| | 30-60 | 0,01 | NS |
| | 60-90 | -0,25 | NS |
| | 0-90 | 0,26 | NS |
| El sombrero | 0-30 | -0,74 | <0,0001 |
| | 30-60 | -0,74 | <0,0001 |
| | 60-90 | -0,57 | 0,0017 |
| | 0-90 | -0,83 | <0,0001 |

Al igual que este trabajo, Hanquet *et al.* (2002) no hallaron relaciones significativas entre estos parámetros luego de realizar un ensayo en el cual estudiaron esta relación en tres fechas consecutivas en un lote bajo estudio. Molin and Nunes de Castro (2008) hallaron correlaciones negativas entre CEa y contenido de P extractable del suelo con valores de $r = -0,68$ para CEa superficial y de $r = -0,64$ para CEa en profundidad. Por su parte, Bekele *et al.* (2005) hallaron correlaciones positivas bajas entre CEa y P extractable con valores de $r = 0,27$ ($p = 0,001$) a 0-30 cm sobre un suelo franco limoso de USA. Johnson *et al.* (2001); Mueller *et al.* (2003) y Bang (2005) han hallado relaciones negativas entre CEa y P extractable con valores de $r = -0,58$ ($p = 0,001$); $r = -0,43$ ($p = 0,01$) y $r = -0,35$ ($p \leq 0,05$) respectivamente.

La falta de correlación entre estos parámetros a nivel superficial en Mercedes puede deberse a la influencia de la fertilización y el disturbio producido al suelo por las repetidas labranzas como explica Jung *et al.* (2005) quien no halló correlaciones significativas entre CEa y P extractable en las dos profundidades de muestreo superficiales 0 - 7,5 cm y 7,5 - 15 cm. Sin embargo este autor si halló correlaciones negativas significativas entre CEa y P en los muestreos más profundos de 15 - 30 cm ($r = -0,66$; $p = 0,001$). Para este trabajo, las zonas con bajo P extractable asociados con alta CEa pueden deberse a una gran adsorción del P a la arcilla al aumentar el contenido de la misma en el suelo (Heiniger *et al.*, 2003) o a una mayor retención por parte de la materia orgánica.

4.3.6.- Relación entre CEa-Cationes y CEa-Suma de Bases

La relación entre la CEa y estos dos parámetros se da en forma directa a partir del intercambio catiónico del suelo, el cual ocurre sobre las superficies coloidales minerales y orgánicas (*Fase sólido/líquida*) (McNeill, 1980; Conti, 2000; Auerswald *et al.*, 2001). En la mayoría de los coloides del suelo predominan las cargas electronegativas, con lo cual atraen cientos de miles de iones cargados positivamente como Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; K^+ ; NH_4^+ y Na^+ entre otros (Brady and Weil, 1998).

En Mercedes y Perugorría la CEa correlacionó positivamente con el Calcio en todos los estratos de suelo medidos con valores de $r = 0,72$ a $0,89$ ($p \leq 0,0001$), mientras que para El Sombrero las correlaciones halladas fueron débiles y significativas solamente en los estratos de 0-30 cm $r = 0,49$ ($p = 0,0092$) y 0,90 cm $r = 0,39$ ($p = 0,04$). El contenido de Mg del suelo tuvo buena correlación tanto en

Mercedes como Perugorría a 0-90 cm con valores de $r = 0,64$ ($p = 0,0003$) y $r = 0,68$ ($p = 0,0002$) respectivamente. Las correlaciones entre CEa y Potasio resultaron significativas para todos los estratos medidos en ambas localidades con valores de 0-90 cm de $r = 0,83$ ($p < 0,0001$) para Mercedes y $r = 0,72$ ($p < 0,0001$) para Perugorría. En el caso de CEa y Na se obtuvieron correlaciones positivas en todos los estratos mientras que en Perugorría estas correlaciones fueron negativas (Tabla 17).

Tabla 17. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Cationes

| Localidad | Estrato (cm) | Calcio | | Magnesio | | Potasio | | Sodio | |
|-------------|--------------|--------|---------|----------|---------|----------|---------|-------|---------|
| | | r | valor p | r | valor p | r | valor p | r | valor p |
| Mercedes | 0-30 | 0,88 | <0,0001 | 0,09 | NS | 0,62 | 0,0006 | 0,61 | 0,0008 |
| | 30-60 | 0,78 | <0,0001 | 0,71 | <0,0001 | 0,87 | <0,0001 | 0,42 | 0,02 |
| | 60-90 | 0,72 | <0,0001 | 0,4 | 0,03 | 0,86 | <0,0001 | 0,67 | 0,0001 |
| | 0-90 | 0,89 | <0,0001 | 0,64 | 0,0003 | 0,83 | <0,0001 | 0,72 | <0,0001 |
| Perugorría | 0-30 | 0,78 | <0,0001 | 0,8 | <0,0001 | 0,67 | 0,0003 | -0,62 | 0,0009 |
| | 30-60 | 0,72 | <0,0001 | 0,46 | 0,02 | 0,74 | <0,0001 | -0,54 | 0,005 |
| | 60-90 | 0,88 | <0,0001 | 0,26 | NS | 0,4 | 0,05 | -0,37 | NS |
| | 0-90 | 0,89 | <0,0001 | 0,68 | 0,0002 | 0,72 | <0,0001 | -0,54 | 0,005 |
| El Sombrero | 0-30 | 0,49 | 0,0092 | -0,02 | NS | 0,26559 | NS | 0,24 | NS |
| | 30-60 | 0,18 | NS | -0,01 | NS | -0,01413 | NS | 0,15 | NS |
| | 60-90 | 0,02 | NS | 0,16 | NS | -0,10787 | NS | 0,04 | NS |
| | 0-90 | 0,39 | 0,04 | 0,12 | NS | -0,00409 | NS | 0,15 | NS |

La SB correlacionó positivamente con valores de correlación altos en todos los estratos de suelos medidos en Mercedes y Perugorría con valores que van desde $r = 0,81$ a $r = 0,94$ ($p \leq 0,0001$) dependiendo del lote y del estrato medido. Para El Sombrero las correlaciones halladas fueron más débiles y significativas solamente en los estratos de 0-30 cm $r = 0,41$ ($p = 0,03$) y 0,90 cm $r = 0,38$ ($p = 0,04$) (Tabla 18).

Tabla 18. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y Suma de Bases

| Localidad | Estrato (cm) | r | valor p |
|------------------|---------------------|----------|----------------|
| Mercedes | 0-30 | 0,81 | <,0001 |
| | 30-60 | 0,87 | <,0001 |
| | 60-90 | 0,92 | <,0001 |
| | 0-90 | 0,94 | <,0001 |
| Perugorría | 0-30 | 0,91 | <,0001 |
| | 30-60 | 0,87 | <,0001 |
| | 60-90 | 0,90 | <,0001 |
| | 0-90 | 0,93 | <,0001 |
| El Sombrero | 0-30 | 0,41 | 0,03 |
| | 30-60 | 0,12 | NS |
| | 60-90 | 0,2 | NS |
| | 0-90 | 0,38 | 0,04 |

Bekele *et al.* (2005) trabajaron sobre un suelo franco limoso, hallando relaciones significativas entre CEa y K de $r = 0,71$ ($p = 0,001$) a 0-30 cm, pero no lograron hallar relaciones significativas entre CEa y Ca y Suma de Bases para la misma profundidad. Hanquet *et al.* (2002) realizaron un ensayo estudiando la relación entre CEa y parámetros químicos de suelo en tres fechas consecutivas. Hallaron que en primera medida el K intercambiable (junto con el contenido de arcilla) era la variable que explicaba en mayor medida la variabilidad del suelo. A este nutriente le seguía el contenido de Ca del suelo con valores de $r = 0,70$; $0,74$; $0,69$ ($p \leq 0,05$) sin embargo no encontraron relaciones entre CEa, Mg y Na. Kitchen *et al.* (1998) también encontró una buena correlación entre CEa y cationes como Ca y Mg (y en menor grado con el K).

Molin and Nunes de Castro (2008) Hallaron correlaciones significativas entre Suma de Bases y CEa con valores de $r = 0,84$ y $0,81$ ($p \leq 0,05$) para CEa 0-30 y 0-90 cm. Estas relaciones se mantuvieron a su vez con cada uno de los cationes medidos

con valores de correlación de $r = 0,84 - 0,81$ para Calcio, $r = 0,63 - 0,60$ para Magnesio y $r = 0,87 - 0,81$ para Potasio a ambas profundidades de medición de la CEa respectivamente ($p \leq 0,05$).

Mueller *et al.* (2003) halló correlaciones significativas entre CEa-Ca $r = 0,51$ a $0,78$ ($p = 0,01$) para las cuatro localidades de medición y entre CEa- Mg $r = 0,45 - 0,93$ ($p = 0,01$ a $0,05$) para tres de esas localidades bajo estudio. Con respecto a CEa-K no halló relaciones significativas. La correlación entre CEa y SB ocurrió solamente en uno de los sitios medidos con valores de $r = 0,42$ ($p = 0,05$) para Febrero de 2000 y de $r = 0,74$ y $r = 0,53$ ($p \leq 0,01$) para el mes de Marzo de 2000 para CEa superficial y en profundidad respectivamente.

Heiniger *et al.* (2003) realizó mediciones en 16 lotes durante 2 años de estudio, y halló un pequeño número de casos en donde la CEa puede ser usada como medida indirecta de los niveles de nutrientes. Muy pocas relaciones significativas se encontraron entre CEa y análisis de suelos de K, Ca, Mg siendo correlaciones generalmente débiles ($r \leq 0,50$). Williams and Hoey (1987) descubrieron que las sales totales solubles y material de arcilla <2 mm estuvieron correlacionados con los valores de CEa.

Bronson *et al.* (2005) estudió la correlación entre CEa (0-30 y 0-90 cm) para 6 sitios. Entre ellos encontró una relación negativa entre CEa y Ca $r^2 = -0,43$ a $-0,68$ ($p = 0,05$) en dos de los sitios estudiados, lo cual fue sorprendente dado los antecedentes positivos de esta correlación. En los otros tres sitios las correlaciones fueron positivas ($r = 0,53 - 0,77$) coincidiendo con lo reportado por McBride *et al.* (1990). A su vez halló una correlación positiva entre CEa y Mg en 5 de los sitios estudiados principalmente en superficie con valores de $r = 0,50$ a $0,86$ ($p = 0,05$). La relación CEa-Na tuvo un comportamiento similar a la del Mg en cuatro de los sitios estudiados con correlaciones de $r = 0,27$ a $0,60$ ($p = 0,05$).

Stroh *et al.* (2001) correlacionó la CEa con la suma de bases en un ensayo realizado en Texas, obteniendo muy baja correlación entre estos parámetros (menos del 6% de la varianza). Corwin and Lesch (2005) confirman lo hallado en investigaciones previas, donde encontraron que el Ca^+ y Mg^{+2} en extracto de saturación no se correlacionan bien con las mediciones de CEa.

En este trabajo, la correlación entre Cationes y SB con la CEa del suelo ocurrió a través de los cationes adsorbidos (Ca, Mg, K, Na) en los sitios de fijación. Esta capacidad de intercambio y fijación del suelo está gobernada por el contenido de MO

(Adhikari *et al.*, 2009) y arcilla del suelo (Cremers and Laudelout, 1966). El contenido de MO del suelo de 0-90 cm fue baja para todos los lotes con valores de 1,63 % para Mercedes; 1,93 % para Perugorría y 1,15 % en El Sombrero. En Mercedes, la correlación entre los cationes intercambiables y la MO tuvo valores de $r = 0,72$ ($p < 0,001$) para K, $r = 0,67$ ($p = 0,0001$) para Ca, $r = 0,64$ ($p < 0,0003$) para Mg y $r = 0,79$ ($p < 0,0001$) para SB. Por su parte, la arcilla mostró correlaciones positivas con todos los cationes medidos y SB del suelo. Los mayores valores de correlación se dieron con Ca ($r = 0,78$; $p < 0,0001$), SB ($r = 0,74$; $p < 0,0001$) y K del suelo ($r = 0,51$; $p = 0,006$). Tanto para Perugorría como para El Sombrero la MO del suelo no correlacionó con ninguno de los cationes medidos.

La falta de correlación en los parámetros medidos para estas últimas localidades, puede deberse a que al ser bajo el contenido de MO, la arcilla tenga la mayor responsabilidad sobre los cationes intercambiables (Scheinost *et al.*, 1997) en las localidades restantes. En Perugorría, las correlaciones con el contenido de arcilla del suelo también fueron positivas. La relación con SB fue de $r = 0,85$ ($p < 0,0001$), con Ca $r = 0,84$ ($p < 0,0001$), K $r = 0,61$ ($p = 0,001$) y con Mg $r = 0,55$ ($p = 0,0039$). En este caso el Sombrero tampoco mostró relación con la textura del suelo.

4.3.7.- Relación entre CEa y pH

El pH del suelo influye en las propiedades físicas, químicas y de fertilidad del mismo. Con respecto a estos últimos, la asimilación de nutrientes del suelo está influenciada por el pH, ya que determinados nutrientes pueden quedar inmovilizados en determinadas condiciones de pH y no ser asimilados por las plantas. Con respecto a la relación entre CEa y pH, para la localidad de Mercedes no se hallaron relaciones significativas entre estos dos parámetros en ninguno de los estratos medidos. En cambio para Perugorría se hallaron relaciones fuertemente significativas entre CEa y pH para tres de los estratos estudiados: 30-60 cm $r = 0,53$ ($p = 0,0065$), 60-90 cm $r = 0,77$ ($p \leq 0,0001$) y 0-90 cm $r = 0,67$ ($p = 0,0003$). La localidad de El sombrero tuvo un comportamiento similar a lo hallado en Perugorría hallándose correlaciones significativas para todos los estratos medidos, resultando más consistentes las correlaciones en los primeros 0-30 cm y en el estrato de 0-90 cm ambos con $r = 0,76$ ($p \leq 0,0001$) (Tabla 19).

Tabla 19. Coeficientes de correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica aparente y pH

| Localidad | Estrato (cm) | r | valor p |
|-------------|--------------|-------|-------------------|
| Mercedes | 0-30 | 0,02 | NS |
| | 30-60 | -0,08 | NS |
| | 60-90 | -0,1 | NS |
| | 0-90 | -0,09 | NS |
| Perugorría | 0-30 | -0,01 | NS |
| | 30-60 | 0,53 | 0,0065 |
| | 60-90 | 0,77 | <0,0001 |
| | 0-90 | 0,67 | 0,0003 |
| El Sombrero | 0-30 | 0,76 | <0,0001 |
| | 30-60 | 0,58 | 0,0017 |
| | 60-90 | 0,59 | 0,0013 |
| | 0-90 | 0,76 | <0,0001 |

Las relaciones halladas por otros autores con respecto a CEa y pH del suelo generalmente son bajas o inconsistentes. Mueller *et al.* (2003) luego de realizar mediciones en cuatro localidades, halló relaciones significativas entre CEa y pH del suelo solamente para una de ellas en dos fechas de medición: Enero 2000 $r = 0,51$ ($p = 0,01$) y Mayo de 2000 $r = 0,36$ ($p = 0,05$). Johnson *et al.* (2001) usó un muestreo de suelo estratificado basado en cuatro rangos de CEa geo-referenciados. Sus resultados mostraron una correlación positiva entre CEa y pH ($r = 0,37$; $p = 0,001$) sobre profundidades de suelo 0-30 cm. Stroh *et al.* (2001) A partir de un ensayo realizado en Texas, correlacionó la CEa con pH, sus resultados tuvieron una baja correlación explicando menos del 6% de la varianza. Corwin *et al.* (2003a) caracterizaron la calidad de suelos salino-sódicos usando un diseño de muestreo de suelos superficial (0-15 cm), donde hallaron una relación muy pobre entre CEa y pH $r = 0,33$ ($p \leq 0,05$).

Otros autores como Bekele *et al.* (2005) hallaron correlaciones negativas significativas entre CEa y pH del suelo con valores de $r = -0,50$ ($p = 0,001$) para los 6 campos estudiados. Molin and Nunes de Castro (2008) también hallaron correlaciones negativas entre CEa y pH con valores de $r = -0,41$ para CEa superficial y de $r = -0,42$ para CEa en profundidad.

La relación del pH con la disponibilidad de nutrientes y capacidad de intercambio catiónico ocurre a través de la Fase *Sólido/Líquida* del suelo, la cual a su vez es una de las tres sendas de medición de la CEa. En la figura 20 puede verse la relación entre el pH del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas, donde las líneas de color indican el valor medio de pH 0-90 cm para las localidades de Mercedes (pH = 5,9); Perugorria (pH = 6,05) y El Sombrero (pH = 6,6). A su vez, puede verse como conforme aumenta el pH del suelo entre las tres localidades, la disponibilidad de cada uno de los nutrientes se hace mayor.

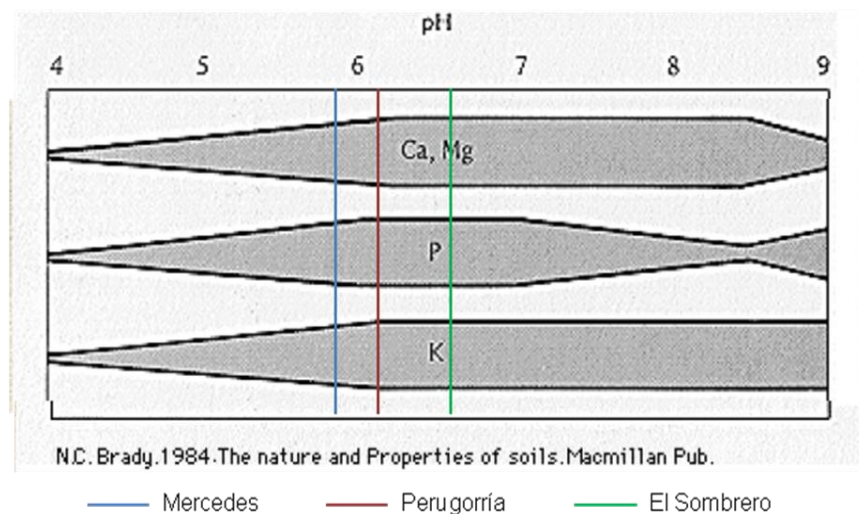


Fig. 18. Disponibilidad de nutrientes en función del pH del suelo.

La Localidad de Mercedes no tuvo ninguna correlación entre pH del suelo y los nutrientes medidos (P, Ca, Mg, K, Na) para ninguno de los estratos de suelo muestreado. Esto puede deberse a que factores como la Textura o MO del suelo se encuentran dominando la medición de CEa. El aumento en la disponibilidad de nutrientes está relacionado indirectamente con la correlación hallada entre la CEa y el pH del suelo medida en las otras dos localidades. En Perugorria el pH tuvo buena

correlación con la SB ($r = 0,47$ $p = 0,01$), el nivel de Ca ($r = 0,74$ $p < 0,0001$); Mg ($r = 0,45$ $p = 0,02$) y K ($r = 0,47$ $p = 0,01$) del suelo. La correlación de este parámetro con P fue negativa y menor que los parámetros anteriores ($r = -0,46$ $p = 0,01$). En el caso del Sombrero, las correlaciones más fuertes se dieron entre pH-SB ($r = 0,61$ $p = 0,0006$) y pH-contenido de P del suelo ($r = -0,64$ $p = 0,0003$) y en menor medida con el contenido de Ca del mismo ($r = 0,41$ $p = 0,03$).

4.4.- Relación entre CEa y Altimetría

La topografía juega un rol importante en la respuesta hidrológica, desde la captación de precipitaciones hasta la disponibilidad hídrica para producciones agrícolas (Verity and Anderson, 1990; Timlin *et al.*, 1998; Kravchenko and Bullock, 2000; Kitchen *et al.*, 2003) e incluso en la redistribución de las partículas de suelo, de MO y nutrientes generando variabilidad en las propiedades físico-químicas de los suelos de las distintas posiciones del paisaje (Ovalles and Collins, 1986; Pennock and de Jong, 1990).

4.4.1- Mercedes

En función del semivariograma experimental obtenido, se ajustó un modelo esférico para esta variable en Mercedes (Fig. 19)

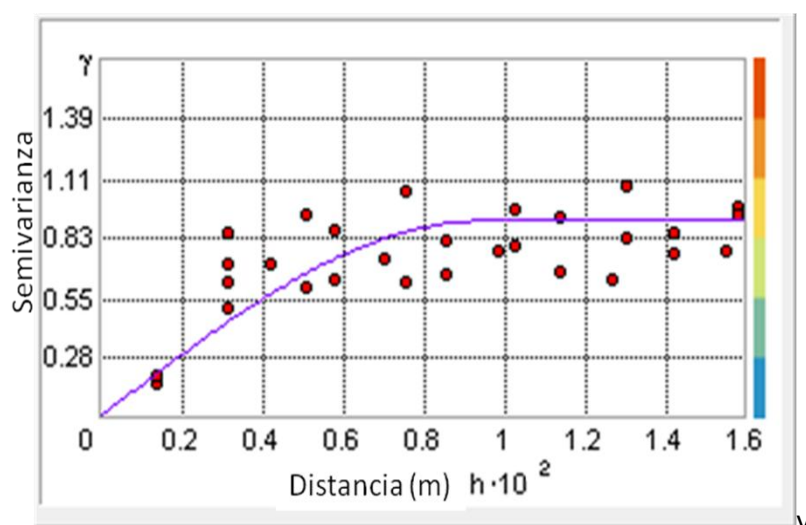


Fig. 19. Semivariograma experimental  y ajuste de modelo esférico  para la variable Altimetría - Mercedes

Los parámetros del mismo indican que esta variable no posee efecto pepita. La curva alcanza su umbral en un valor de 0,91 y tiene un alcance 83,62 metros (Tabla 20).

Tabla 20. Parámetros de ajuste del Semivariograma para la variable Altimetría - Mercedes

| Localidad | Modelo | Efecto pepita | umbral | alcance (m) |
|------------------|---------------|----------------------|---------------|--------------------|
| Mercedes | Esférico | 0 | 0,91 | 83,62 |

Posteriormente por interpolación o krigging se realizó el mapa de contorno para altimetría (Fig. 20). En este mapa pueden identificarse cuatro colores diferentes donde cada uno representa las distintas posiciones del paisaje. El lote aumenta su altura hacia el centro del mismo en sentido oeste (W) a este (E) (colores celeste a azul) llegando a una altura máxima que va desde 104,6 a 106,1 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Luego va disminuyendo la altura hacia el este, pasando por el color verde y teniendo finalmente una altura de 100,1 a 101,6 m.s.n.m. representada por el color amarillo, en el noreste del lote.

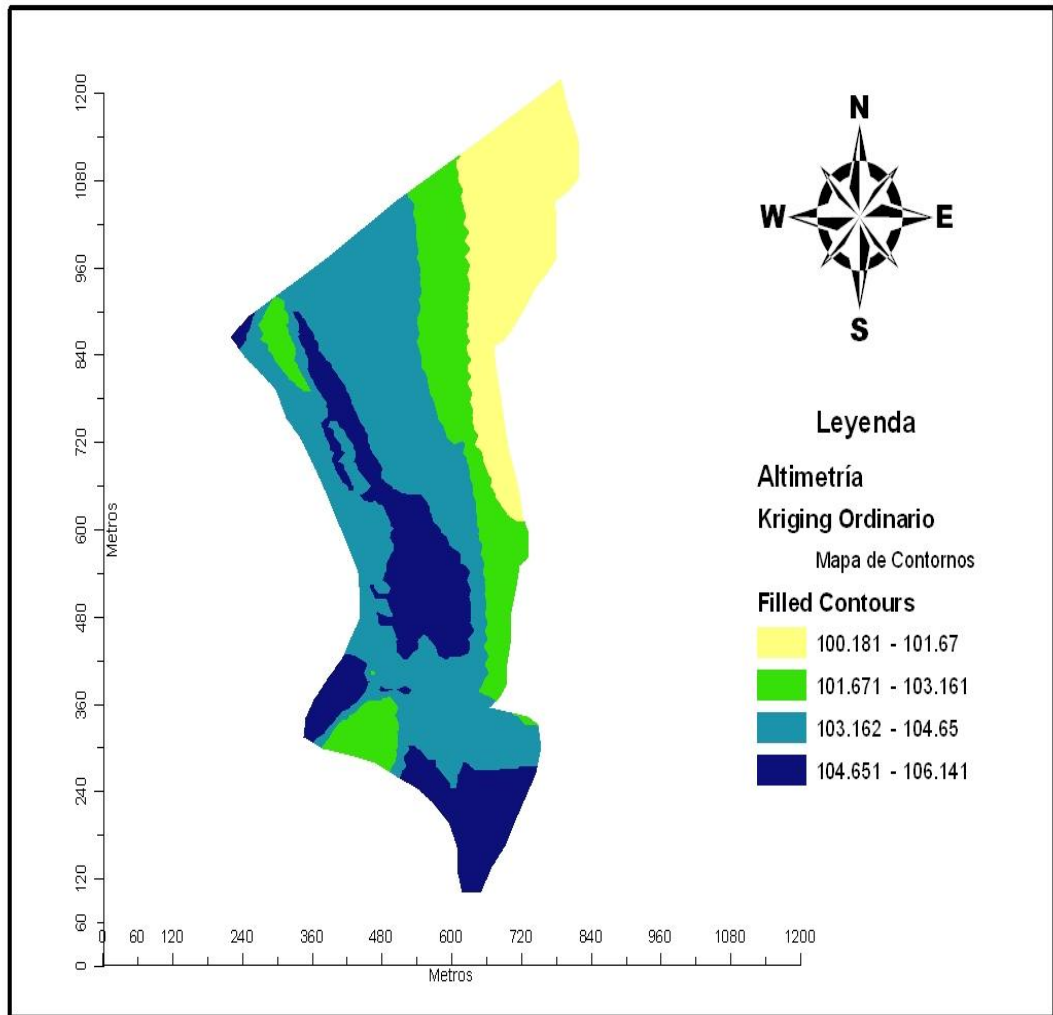


Fig 20. Mapa de altimetría - Mercedes

Con fines de realizar la correlación entre CEa y Altimetría del terreno, se proceso cada uno de estos mapas para obtener una grilla de 10 m x 10 m (Fig. 21 y 22).

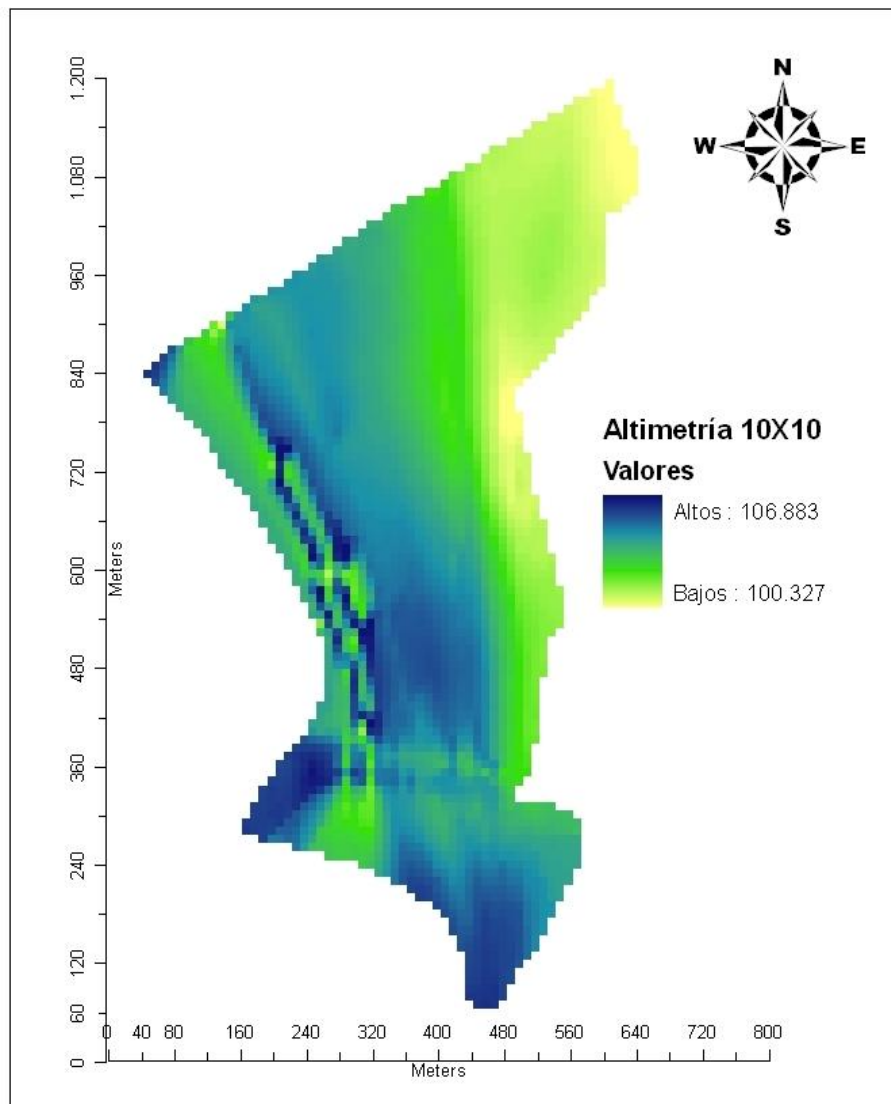


Fig. 21. Mapa de contorno en grilla 10x10 metros de Altimetría – Mercedes

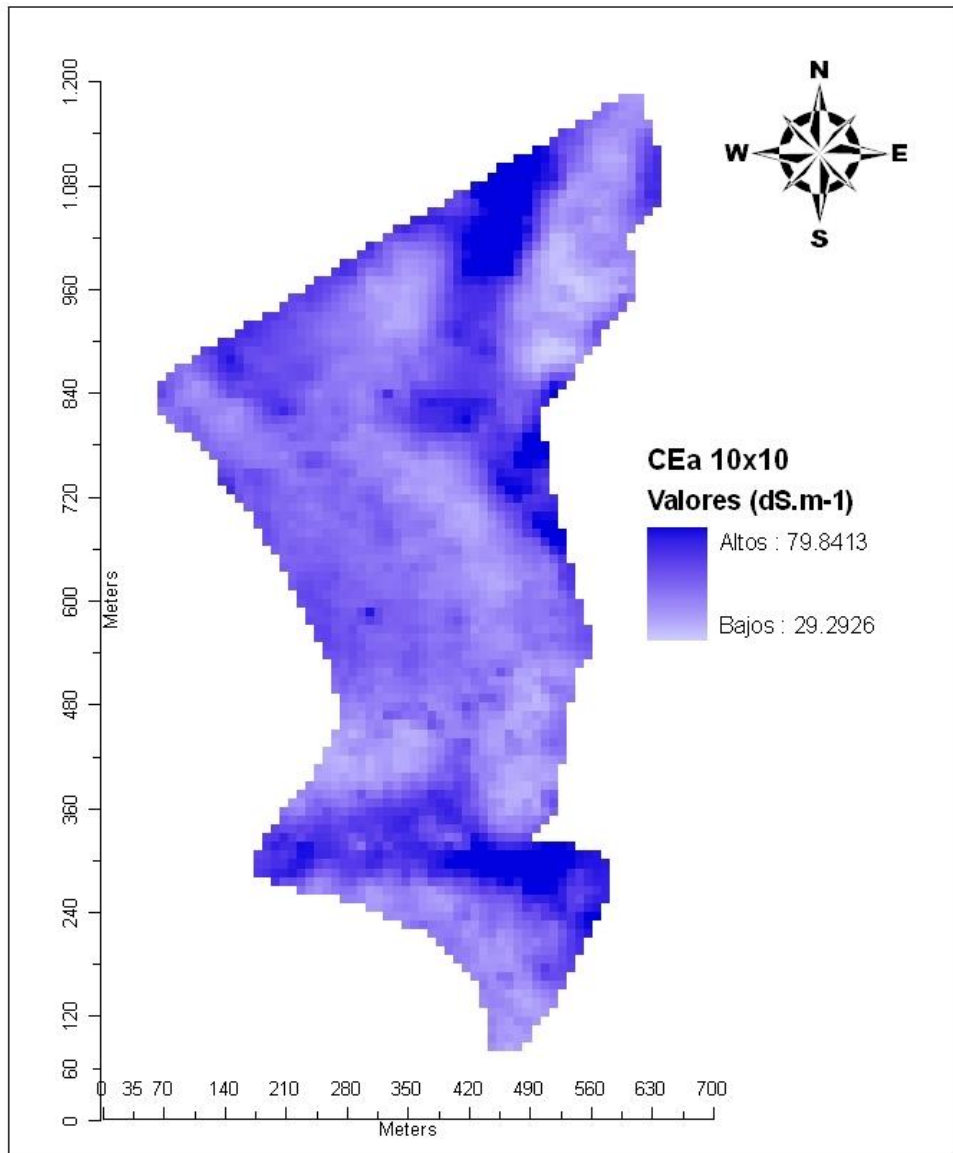


Fig. 22. Mapa de contorno en grilla 10x10 metros de Conductividad Eléctrica aparente – Mercedes

Se tomó el valor promedio de cada uno de los polígonos (respetando latitud y longitud) y se dividió en rangos de 1 metro. Con estos datos se realizó la correlación entre CEa y altimetría (Fig. 23). En la misma puede observarse que la regresión entre ambos parámetros fue negativa ($r^2 = 0,71$) indicando que conforme aumenta el valor de altimetría del terreno, la CEa disminuye su valor.

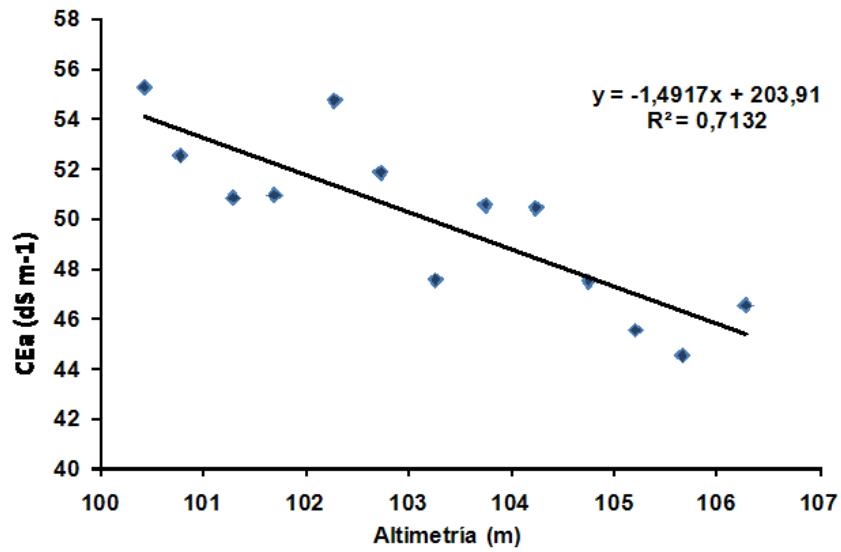


Fig. 23. Correlación entre Conductividad Eléctrica aparente y Altimetría - Mercedes

Esta correlación puede visualizarse de otra manera a partir del Análisis de Transectas. Las mismas fueron trazadas sobre cada uno de los mapas obtenidos, y el resultado es un corte del terreno donde se muestra el perfil de comportamiento del parámetro de interés (Fig 24). Las líneas celestes señalan la comparación de dos puntos contrastantes de altimetría vs CEa. La primer línea a los 50 metros de distancia muestra como con los valores más altos de altimetría se corresponden (este caso) valores medios de CEa en comparación con la otra línea celeste (300 metros) en donde para los valores más bajos de altimetría se obtienen los mayores valores de CEa (Fig. 25).

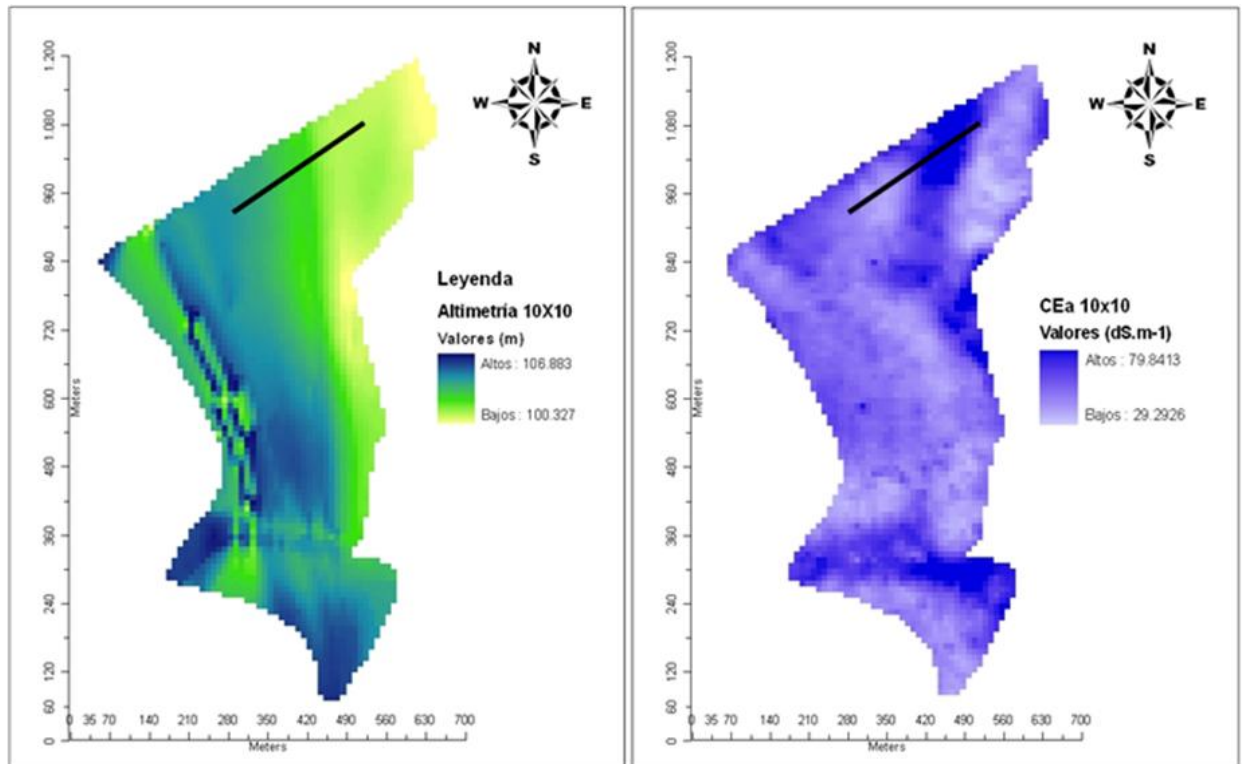


Fig. 24. Mapas de Transectas de Altimetría y Conductividad Eléctrica aparente – Mercedes

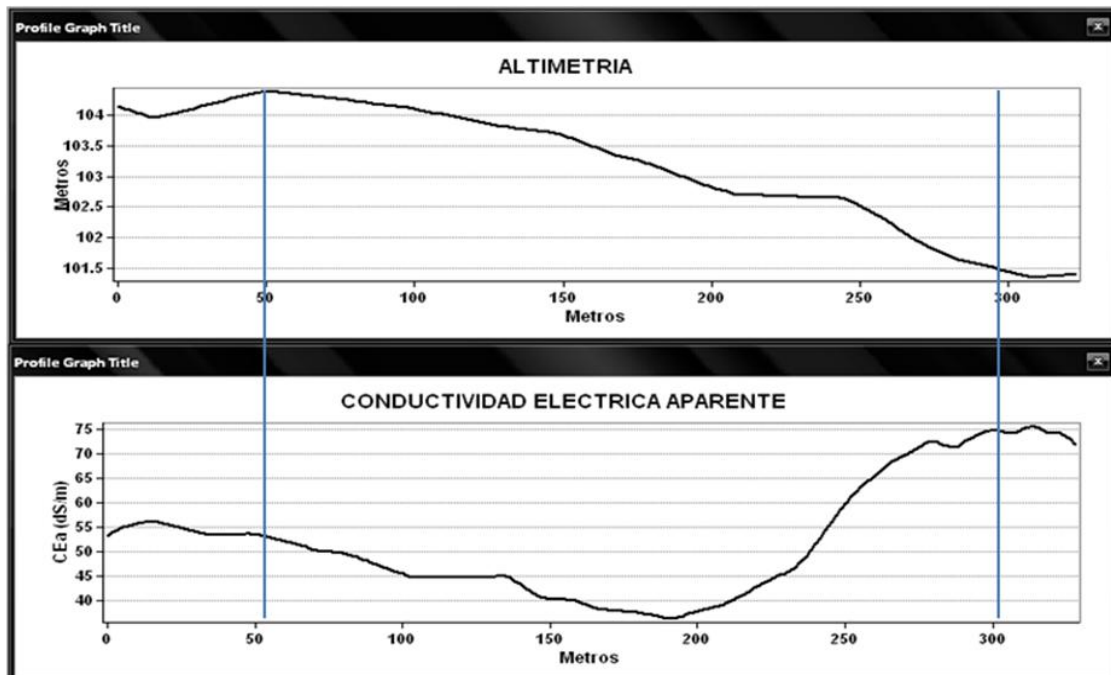


Fig. 25. Análisis de Transectas: Perfil de Altimetría (arriba) y Conductividad Eléctrica aparente (abajo) - Mercedes

4.4.2- Perugorría

En función del semivariograma experimental obtenido, se ajustó un modelo *gaussiano* para esta variable en Perugorría (Fig. 26)

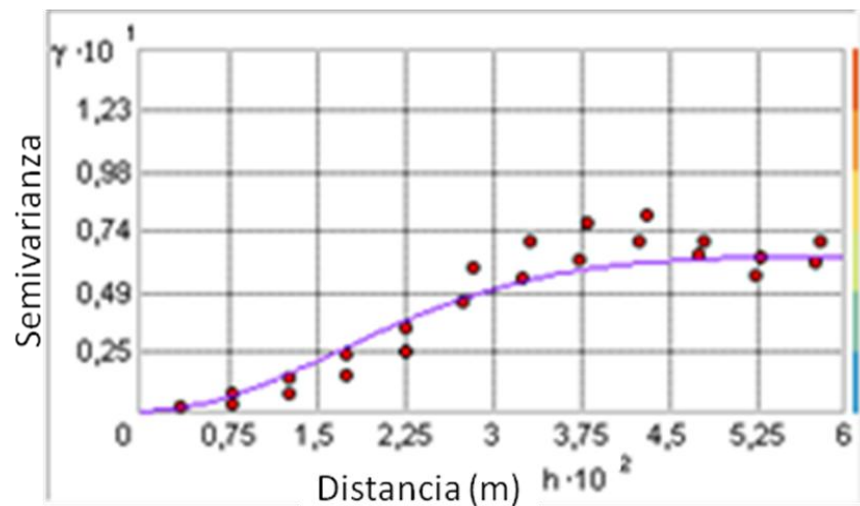


Fig. 26. Semivariograma experimental y ajuste de modelo gaussiano para la variable Altimetría - Perugorría.

Los parámetros del mismo indican que esta variable posee un efecto de 0,032. La curva alcanza su umbral en un valor de 6,32 y tiene un alcance 358,4 metros (Tabla 21).

Tabla 21. Parámetros de ajuste del Semivariograma para la variable Altimetría - Perugorría

| Localidad | Modelo | Efecto pepita | umbral | alcance (m) |
|------------|-----------|---------------|--------|-------------|
| Perugorría | Gaussiano | 0,032 | 6,32 | 358,4 |

Posteriormente por krigging se realizó el mapa de contorno para altimetría (Fig. 27). En la misma, se pueden ver varios colores representando las distintas posiciones del paisaje. Haciendo un análisis de la figura en sentido oeste (W) - este (E) y norte (N) - sur (S) puede verse que el centro del lote es la zona con valores más altos de

altimetría (color azul oscuro) teniendo una altura de 66,64 a 68,16 m.s.n.m. A partir del mismo, el terreno baja en todas las direcciones (colores celestes a verdes y amarillo) llegándose a obtener valores de 57,09 a 59,05 m.s.n.m. en la zona del noroeste del lote.

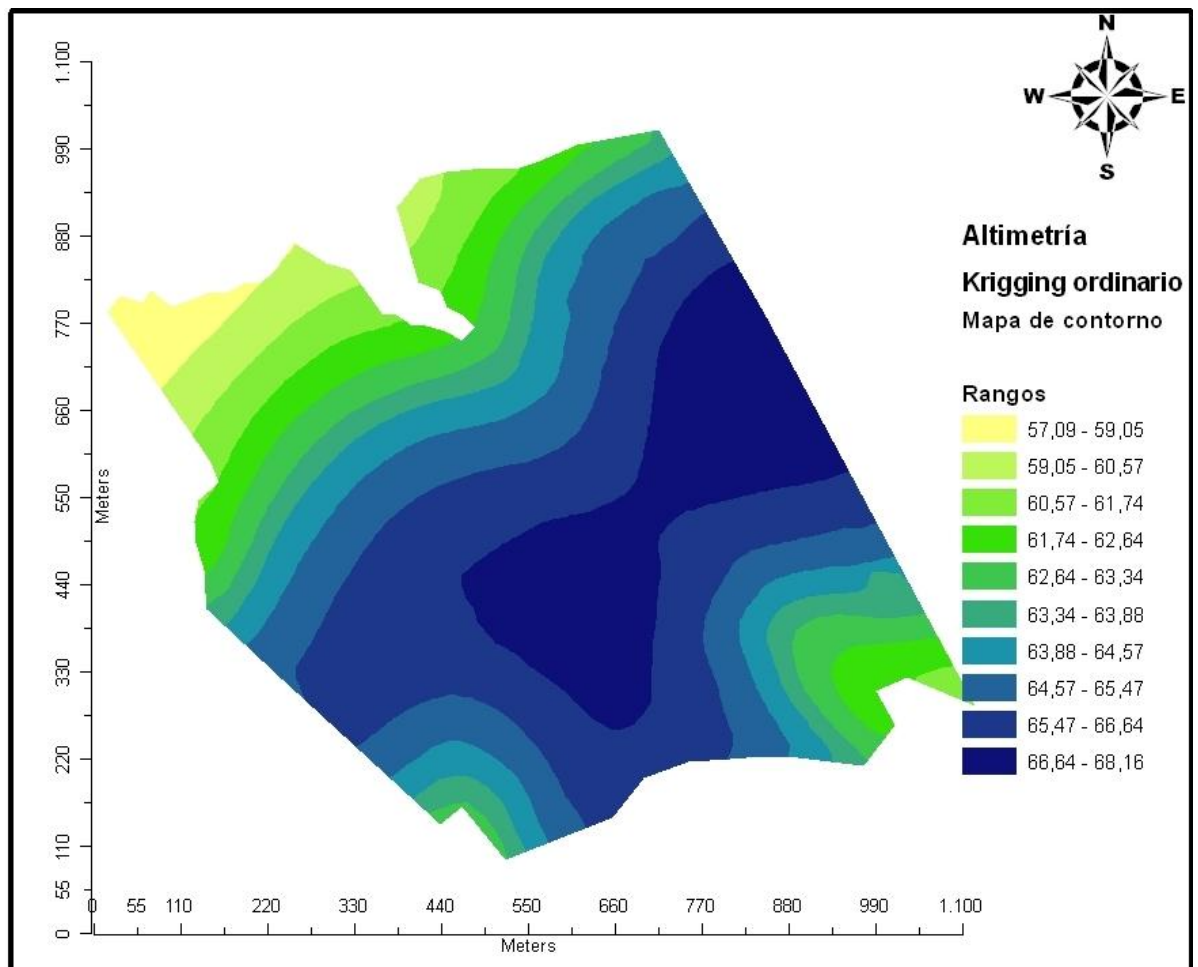


Fig 27. Mapa de Altimetría - Perugorría

Luego se procesaron los mapas de CEa y Altimetría en la Grilla de 10 x 10 m (Fig. 28 y 29), se tomó el valor el valor promedio de cada uno de los polígonos y se lo dividió en rangos de 1 m para realizar la correlación entre estos parámetros (Fig. 30).

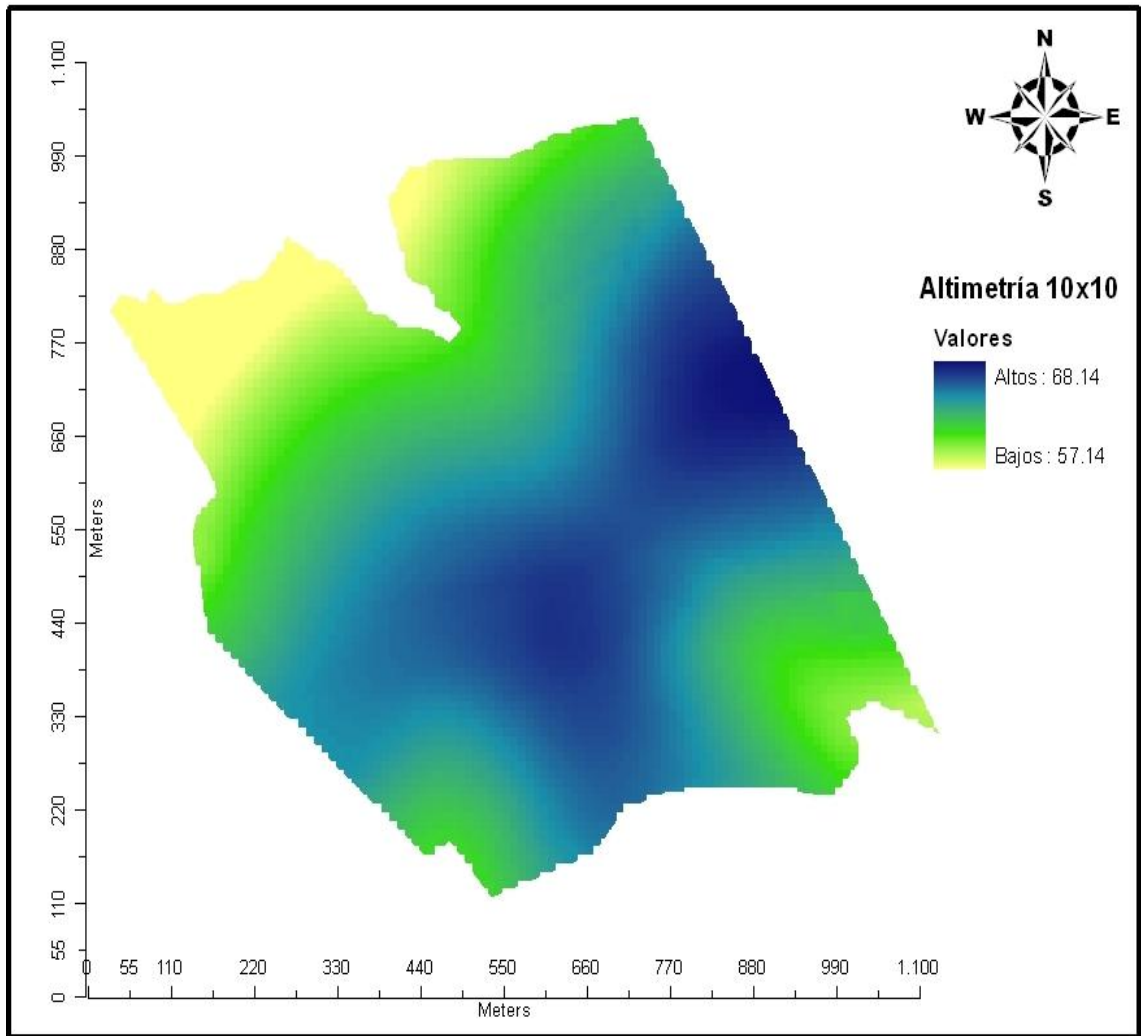


Fig. 28. Mapa de contorno en grilla 10x10 metros de Altimetría – Perugorría

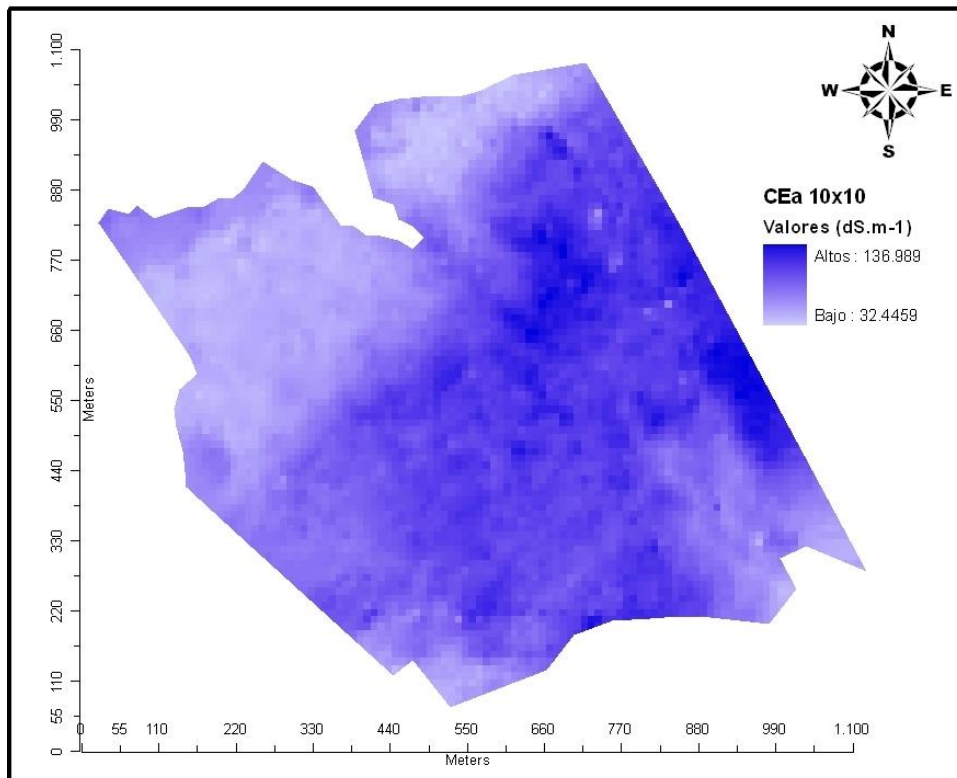


Fig. 29. Mapa de contorno en grilla 10x10 metros de Conductividad Eléctrica aparente - Perugorría

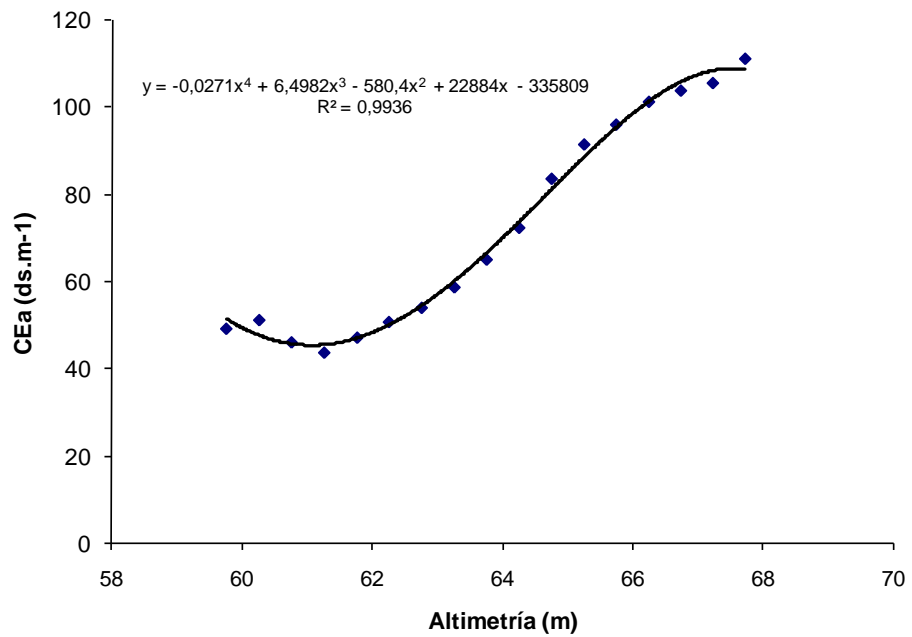


Fig. 30. Correlación entre Conductividad Eléctrica aparente y Altimetría - Perugorría

A diferencia de la localidad de Mercedes, la regresión entre CEa y altimetría fue positiva ($r^2 = 0,99$) indicando que conforme aumenta el valor de altimetría del terreno, la CEa también aumenta su valor.

Esta correlación puede visualizarse de otra manera a partir del Análisis de Transectas (Fig 31). Las líneas celestes señalan la comparación de dos puntos en donde el comportamiento de la CEa se corresponde con el de altimetría (Fig. 32).

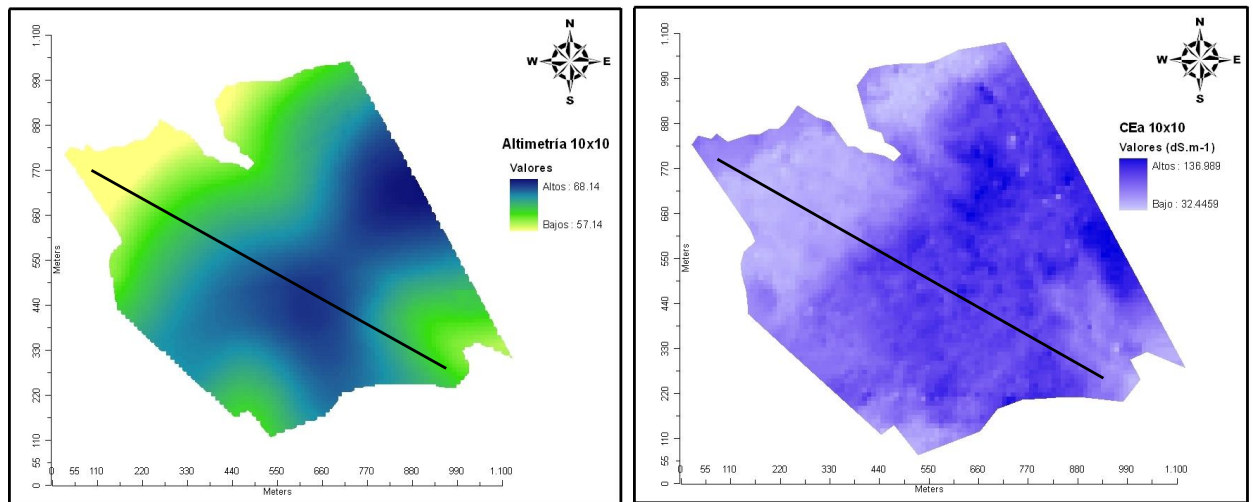


Fig. 31. Mapas con Transectas de Altimetría y Conductividad Eléctrica aparente - Perugorria

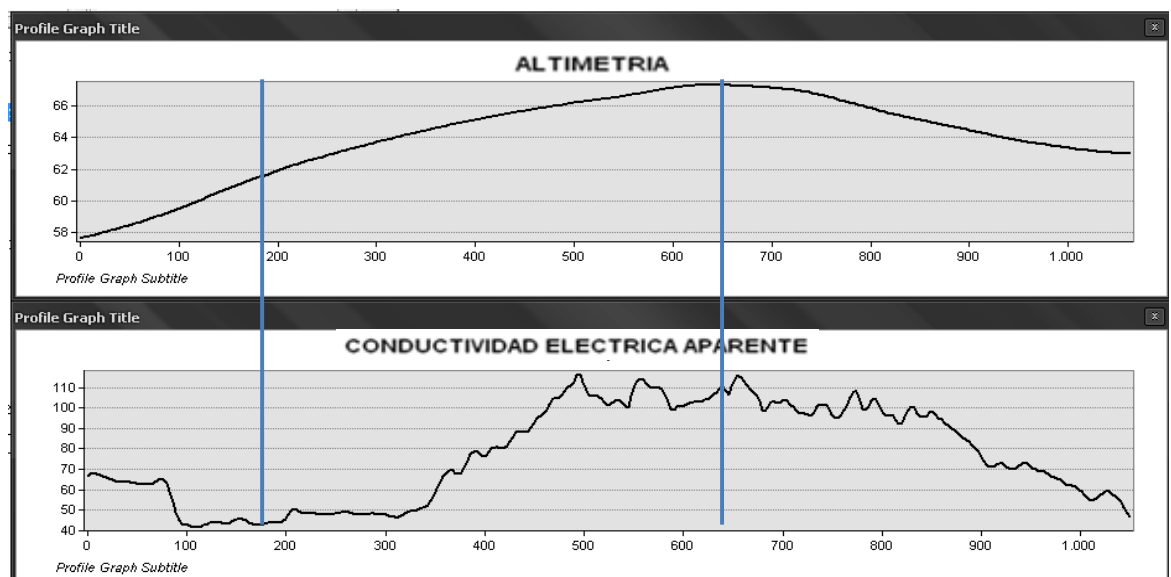


Fig. 32. Análisis de Transectas: Perfil de Altimetría (arriba) y Conductividad Eléctrica aparente (abajo) - Perugorria

Como se dijo anteriormente, la correlación entre CEa y Altimetría se espera que ocurra en forma inversa. En general, fueron pocos los autores que trabajaron sobre esta relación habiéndose hallado resultados dispares según el lote analizado, tal como sucede en Mercedes y Perugorría en este trabajo.

Autores como Kühn *et al.* (2009) no hallaron correlación significativa entre CEa y atributos del terreno como elevación luego de trabajar sobre 11 lotes del este de Alemania. Al igual que la localidad de Mercedes, Mueller *et al.* (2003) hallaron correlaciones significativas entre CEa en superficie y en profundidad con elevación del terreno con valores de $r = -0,65$ ($p = 0,01$) y $r = -0,20$ ($p = 0,01$) respectivamente ($n = 223$). En otros estudios realizados en zonas húmedas con topografía significativa, Kachanoski *et al.* (1988, 1990); Khakural *et al.* (1998) y Nugteren *et al.* (2000) reportaron correlaciones también negativas. Ellos hallaron a la elevación como una variable co-lineal con contenido hídrico del suelo, siendo alto a bajas elevaciones y bajos en las cumbres. Para el caso de Mercedes, el contenido hídrico del suelo fue bastante uniforme al momento de la medición, con lo cual esta relación negativa entre CEa y Altimetría ocurre por la diferencia en la cantidad de Arcilla+Limo en el rango más alto de CEa (78,29 %) versus el más bajo (56,78 %). Esta diferencia en textura sumada a ser una zona baja del terreno, hace que se acumule mayor contenido de MO y que tanto la SB como los cationes asociados sean mayores contribuyendo a tener una mayor CIC y por lo tanto lecturas de CEa altas (Tabla 22).

Tabla 22. Valores de parámetros de suelo obtenidos para la localidad de Mercedes en función de su posición del terreno y rango de Conductividad Eléctrica aparente

| MERCEDES | | | |
|------------------------------------|--------------|-------|--------------|
| Posición en el terreno | Alto | Medio | Bajo |
| Rango de CEa/ Variable de suelo | Bajo | Medio | Alto |
| Arcilla + Limo (%) | 56,78 | 63,66 | 78,29 |
| Arena (%) | 43,22 | 36,34 | 21,71 |
| MO (%) | 1,39 | 1,59 | 1,83 |
| Ca (meq.100gr suelo) | 5,69 | 6,25 | 8,00 |
| Mg (meq.100gr suelo) | 0,89 | 1,88 | 2,10 |
| K (meq.100gr suelo) | 0,05 | 0,06 | 0,08 |
| SB (meq.100gr suelo) | 7,09 | 8,67 | 10,73 |

Por su parte otros autores como Jung *et al.* (2005) halló que la elevación se correlacionaba positivamente con las lecturas de CEa para 0-30 cm con un $r = 0,58$ ($p = 0,001$). Schepers *et al.* (2004) condujo un ensayo en la localidad de Gibbon con el objetivo de analizar si los atributos del paisaje junto con la CEa pueden contribuir a delimitar zonas de MSE. En este trabajo el mapa de CEa reveló patrones similares a los de elevación del terreno con bajos valores de CEa para las zonas bajas del terreno y altos valores de CEa en las regiones altas del lote ($r = 0,39$ $p = 0,05$). Kitchen *et al.* (2003) condujo un ensayo para investigar la relación entre CEa 0-30, 0-90 cm y mediciones topográficas para tres lotes ubicados en Colorado, Kansas y Missouri. Hallando relaciones significativas para CEa superficial – altimetría de $r = 0,27$ ($p \leq 0,01$) para Kansas y para CEa profundidad de $r = 0,37$ ($p \leq 0,01$) para Missouri; sin hallar relaciones significativas para Colorado a ninguna de las dos profundidades de CEa. McCutcheon *et al.* (2006) hallaron que la correlación entre CEa y elevación fue muy significativa para tres de las cuatro fechas de medición y sorprendentemente positiva con valores de $r = 0,18$ a $0,49$ ($p \leq 0,05$). Los resultados obtenidos en Perugorría concuerdan con lo expresado por estos autores, ya que se halló una relación positiva entre Altimetría y CEa. A diferencia de la localidad de Mercedes, Perugorría presenta mayor contenidos de Arcilla+Limo en la zona alta (loma) del lote versus la zona baja del mismo (que posee mayor contenido de Arena). Sumado a esto, la zona alta del terreno tuvo mayor contenido de MO, contenido de Ca y SB parámetros que contribuyen a altas mediciones de CEa en los lotes (Tabla 23).

Tabla 23. Valores de parámetros de suelo obtenidos para la localidad de Perugorría en función de su posición del terreno y rango de Conductividad Eléctrica aparente

| PERUGORRIA | | | |
|------------------------------------|--------------|-------|--------------|
| Posición en el terreno | Bajo | Medio | Alto |
| Rango de CEa/ Variable de suelo | Bajo | Medio | Alto |
| Arcilla + Limo (%) | 44,00 | 56,04 | 60,49 |
| Arena (%) | 56,00 | 43,96 | 39,51 |
| MO (%) | 1,74 | 2,02 | 2,06 |
| Ca (meq.100gr suelo) | 6,88 | 8,66 | 11,48 |
| Mg (meq.100gr suelo) | 1,11 | 2,12 | 2,16 |
| K (meq.100gr suelo) | 0,10 | 0,13 | 0,13 |
| SB (meq.100gr suelo) | 8,63 | 11,19 | 14,09 |

4.5.- Relación entre CEa y Rendimiento del Cultivo de Maíz

Los resultados obtenidos para la correlación entre CEa y rendimiento del cultivo de maíz en Mercedes y Perugorría fueron positivas con valores de $r = 0,52$ ($p=0,0057$) y $0,77$ ($p<0,0001$) para cada localidad respectivamente, no habiéndose hallado resultados significativos para la localidad de El Sombrero en cuanto a estos parámetros (Tabla 24).

Tabla 24. Correlación y nivel de significancia entre Conductividad Eléctrica Aparente y Rendimiento

| Localidad | r | valor p |
|------------------|----------|-------------------|
| Mercedes | 0,52 | 0,0057 |
| Perugorría | 0,77 | <0,0001 |
| El Sombrero | -0,09 | NS |

Dentro de la revisión bibliográfica realizada, los resultados de correlación entre estos dos parámetros fueron muy variables. Varios autores lograron identificar asociaciones significativas y positivas entre CEa y rendimiento de cultivos como por ejemplo Šarec *et al.* (2002), quien trabajó en trigo donde halló valores de correlación de $r = 0,6 - 0,7$ ($\alpha = 0,01$) entre estos parámetros. Corwin *et al.* (2003a) también halló relaciones significativas entre CEa y Rendimiento del cultivo de algodón $r = 0,51$ ($p < 0,01$). Kitchen *et al.* (1999) también concluyó que hay una relación significativa entre CEa y rendimiento del cultivo de maíz. Todos los autores explicaron que tanto el clima, tipo de cultivo e información específica de campo es necesaria para explicar la interacción entre CEa y rendimiento potencial.

Por su parte, Johnson *et al.* (2003) trabajaron en una región semi-árida buscando hallar una correlación entre CEa (0-30 y 0-90 cm) y rendimiento de trigo y maíz durante dos años de evaluación. Hallaron correlaciones fuertes y negativas entre CE 0-30 cm y rendimiento de trigo $r = - 0,98$ ($p = 0,01$) y correlaciones positivas entre CEa 0-90 cm y rendimientos de ambos cultivos. La disparidad en la relación entre CEa 0-30 y rendimiento de trigo y maíz refleja simplemente las diferencias en la respuesta del cultivo a los factores que contribuyen a la medición de la CEa 0-30 y a otros factores de suelo con los cuales están correlacionados.

Machado *et al.* (2006) trabajo en la ciudad de Oregon para demarcar zonas de MSE a partir de la utilización de CEa y Mapas de rendimiento. El mapa de CEa estuvo significativamente correlacionado con el rendimiento del cultivo $r = -0,37$ ($p \leq 0,01$). Esto lo atribuyen a la probabilidad de que la CEa este mapeando otros factores que no están fuertemente correlacionados con la productividad. Humphreys *et al.* (2004) estudió durante dos años en 5 localidades la relación CEa (0-30 o 0-90 cm) – Rendimiento de trigo. Solamente en dos oportunidades pudo establecer una correlación significativa entre estos parámetros, fue para la localidad de Haskel en CEa 0-30 con $r = -0,67$ ($p = 0,01$) y para CEa 0-90 con $r = -0,54$ ($p = 0,01$) cm. Con respecto a esto, alega que la expresión del rendimiento influenciada por la variación temporal y la escala espacial.

Kitchen *et al.* (2003) condujo un ensayo durante tres años para investigar la relación entre CEa 0-30, 0-90 cm y rendimiento del cultivo para tres lotes en diferentes localidades. Mientras que los coeficientes de correlación fueron mayoritariamente negativos para los lotes de Kansas ($r = -0,61$) y Missouri ($r = -0,43$) tanto a 0-30 cm como a 0-90 cm con $r = -0,57$ y $r = -0,50$ respectivamente, para el Colorado estos coeficientes fueron mayoritariamente positivos $r = 0,26$ ($p \leq 0,01$). Aumentos en la CEa se asocian usualmente a aumentos en el contenido de arcilla (McNeil, 1992), los suelos del Colorado son generalmente bien drenados, atribuyeron estos rendimientos a la tendencia en la mejorar la capacidad de retención hídrica con alta CEa. Para los otros campos, especulan que la alta CEa se asocia con factores como pobre drenaje interno y altos contenidos de arcilla en el subsuelo que restringe el crecimiento de las raíces. Para Kansas, la pendiente y elevación es por lo tanto una propiedad importante asociada al rendimiento.

Jung *et al.* (2005) halló correlaciones negativas entre CEa y los rendimientos de maíz y soja en años con precipitaciones acumuladas menores a 15 cm en Julio y Agosto para los años 1994 ($r = -0,58$; $p = 0,001$), 1997 ($r = -0,62$; $p = 0,001$), 2001 ($r = -0,55$; $p = 0,001$) y 2002 ($r = -0,26$; $p = 0,05$). En contraste, la CEa se correlaciono positivamente con el mismo en años con mayores de 15 cm de precipitaciones acumuladas para los mismos meses en los años 1993 $r = 0,25$ ($p = 0,05$), 1996 $r = 0,36$ ($p = 0,01$), 1998 $r = 0,55$ ($p = 0,001$) y 2000 $r = 0,61$ ($p = 0,001$). De este modo, halló que el signo de la correlación entre CEa y rendimiento sigue el mismo patrón de correlaciones entre las propiedades del suelo y rendimiento.

A diferencia de los autores anteriores, Jaynes *et al.* (1995) y Kitchen *et al.* (1999) hallaron que en regiones de altas precipitaciones, la relación entre CEa y rendimiento de los cultivos varió entre los estudios realizados, generalmente con relaciones inconsistentes entre CEa y rendimiento a través de los años. Jaynes *et al.* (1995) encontró relaciones inconsistentes entre rendimientos de maíz y soja y conductividad eléctrica (medición aproximada de 0-150 mts) en años de alta y baja precipitación, ambos entre campos y años. Ellos hipotetizaron que esto es el resultado de respuestas opuestas entre la conductividad eléctrica - zonas delimitadas, de baja a excesiva humedad, causando alta variabilidad en los rendimientos dentro de los lotes. Udayakantha *et al.* (2008) concluyeron que en el área de loess Europeo, con interacciones complejas de paisaje, no pudieron hallar una relación entre el rendimiento del cultivo y parámetros como CEa y elevación.

Como se vio, la relación entre CEa y Rendimiento de cultivo es muy compleja ya que además de la condición del suelo; influyen en la misma el clima, historia de manejo y adversidades. Para un lote en particular podrían uniformizarse todas estas cuestiones, y atribuirse la variación en rendimiento solamente a la variabilidad de parámetros de suelo intra-lote. A partir de esto, se hace necesario establecer las propiedades de suelo que tienen mayor influencia en las mediciones de CEa a campo en el orden de establecer cuáles de esas propiedades están influenciando el rendimiento del maíz (Corwin and Lesch, 2005a).

Para la localidad de Mercedes, las propiedades de suelo en relación directa con el rendimiento de maíz fueron MO del suelo $r = 0,66$ ($p = 0,0002$), Arcilla+Limo $r = 0,56$ ($p = 0,002$), Arena $r = -0,56$ ($p = 0,002$) y Suma de Bases $r = 0,57$ ($p = 0,0019$). Para Peruggorría, las relaciones entre rendimiento y parámetros de suelo se dieron con Arcilla+Limo $r = 0,62$ ($p = 0,0009$) y Arena $r = -0,62$ ($p = 0,0009$), MO $r = 0,47$ ($p = 0,01$) y Suma de Bases $r = 0,72$ ($p < 0,0001$). Para ambas localidades estas variables fueron detectadas por el sensor al momento de la medición de la CEa. Las mismas fueron responsables de la correlación indirecta hallada entre CEa y rendimiento del cultivo de maíz.

4.6.- Delineamiento de Zonas de MSE a partir de rangos de CEa. Aval de los parámetros medidos

Con el objetivo de confirmar cada una de las Zonas de Manejo Sitio Específico delimitadas por el Veris 3100, se realizó el análisis de varianza correspondiente a las variables de suelo que mostraron valores de correlación mayores a $r = 0,70$. En todos los casos se vio Interacción entre la localidad y el tratamiento por lo tanto se analizaron los resultados por la interacción. Para la localidad de Mercedes se seleccionó Porcentaje de Arcilla+Limo ($r = 0,93$), Contenido de Materia Orgánica ($r = 0,84$), Suma de Bases ($r = 0,94$) y Contenido de Potasio del suelo ($r = 0,83$). En Perugorría, se analizaron Porcentaje de Arcilla+Limo ($r = 0,87$), Suma de Bases ($r = 0,93$), CEE ($r = 0,87$), Contenido de Potasio del suelo ($r = 0,72$) y Rendimiento del cultivo ($r = 0,77$). Para El sombrero se seleccionaron pH ($r = 0,76$) y Contenido de Fósforo ($r = -0,83$).

4.6.1.- Mercedes

El porcentaje de Arcilla+Limo presenta una relación directa con la CEa en esta localidad, creciendo a medida que se incrementan los rangos de CEa. Para esta variable se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($Pr > F 0,0003$) entre los rangos medidos (Alto – Medio - Bajo) con valores aproximadamente de 55% para el rango más bajo de CEa, de 65% para el rango medio y 80% para el rango más alto (Fig. 33). El porcentaje de MO del suelo presentó la misma tendencia que la textura, pero con menores diferencias en el contenido de MO entre rangos de CEa ($Pr > F 0,0001$). También avala la división en tres rangos de CEa delimitados por el Veris (Fig. 34). El comportamiento de la Suma de Bases concuerda con las delimitaciones realizadas en los gráficos anteriores por el contenido de Arcilla+Limo y MO del suelo (Fig. 35). A diferencia de las variables anteriores, el contenido de K del suelo marcó diferencias entre rangos de CEa para los rangos Bajo+Medio y Alto con valores de 0,05 y 0,065 (meq.100 gr suelo) para los dos primeros y 0,08 (meq.100 gr suelo) para el rango más alto de CEa (Fig. 36).

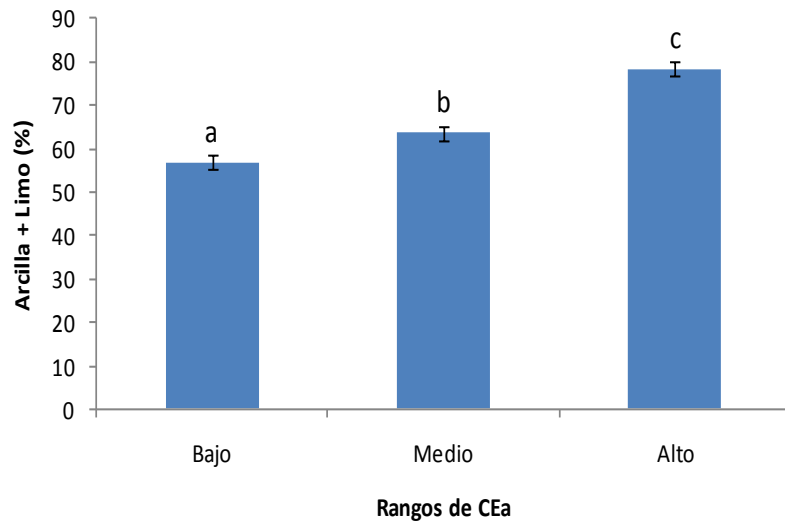


Fig. 33. Porcentaje de Arcilla+Limo para cada rango de Conductividad Eléctrica aparente. Letras distintas indican diferencias significativas entre rangos (Pr > F 0,0003).

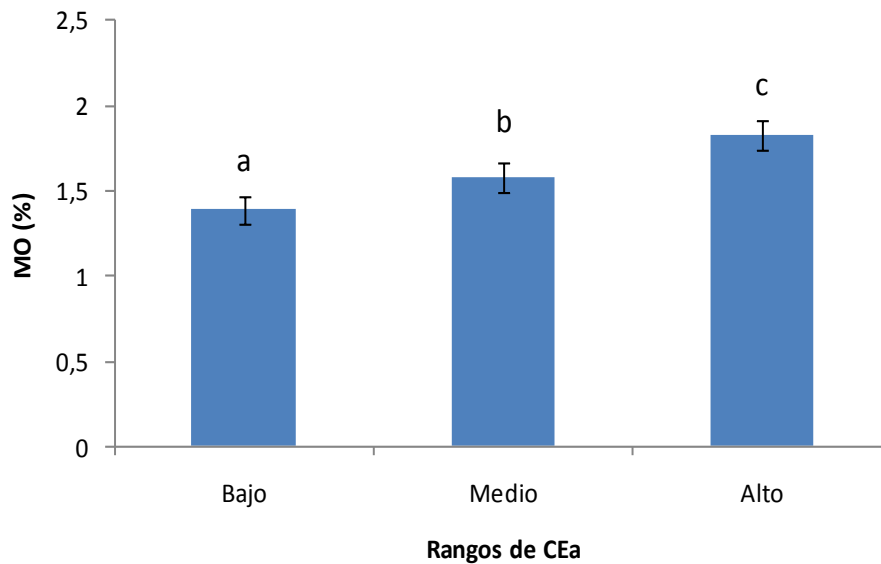


Fig. 34. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Materia Orgánica (%) a 0-90 cm. Letras distintas indican diferencias significativas entre rangos (Pr > F 0,0001).

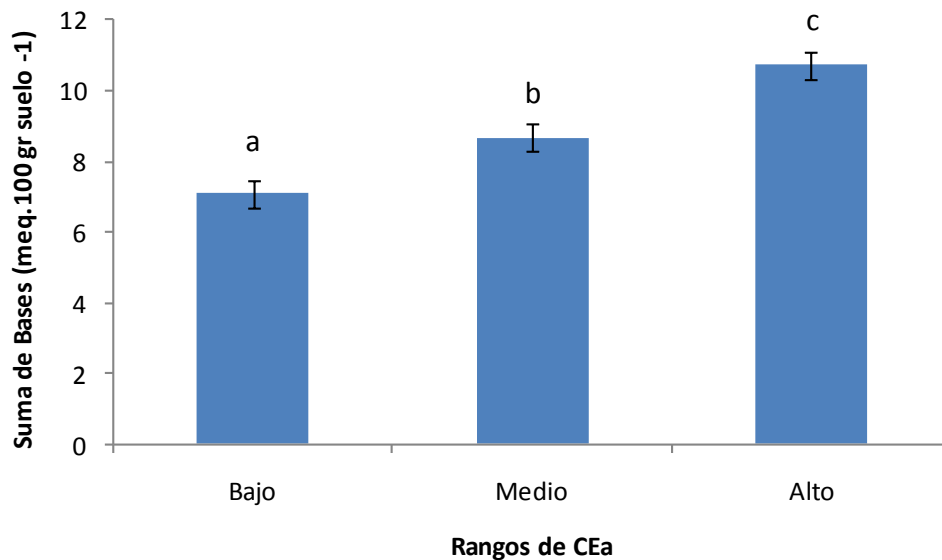


Fig. 35. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Suma de Bases (meq 100 gr suelo⁻¹) a 0-90 cm. Letras distintas indican diferencias significativas entre rangos (Pr > F 0,0001).

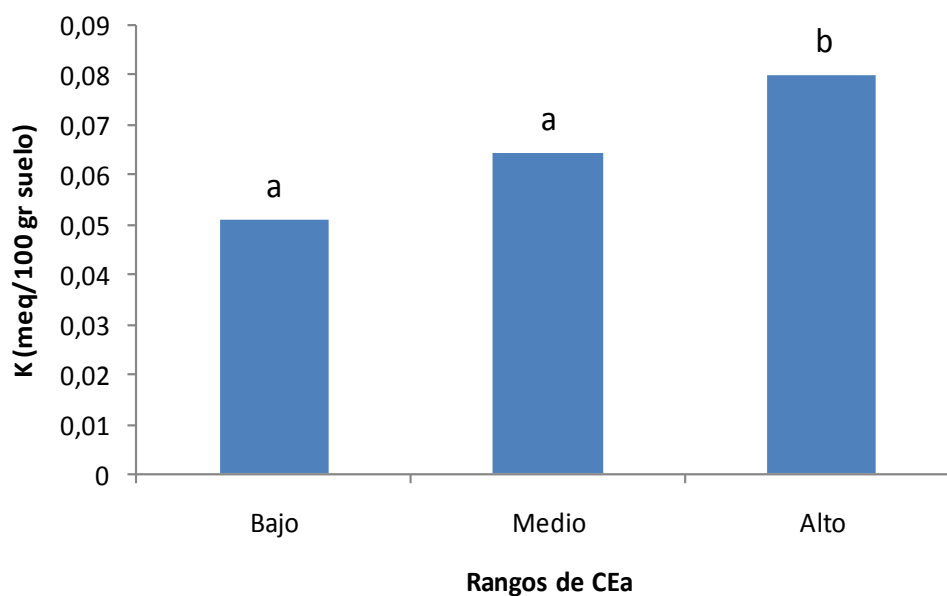


Fig. 36. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Potasio (meq 100 gr suelo⁻¹) a 0-90 cm. Letras distintas indican diferencias significativas entre rangos (Pr > F 0,01).

4.6.2.- Perugorria

Para esta localidad, el porcentaje de Arcilla+Limo presentó el mismo comportamiento que Mercedes, pero con diferencias menos marcadas entre rangos Bajo y Medio de CEa con respecto al rango Alto. A su vez esta variable avaló la división del Veris en 3 rangos de CEa (Fig. 37). La Suma de Bases fue otro parámetro que contribuyó a delimitar en las tres zonas de manejo este lote ($Pr > F$ 0,0001) manteniendo una tendencia creciente conforme aumenta el rango de CEa (Fig. 38). La CEe presentó un comportamiento similar al contenido de Arcilla+Limo y SB del suelo (Fig. 39). El contenido de K del suelo mostró un aumento en su contenido al pasar del rango Bajo al Medio de CEa donde mostró diferencias significativas entre ambos, en la zona alta de CEa cayó su valor y no mostró diferencias con el rango medio de CEa (Fig. 40). El Rendimiento del cultivo de maíz en cambio, delimitó solamente dos zonas de manejo agrupando los rangos Bajo + Medio y por otro lado Alto (Fig. 41). Si bien esta última variable aporta información para delimitar en zonas de manejo, está influenciada por otros parámetros, con lo cual se optó por agrupar los rangos de CEa apoyados por la información de variabilidad del suelo.

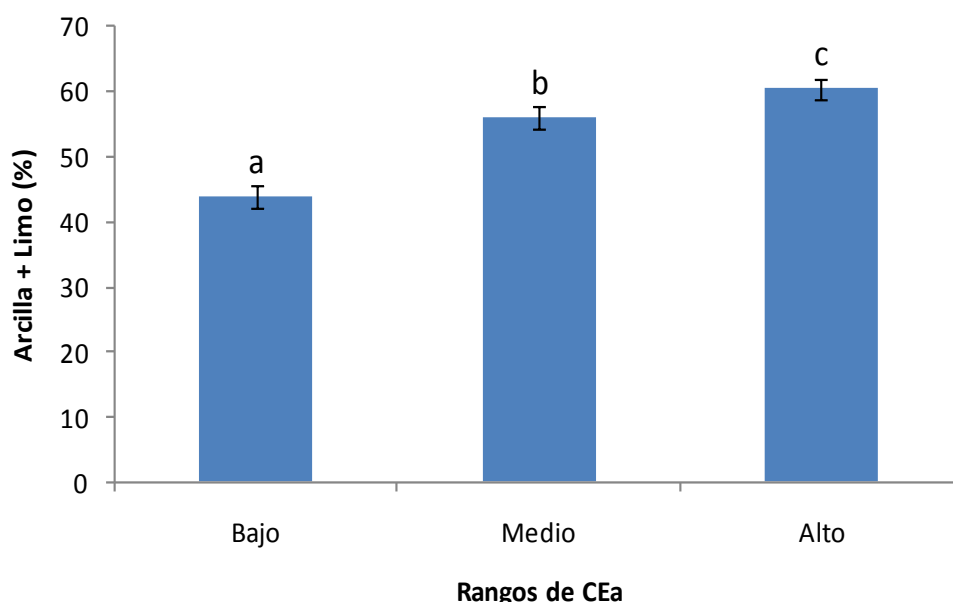


Fig. 37. Porcentaje de Arcilla+Limo para cada rango de Conductividad Eléctrica aparente. Letras distintas indican diferencias significativas entre rangos ($Pr > F$ 0,0003).

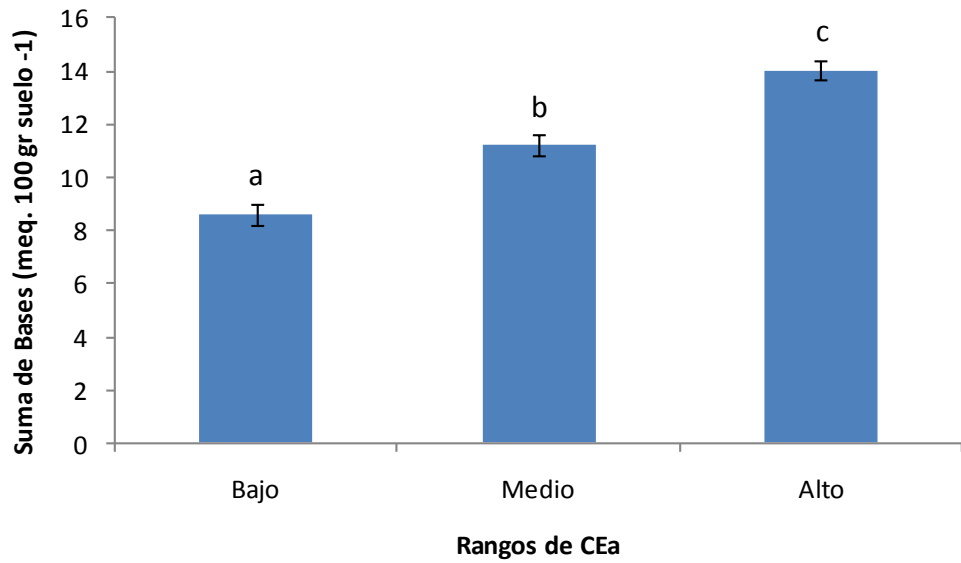


Fig. 38. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Suma de Bases (meq 100 gr suelo⁻¹) a 0-90 cm. Letras distintas indican diferencias significativas entre rangos (Pr > F 0,0001).

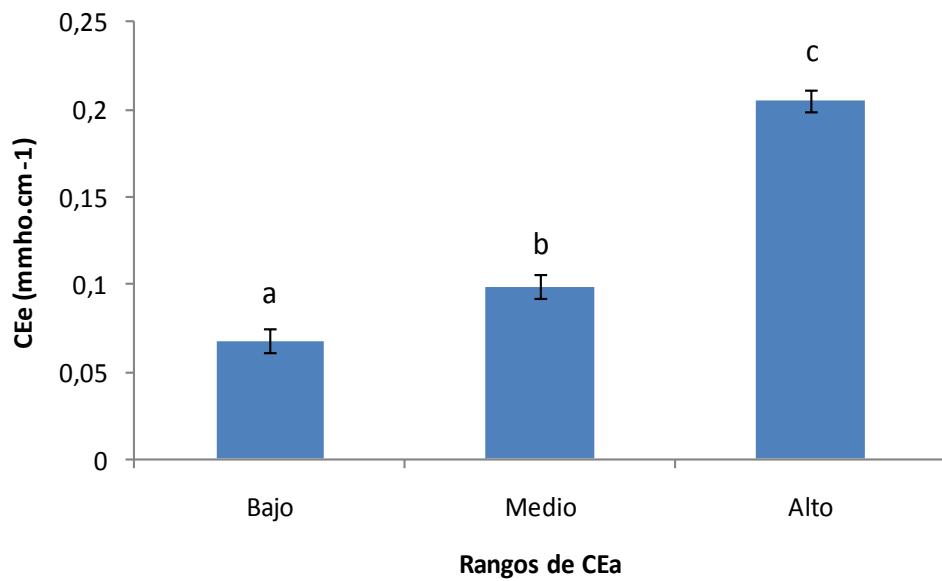


Fig. 39. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Conductividad Eléctrica del extracto de saturación (mmho cm⁻¹) a 0-90 cm. Letras distintas indican diferencias significativas entre rangos (Pr > F 0,0001).

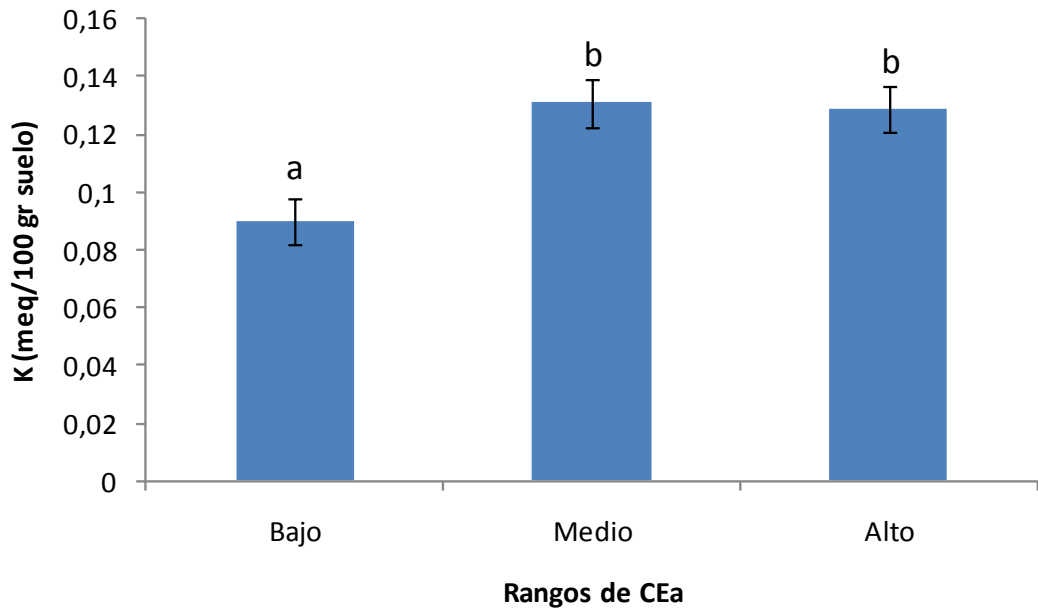


Fig. 40. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Potasio (meq 100 gr suelo⁻¹) a 0-90 cm. Letras distintas indican diferencias significativas entre rangos (Pr > F 0,01).

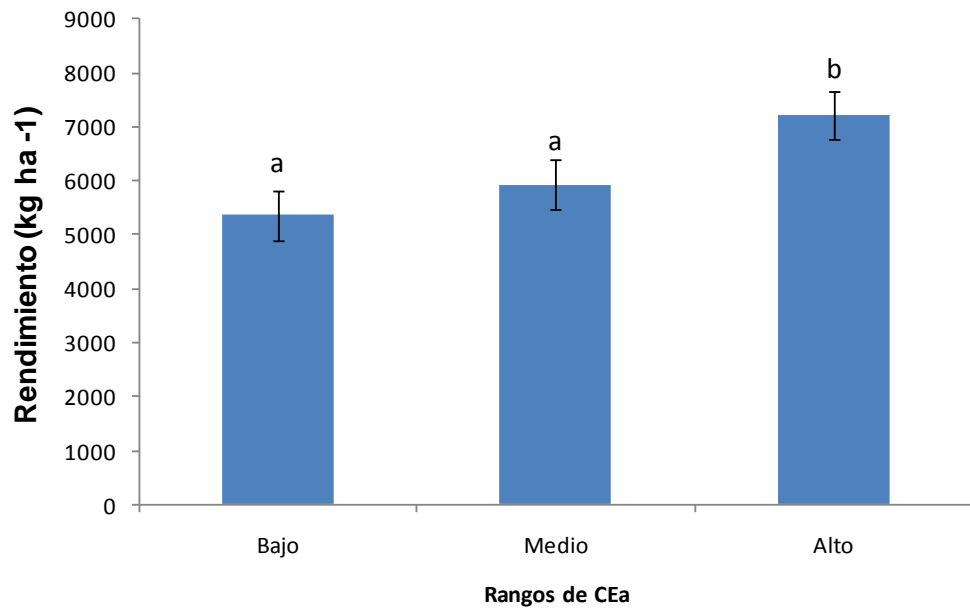


Fig. 41. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Rendimiento (Kg ha⁻¹). Letras distintas indican diferencias significativas entre rangos (Pr > F 0,001).

4.6.3.- El Sombrero

Para esta localidad, las únicas dos variables que cumplían con el requisito de correlación con la CEa mayor a $r = 0,70$ fueron contenido de P del suelo y pH. Para la primera variable, la tendencia en el contenido de P fue decreciente conforme aumentaba el rango de CEa, logrando una división en tres rangos (Fig. 42). El pH del suelo solamente halló diferencias significativas entre el rango Bajo versus el Medio+Alto de CEa (Fig. 43).

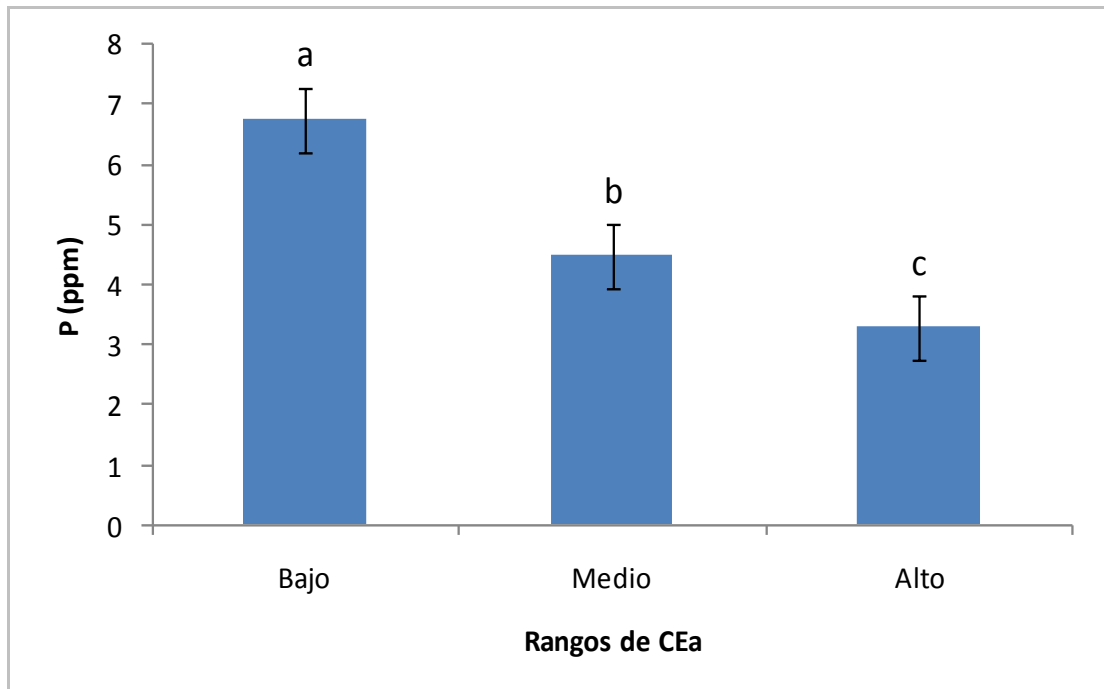


Fig. 42. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y Fósforo (ppm) a 0- 0-90 cm Letras distintas indican diferencias significativas entre rangos ($Pr > F 0,0001$).

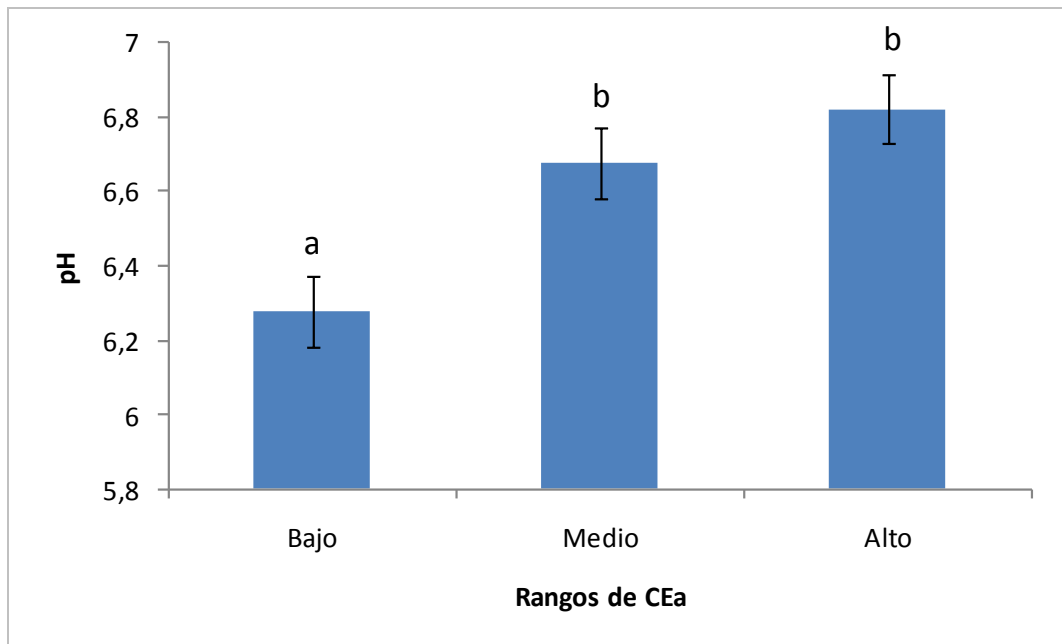


Fig. 43. Relación entre rangos de Conductividad Eléctrica aparente y pH a 0- 0-90 cm. Letras distintas indican diferencias significativas entre rangos ($Pr > F 0,01$).

La investigación realizada en este trabajo, avala la división y clasificación provista por el Veris 3100 en tres zonas de manejo sitio específico (Alta – Media – Baja CEa) para las tres localidades estudiadas. Con respecto a esto, Johnson *et al.* (2003) trabajaron en una región semi-árida buscando correlación entre parámetros de suelo y CEa superficial, ellos consiguieron dividir en cuatro rangos de CEa basados en el porcentaje de arcilla ($p \leq 0,05$). Schepers *et al.* (2004) trabajaron sobre un círculo de riego de pivot de 51 has., lograron dividir el lote en 4 zonas de manejo sitio específico a partir de las relaciones halladas entre MO ($p > F 0,03$), CEe ($p > F 0,0002$) y P ($p > F 0,0001$) para cada uno de los rangos de CEa. Bosh Mayol (2009) halló diferencia significativa entre rangos de CEa para Na^+ ($p < 0,05$), contenido de humedad ($p < 0,05$) y CEe ($p < 0,0001$), variables que le permitieron diferencias tres zonas de MSE en la provincia de Buenos Aires.

5.- Consideraciones finales

“La Textura presenta variabilidad espacial que puede ser detectada por la medición de CEa 0-90 cm”

La hipótesis se rechaza, ya que tanto para la localidad de Mercedes como Perugorría se hallaron relaciones significativas entre CEa y Porcentaje de Arcilla+Limo y Arena. A su vez estas variables fueron responsables de avalar la clasificación en tres rangos de CEa realizadas por el Veris 3100. No ocurrió lo mismo en El Sombrero.

“La Humedad del suelo presenta un patrón que se encuentra asociado a la CEa 0-90 cm”

La hipótesis se rechaza ya que los resultados hallados en este trabajo en general fueron muy dispares. Hubo muy poca variabilidad en el contenido de humedad del suelo asociada a los rangos de CEa por los que los valores de correlación fueron muy bajos (cerca de $r = 0,40$) o no significativos variando con el lote en estudio.

“Los parámetros químicos de suelo medidos (MO, pH, P, CE Extracto de saturación, Ca, Mg, Na, K y Suma de Bases) presentan variabilidad espacial asociada a la CEa 0-90 cm”

La hipótesis se rechaza ya que dependiendo de la localidad, algunas variables correlacionaron con la CEa y otras no.

“La Altimetría presenta un patrón de comportamiento inverso asociado a la CEa 0-90 cm”

La hipótesis se rechaza ya que en la Localidad de Mercedes se cumple esta hipótesis, mientras que en Perugorría el Veris presentó una relación directa con la altimetría.

“En condiciones de campo, la CEa 0-90 cm y el rendimiento del cultivo de maíz, tienen una distribución espacial que puede delimitar áreas de manejo sitio específico dentro de cada lote de producción”

La hipótesis se rechaza, ya que tanto para la localidad de Mercedes como Perugorría se hallaron relaciones entre Rendimiento y CEa, consecuencia de la asociación directa entre CEa y parámetros de suelo que definieron la productividad del cultivo de maíz. No ocurrió así para la El sombrero, donde no se halló relación entre estos parámetros.

6.- Conclusiones

En las condiciones de este estudio se confirma que los datos obtenidos para cada localidad poseen variabilidad espacial, y que la misma es cuantificable indirectamente mediante la medición de la CEa del suelo por medio del Sensor Veris 3100. La determinación del número de rangos de CEa, en los cuales un lote es separado con fines de muestreo o manejo, depende de la sensibilidad de la medida deseada y del nivel de la variabilidad intra lote. Este estudio avala la división y clasificación provista por el Veris 3100 en tres zonas de manejo sitio específico (Alta – Media – Baja) para cada una de las tres localidades estudiadas. Considerando que provee una base efectiva para delinear atributos de suelo interrelacionados, reflejando la heterogeneidad espacial y manifestando la practicidad de adopción por parte del productor a la hora de implementarlo.

7.- Perspectivas futuras

Los resultados obtenidos ameritan continuar con la línea de trabajo dado que se hallaron resultados satisfactorios en la identificación de zonas de manejo sitio específico por parte del SMD Veris 3100. Esta delimitación realizada coincide con variables de suelo reconocidas por el Sensor, que necesitan de una interpretación agronómica o de la realización de ensayos a posteriori para definir cuál es el manejo requerido en cada área delimitada. Por lo tanto; una primera propuesta a futuro sería realizar ensayos de dosis variables de fertilizantes dentro de cada uno de los rangos de CEa, con fines de comenzar a ajustar recomendaciones de fertilización por zonas de manejo (Potasio y Fósforo inicialmente por su deficiencia natural en el suelo). Sería necesario complementar este nuevo ensayo con un análisis del beneficio económico correspondiente a las dosis variables aplicadas. También sería interesante implementar cosechadoras con monitor de rendimiento y utilizarlos para complementar la información brindada por el Veris 3100, para ir ajustando en mayor medida la toma de decisiones.

8.- Bibliografía

Adhikari K., F. Carre, G. Toth and L. Montanarella. 2009. Site specific land management. General concepts and applications. European Commission. Joint Research Centre. Institute of Environment and Sustainability.

Ahn C. W., M. F. Baumgardner, L. L. Biehl. 1999. Delineation of soil variability using geostatistics and fuzzy clustering analyses of hyperspectral data. *Soil Sci. Soc. Am J.* 63:142-150.

Auerswald K; S. Simon and H. Stanjek. 2001. Influence of Soil Properties on Electrical Conductivity Under Humid Water Regimes. *Soil Science*. Volume 166 - Issue 6 - pp 382-390.

Bang J. 2005. Characterization of soil spatial variability for site specific management using soil electrical conductivity and other remotely sensed data. PhD Thesis. Faculty of North Carolina State University. Pp 274.

Banton O., M. K. Seguin and M. A. Cimon. 1997. Mapping field-scale physical properties of soil with electrical resistivity. *SSSA J.* 61(4): 1010-1017.

Bekele A., W. H. Hudnall, J. J. Daigle, J. A. Prudente, M. Wolcott. 2005. Scale dependent variability of soil electrical conductivity by indirect measures of soil properties. *Journal of Terramechanics* 42:339-351.

Bosh Mayol, M. 2009. Relación entre la variabilidad espacial de la Conductividad eléctrica y el contenido de sodio del suelo. Tesis para optar por el título de Ing. Agr. Facultad de Ciencias Agrarias, UN Mar del Plata, Balcarce, Argentina. 38 pp.

Bouma J. and P. A. Finke. 1993. Origin and nature of soil resource variability. pp. 3-14. In: PC Robert et al. (eds.) *Proc. Soil Specific Crop Manage.: A Workshop on Res. And Dev. Issues.* 14-16 April 1992. ASA. Madison WI.

Brady N. and R. Weil. 1998. *The Nature and Properties of Soil.* 12 th Edition. 881 pp. Prentice Hall (Upper Saddle River, N.J.)

Bronson K. F., J. D. Booker, S. J. Officer, R. J. Lascano, S. J. Maas, S. W. Searcy, J. Booker. 2005. Apparent electrical conductivity, soil properties and spatial covariance in the U. S. Southern High Plains. *Precision Agriculture* 6, 297-311.

Bullock D. S. and D. G. Bullock. 2000. Economic optimality of input application rates in precision farming. *Precis. Agric.* 2:71-101.

Cambardella C. A. and D. L. Carlen. 1999. Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture* 1, 5-14.

Cambardella C. A., T. B. Moorman, J. M. Novak, T. B. Parkin, D. L. Karlen and R. F. Turco. 1994. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1501-1511.

Carroll Z. L. and M. A. Oliver. 2005. Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity. *Geoderma* 128:354– 374.

Cockx L., M. van Meirvenne and B. de Vos. 2006. Using the EM38DD soil sensor to delineate clay lenses in a sandy forest soil. *Soil Sci. Soc. of Am. J.* 71:1314-1322.

Conti M. E. 2000. *Principios de Edafología Con énfasis en suelos argentinos.* 1ra Edición. Marzo 1998. Pp 360. 2da edición. Editorial Facultad de Agronomía. ISBN 950-43-9315-2

Corwin D. L. and S. M. Lesch. 2003. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: Theory, Principles, and Guidelines. *Agron. J.* 95:455–471.

Corwin D. L. and S. M. Lesch. 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity. Part II. Case study. *Computers and Electronics in Agriculture* 46:135–152.

Corwin D. L. and S. M. Lesch. 2005a. Apparent electrical conductivity measurement in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 46:11-43.

Corwin D. L., S. R. Kaffka, J. W. Hopmans, Y. Mori, J. W. van Groenigen, C. van Kessel. 2003. Assessment and field scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. *Geoderma* 114(3-4):231-259.

Corwin D. L., S. M. Lesch, P. J. Shouse, R. Soppe, J. E. Ayars. 2003a. Identifying Soil Properties that Influence Cotton Yield Using Soil Sampling Directed by Apparent Soil Electrical Conductivity. *Agron. J.* 95:352–364.

Cremers A. and Laudelout, H. 1966. Surface mobilities of cations in clays. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 30, 570-576.

Davis J. C. 1973. *Statistics and data analysis in geology.* John Wiley & Sons, New York.

Dinnes D. L., D. L. Karlen, D. B. Jaynes, T. C. Kaspar, J. L. Hartfield, T. S. Colvin and C. A. Cambardella. 2002. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained midwestern soils. *Agron. J.* 94:153-171.

Doolittle J. A., K. A. Sudduth, N. R. Kitchen, and S. J. Indorante. 1994. Estimating depth to claypans using electromagnetic induction methods. *J. Soil Water Cons.* 49(6): 572–575.

Escobar E., H. Ligier, R. Melgar, H. Matteo, O. Vallejos. 1996. Mapa de suelos de la provincia de Corrientes 1:500.000. EEA INTA – Corrientes.

ESRI. 2008. ArcGis 9.0 - Arc Map vers.9.3. Disponible en: <http://www.esri.com/>

Farahani H. J. and R. L. Flynn. 2007. Map Quality and Zone Delineation as affected by Width of Parallel Swaths of Mobile Agricultural Sensors. *Biosystems Engineering* 96 (2),151–159.

Farahani H. J., G. W. Buchleiter, M. K. Brodahl. 2005. Characterization of apparent electrical conductivity variability in irrigated sandy and non-saline fields in Colorado. *Transactions of the ASAE*, 48(1):155-168.

Fraisse C. W., K. A. Sudduth and N. R. Kitchen. 2001. Calibration of the Ceres-Maize model for simulating site-specific crop development and yield on clay pan soils. *Applied Engineering in Agriculture* 17(4):547-556.

Francis D. D. and J. S. Schepers. 1997. Selective soil sampling for site-specific nutrient management. In: Ed. J. V. Stafford. *Precision Agriculture '97*, 1st. European Conf on precision Agriculture. Proc. Warwick Univ. conf. Center, UK, 7-10 Sept 1997. SCI London, pp 119-126.

Franzen D. W., A. D. Halvorson and V. L. Hoffman. 2000. Management zones for soil N and P levels in the Northern Great Plains. In: PC et al. (ed.) *Proc. Int. Conf. on Prec. Agric*, 5th Bloomington MN. 16-19 July 2000. ASA, CSSA, SSSA. Madison WI.

Friedman S. P. 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 46:45–70.

Fritz R. M., D. D. Malo, T. E. Schumacher, D. E. Clay and C. G. Carlson. 1999. Field comparison of two soil electrical conductivity measurement systems. P 1211-1217. In: PC Robert et al. (ed.) *Precision Agriculture. Proc. Int. Conf.* 4th St. Paul MN. 19-22 July 1998. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI.

Gessler P. E., O. A. Chadwick, F. Chamran, L. Althouse and K. Holmes. 2000. Modeling soil landscape and ecosystem properties using terrain attributes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:2046-2056.

Giménez L. I. 2009. Predicción temporal y especial de las precipitaciones mensuales en Galicia. Tesis Doctoral. Universidade da Coruña. Pp 225.

Golden Software. 2001. Surfer, version 8. Golden, CO.

Google Earth, 2010. Disponible en: <http://www.earth.google.com/intl/es/>. Última visita Diciembre de 2010.

Grisso R. B., A. W. G. Mark, D. Holshouser, W. Thomason. 2007. *Precision Farming Tools: Soil Electrical conductivity*. Virginia Cooperative Extension. Pp 442-508.

Hanquet B., M. Frankinet, V. Parez, M. F. Destain. 2002. Mapping within-field soil variability for precision agriculture using electromagnetic induction. Ag. Eng. Budapest. EurAgEng. N°02-PA-004. Pp 8.

Hartsock N. J., T. G. Mueller, G. W. Thomas, R. I. Barnhisel, K. L. Wells and S. A. Shearer. 2000. Soil electrical conductivity variability. In. P. C. Robert et al. (eds.) Proc 5th International Conf. on prec. Agric. Madison WI, ASA, CSSA and SSSA.

Hawkins D. M. and N. A. C. Cressie. 1984. Robust Kriging –a proposal. Journal of the International Association of Mathematical Geology, 16:3-18.

Heiniger R. W., R. G. McBride and D. E. Clay. 2003. Using soil electrical conductivity to improve nutrient management. Agronomy J. 95:508-519.

Hezarjaribi A. and H. Sourell. 2007. Feasibility study of monitoring the total available water content using non-invasive electromagnetic induction-based and electrode-based soil electrical conductivity measurements. Irrigation and Drainage. Vol 55 (1) 53-65.

Humphreys M. T., W. R. Raun, K. L. Martin, K.W. Freeman, G. V. Johnson, M. L. Stone. 2004. Indirect Estimates of Soil Electrical Conductivity for Improved Prediction of Wheat Grain Yield. Communications in Soil Science and plant analysis. Vol. 35, Nos. 17 & 18, pp. 2639–2653.

Jaynes D. B. 1996. Improved Soil Mapping Using Electromagnetic Induction Surveys. Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, pp 169-179.

Jaynes D. B., T. S. Colvin and J. Ambuel. 1993. Soil type and crop yield determinations from ground conductivity surveys. ASAE papers N° 933552. 14-17 December. 1993. Chicago.

Jaynes D. B., J. M. Novak, T. B. Moorman and C. A. Cambardella. 1994. Estimating Herbicide partition coefficients from electromagnetic induction measurements. Journal of Environmental Quality 24:36-41.

Jaynes D. B., T. S. Colvin and J. Ambuel. 1995. Yield mapping by electromagnetic induction. pp 383-394. In P. C. Robert et al. (ed.) Proc. of site-specific management for agricultural systems. 2 nd. Minneapolis, MN 27-30 Mar. 1994. University of Minnesota Extension Service.

Johnson C. K., J. W. Doran, H. R. Duke, B. J. Wienhold, K. M: Eskridge, J. F. Shanahan. 2001. Field-scales electrical conductivity mapping for delineating soil condition. Soil Science Society of Am. J. 65(6): 1829-1837.

Johnson C. K., D. A. Mortensen, B. J. Wienhold, J. F. Shanahan, J. W. Doran. 2003. Site-Specific Management Zones Based on Soil Electrical Conductivity in a Semiarid Cropping System. Agron. J. 95:303–315.

Journel A. G. and C. J. Huibregts. 1978. Mining geoestistics. London: Academic Press. pp 600.

Jung W. K., N. R. Kitchen, K. A. Sudduth, R. J. Kremer and P. P. Motavalli. 2005. Relationship of apparent electrical conductivity to claypan soil properties. Soil Sci. Soc of am J. 69:883-892.

Kachanoski R. G., E. G. Gregorich, I. J. Van Wesenbeeck. 1988. Estimating spatial variations of soil water content using non-contacting electromagnetic inductive methods. Canadian Journal of Soil Science. 68(4): 715-722.

Kachanoski R.G.; E. de Jong; I. J. Van Wesenbeeck. 1990. Field scale patterns of soil water storage from non-contacting measurements of bulk electrical conductivity. Canadian J. Soil Sci. 70(3), 537-541.

Kaspar T. C., T. S. Colvin, D. B. Jaynes, D. L. Karlen, D. E. James and D. W. Meek. 2003. Relationship between six years of corn yields and terrain attributes. *Precis. Agric.* 4:87-101.

Kaspar T. C., D. Pulido, T. E. Fenton, T. S. Colvin, D. L. Karlen, D. B. Jaynes and D. W. Meek. 2004. Relationship of corn and soybean yield to soil and terrain properties. *Agron. J.* 96:700-709.

Khakural B. R., P. C. Robert and D. J. Mulla. 1996. Relating corn/soybean yield to variability in soil and landscape characteristics. In: P. C. Robert et al. (ed.) *Proc. 3rd Int'l. Conf. on Precision Agriculture*. Amer. Soci. Of Agron. Madison, WI.

Khakural B. R., P. C. Robert and D. R. Hugins. 1998. Use of non-contacting electromagnetic inductive method for estimating soil moisture across a landscape. *Communications in Soil Science Plant Analysis*. 29(11), 2055-2065.

King J. A., P. M. R. Dampney, M. Lark, T. R. Mayr and R. I. Bradley. 2001. Sensing soil spatial variability by electromagnetic induction (EMI): its potential in Precision Farming. In: Grenier, G., Blackmore, S. (eds.) *Proceedings of the 3rd European Conf. on Prec, Agric, Vol I, Agro, Montpellier*, pp 419-424.

Kitchen N. R. and K. A. Sudduth. 1996. Predicting crop production using electromagnetic induction. *Proceedings of Information agriculture Conference*.

Kitchen N. R., K. A. Sudduth and S. t. Drummond. 1998. An evaluation of methods for determining site-specific management zones. In: Ed. S. Dak, porc. North Central Extension Industry, soil Fertility Conf., Potash Institute, pp 133-139.

Kitchen N. R., K. A. Sudduth and S. T. Drummond. 1999. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils. *J. Prod. Agric.* 12:607-617.

Kitchen N. R., K. A. Sudduth and S. T. Drummond. 2000. Characterizing soil physical and chemical properties influencing crop yield using soil electrical conductivity.

In Second International Geospatial Information in Agriculture and Forestry Conference, Vol. 2: 122–131. Ann Arbor, Mich.: ERIM International.

Kitchen N. R., S. T. Drummond, E. D. Lund, K. A. Sudduth and G. W. Buchleiter. 2003. Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop system. *Agron. J.* 95:483-495.

Kitchen N. R., K. A. Sudduth, D. B. Myers, S. T. Drummond, S. Y. Hong. 2005. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Comp. Electron. Agric.* 46, 285–308.

Korsaeth A. 2005. Soil apparent electrical conductivity (ECa) as a means of monitoring changes in soil inorganic N on heterogeneous morainic soils in SE Norway during two growing seasons. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72. 213-227.

Kravchenko A. N. and D. G. Bullock. 2000. Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties. *Agron. J.* 92:75–83.

Kühn J., A. Brenning, M. Wehrhan, S. Koszinski, M Sommer. 2009. Interpretation of electrical conductivity patterns by soil properties and geological maps for precision agriculture. *Precision Agric* 10:490-507.

Lark R. M., H. C. Bolam, T. Mayr, R. I. Bradley, R. G. O. Burton and P. M. R. Dampney. 1999. Analysis of yield maps in support of field investigations of soil variation. pp 151-161. In: P. A. 1999. *Proc 2nd Euro Conf.* P. A. Stafford, J. V. (ed.) Sheffield Academic Press. Sheffield.

Lesch S. M. 2005. Sensor-directed response surface sampling designs for characterizing spatial variation in soil properties. *Comp. Electron. Agric.* 46, 153-179.

Lesch S. M., D. J. Strauss and J. D. Rhoades. 1995. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques: I. Statistical prediction models: A comparison of multiple linear regression and cokriging. *Water Resour. Res.* 31:373-386.

Lesch S. M., D. J. Strauss and J. D. Rhoades. 1995a. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques: II. An efficient spatial sampling algorithm suitable for multiple linear regression model identification and estimation. *Water Resour. Res.* 31.387-398.

Lilienthal H., Ch. Itter, J. Rogasik, E. Schnug. 2005. Comparison of different geo-electric measurement techniques to detect in field variability of soil parameters. *Landbauforschung Völkenrode* 4 (55): 237-243.

Long D. S. 1998. Spatial auto-regression modeling of site-specific wheat yield. *Geoderma* 85:181-197.

Lopez Valiente S. 2008. Utilización de silos de sorgo en Sistemas de Cría: Engorde de Vacas. Noticias y Comentarios INTA Mercedes. N° 438. ISSN N°0327-3059.

Lück E., J. Rühlmann and U. Spangenberg. 2005. Physical background of soil EC mapping: laboratory, theoretical and field studies in Stafford, J. V. Proc 5th Eur. Conf. Prec. Agric. Uppsala, Sweden, June 9-12, 2005. Pp 417-424.

Lund E. D. and C. D. Christy. 1998. Using electrical conductivity to provide answers for precision farming. Proceedings of the First International Conference Geospatial Information in Agriculture and Forestry. Orlando Florida 1998.

Lund E. D., C. D. Christy and P. E. Drummond. 1999. Practical applications of soil electrical conductivity Mapping. Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture July 1999.

Lund E. D., M. C. Wolcott and G. P. Hanson. 2001. Applying nitrogen site-specifically using soil electrical conductivity maps and precision agriculture technology. 2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy, Potomac MD, October 14-18, 2001.

Machado P. L. O. A.; A. C. C. Bernardi; L. I. O. Valencia; J. P. Molin; L. M. Gimenez; C. A. Silva; A. G. A. Andrade; B. E. Madari; M. S. P. M. Meirelles. 2006. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.41, p.1023-1031.

MacMillan R. A., W. W. Pettapiece, L. D. Watson and T. W. Goddard. 1998. A landform segmentation model for precision farming. In: PC Robert et al. (Eds.) Proceeding of the 4th Int. Conf. On Prec. Agric. St. Paul. MN, 19-22 July 1998. ASA, CSSA, SSSA, Madison WI. pp 1335-1346.

Malicki M. A. 1999. Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. Eur. J. Soil Sci. 50:505-514.

Mallarino A. P., E. S. Oyarzabal and P. N. Hinz. 1999. Interpreting within field relationships between crop yields and soil plant variables using factor analysis. Precision Agriculture 1, 15-25.

Mallarino A. P. and D. J. Wittry. 2004. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH and organic matter. Prec. Agric. 5:131-144.

Martin N. F., G. Bollero and D. G. Bullock. 2005. Associations between field characteristics and soybean plant performance using canonical correlation analysis. Plant and Soil 273:39-55.

Martinez G. and K. Vanderlinden. 2007. Análisis del la relación espacial entre la humedad gravimétrica del suelo y la conductividad eléctrica aparente. En: Tendencias Actuales de la Ciencia del suelo. N. Bellinfante & A. Jordán (eds.); Sevilla. Pág. 29-36.

Matheron G. 1971. The theory of regionalized variables and its applications. Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fountoinebleau. v5.

McBride R. A., A. M. Gordon and S. C. Shrive. 1990. Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. SSSA J. 54: 290–293.

McCutcheon M. C., H. J. Farahani, J. D. Stednick, G. W. Buchleiter and T. R. Green. 2006. Effect of Soil Water on Apparent Soil Electrical Conductivity and Texture Relationships in a Dryland Field. Biosystems Engineering 94 (1), 19–32.

McNeill, J. D. Electrical conductivity of soils and rocks. 1980. Tech. Note TN-5. Geonics Ltd., Mississauga, ON.

McNeill J. D. 1992. Rapid, accurate mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters. In. Topp, G. C., Reynolds, W. D., Green R. E. (eds.) Advances in Measurements of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice. Spec. Publ. 30. SSSA, Madison, WI, 209-229.

Mertens F. M., S. Pätzold and G. Welp. 2008. Spatial Heterogeneity of soil properties and its mapping with apparent electrical conductivity. J. Plant Nutr. Soil Sci. 171:146-154.

Molin J. P. and C. Nunes de Castro. 2008. Establishing management zones using soil Electrical conductivity and other soil Properties by the fuzzy clustering technique. Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.), v.65, n.6, p.567-573.

Moore I. D., P. E. Gessler, G. A. Nielsen, G. A. Peterson. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. Soil Sci. Soc. Am J. 57:443-452.

Morales L. A. 2004. Análisis estadísticos y geoestadísticos en diferentes estádios de algunas propiedades de un suelo bajo cultivo de arroz. Tesis Doctoral – Universidade da Coruña, Facultad de Ciencias Área de Edafología y Química Agrícola. pp 469.

Morari F., A. Castrignano and C. Pagliarin. 2009. Application of multivariate geostatistics in delineating management zones within a gravelly vineyard using geo-electrical sensors. Computers and Electronics in Agriculture 68:97–107

Morgan C. L. S., J. M. Norman, R. P. Wolkowski, B. Lowery, G. D. Morgan and R. Schuler. 2001. Two approaches to mapping plant available water: EM38 measurements and inverse yield modeling. In P. C. Robert et al. (ed.) Precision Agriculture. Proc. Int. Conf. 5 th, Minneapolis, MN. 16-19 July 2000. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI.

Mueller T. G., N. J. Hartsock, T. S. Stombaugh, S. A. Shearer, P. L. Cornelius and R. I. Barnhisel. 2003. Soil Electrical Conductivity Map Variability in Limestone Soils Overlain by Loess. Agron. J. 95:496–507.

Nugteren W. A., D. D. Malo, T. E. Schumacher, J. A. Schumacher, C. G. Carlson, D. E. Clay, S. A. Clay, K. J. Dalsted and M. M. Ellsbury. 2000. Hillslope chronosequence of electromagnetic induction readings as influenced by selected soil properties. In: Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture (Robert PC, Rust RH; Larson WE eds.) (unpaginated CD-ROM) ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI. USA.

Omonode R. A. and T. J. Vyn. 2006. Spatial dependence and relationships of electrical conductivity to soil organic matter, phosphorus and potassium. *Soil Science* Vol. 171 N°6. 223-238.

Ovalles F. A., and M. E. Collins. 1986. Soil landscape relationships and soil variability in north central Florida. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:401-408.

Pennock D. J. and E. de Jong. 1990. Spatial pattern of soil redistribution in boroll landscapes, southern Saskatchewan, Canada. *Soil Sci.* 150:867-873.

Rhoades J. D. and D. L. Corwin 1991. Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:255-260

Rhoades J. D., P. A. Raats and R. J. Prather. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40:651-655.

Rhoades J. D., N. A. Manteghi, P. J. Shouse and W. J. Alves. 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53:344-439.

Rhoades J. D., F. Chanduvi and S. Lesch. 1999. Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical measurements. *FAO Rep. 57.* FAO, Rome.

Ruffo M., G. A. Bollero, D. S. Bullock and D. G. Bullock. 2006. Site specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Prec. Agric.* 7:327-342.

Samper F. J. y J. Carrera. 1990. *Geostatística: Aplicaciones en Hidrología subterránea.* Centro Internacional de Métodos numéricos en Ingeniería, Barcelona. Pp 484.

Šarec O.; P. Šarec and V. Prosek. 2002. Measuring of soil electrical conductivity for mapping of spatial variability of soil properties within a field. *Res. Agr. Eng.*, 48 (4): 131–136.

SAS Institute. *The SAS system for Windows.* Release 9.2. Cary, NC: SAS Institute; 2009.

Scheinost A., W. Sinowski and K. Auerswald. 1997. Regionalisation of soil water retention curves in a highly variable soilscape. I. Developing a new pedotransfer function. *Geoderma* 78:129-143.

Schepers A. R., J. F. Shanahan, M. A. Liebig, J. S. Schepers, S. Johnson and A. Luchiari Jr. 2004. Appropriateness of Management Zones for Characterizing Spatial Variability of Soil Properties and Irrigated Corn Yields across Years. *Agron. J.* 96:195–203.

Sheets K. R. and J. M. H. Hendrickx. 1995. Noninvasive soil water measurement using electromagnetic induction. *Water Resources Research* 31(10): 2401–2409.

Siqueira G. M. 2009. Medida de La Conductividad eléctrica aparente Del suelo por Induccion electromagnética y Variabilidad espacial de Propiedades Físicas y Químicas del Suelo. Universidad de Santiago de Compostela, Escuela Politécnica Superior Departamento de Ingeniería Agroforestal. pp 181.

Sparks D. L., A. L. Page, P. A. Helmke, R. A. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston and M. E. Sumner. 1996. *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods*. 3rd Ed. ASA. Madison, Wisconsin, USA.

Stroh J. C., S. Archer, J. A. Doolittle, L Wilding. 2001. Detection of edaphic discontinuities with ground-penetrating radar and electromagnetic induction. *Landscape Ecology* 16: 377–390.

Sudduth K. A., N. R. Kitchen, D. F. Hughes, and S. T. Drummond. 1995. Electromagnetic induction sensing as an indicator of productivity on claypan soils. In *Proc. Site-Specific Management for Agricultural Systems*, 671–681. Robert, Rust, and Larson, eds. Madison, Wisc.: ASA-CSSA-SSSA.

Sudduth K. A., S. T. Drummond, S. J. Birrel and N. R. Kitchen. 1996. Analysis of spatial factors influencing crop yield. In *proceedings of the 5th Int. Conf. on Prec. Agric.* In: PC Robert, R. H. Rust and W. E. Larson (ASA, CSSA Madison WI, USA). Pp 129-139.

Sudduth K. A., N. R. Kitchen and S. T. Drummond. 1999. Soil conductivity sensing on claypan soils: comparison of electromagnetic induction and direct methods, pp 971-990. In: P. C. Robert et al., (ed.) *Proc 4th International Conf. on Prec. Agric.* ASA Misc. Publ. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI.

Sudduth K. A., N. R. Kitchen, G. A. Bollero, D. G. Bullock, W. J. Wiebold. 2003. Comparison of Electromagnetic Induction and Direct Sensing of Soil Electrical Conductivity. *Agron. J.* 95:472–482.

Sudduth K. A., N. R. Kitchen, W. J. Wiebold, W. D. Batchelor, G. A. Bollero, D. G. Bullock, D. E. Clay, H. L. Palm, F. J. Pierce, R. T. Schuler, K. D. Thelen. 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture* 46:263–283.

Taylor J. C., G. A. Wood, R. Earl, R. J. Godwin. 2003. Soil factors and their influence on within-field crop variability, part II: Spatial analysis and determination of management zones. *Byosyst. Eng.* 84(4):441-453.

Timlin D. J., Y. A. Pachepsky, V. A. Snyder and R. B. Bryant. 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:764-773.

Trimble Navigation Limited. 2008. Disponible en: <http://www.trimble.com>. Última visita Octubre de 2010.

Udayakantha W. A. V., M. Van Meirvenne, D. Simpson, L. Cockx and J. De Baerdemaeker. 2008. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. *Geoderma* 143:206-215.

Van Alpen B. J. and J. J. Stoorvogel. 1998. A methodology to define management units in support of an integrated, model-based approach to precision agriculture. In: PC Robert et al. (eds.) *Proceeding of the 4th Int. Conf. on Prec. Agric.* St. Paul, MN, 19-22 July 1998. ASA, CSSA, SSSA. Madison WI. Pp 1267-1278.

Van Uffelen C. G. R., J. Verhagen, J. Bouma. 1997. Comparison of simulated crop yield patterns for site-specific management. *Agric. Syst.* 54:207-222.

Veris Technologies. 2001. Frequently asked questions about soil electrical conductivity. Disponible en: <http://www.veristech.com>. Veris Technologies, Salina. KS. Última visita: Noviembre de 2009.

Verity, G. E. and D. W. Anderson. 1990. Soil erosion effects on soil quality and yield. *Can J. Soil Sci.* 70:471-484.

Vieira S. R. 2000. Geoestadística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novaris, R. F., V. H. Alvarez and G. R. Schaefer (ed.) *Tópicos em Ciencia do solo*. Vicosá; Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo, v1, pp 1-54.

Vieira S. R., J. Millete, G. C. Topp and W. D. Reynolds. 2002. Handbook for geoestatistical analysis of variability in soil and climate data. In: Alvarez V. V. H., C. E. G. R. Schaefer, N. F. Barros, J. W. V. Mello and J. M. Costa. *Tópicos em Ciencia do solo*. Vicosá; Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo, v2, pp 1-45.

Vitharana U. W. A., M. Van Meirvenne, L. Cockx and J. Bourgeois. 2006. Identifying potential management zones in a layered soil using several sources of ancillary information, *Soil Use and Management* 22:405-413.

Vitharana, U. W. A., M. Van Meirvenne, D. Simpson, L. Cockx, J. De Baerdemaeker. 2008. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess área. *Geoderma* 143. 206-215.

Williams B. G. and D. Hoey, 1987. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay contents of soils. *Aust. J. Soil Res.* 25, 21-27.

Zhang N., M. Wang and N. Wang. 2002. Precision Agriculture - a worldwide overview. Research center for precision Agriculture, China Ag. University, People's Republic of China.