UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RELACIÓN ENTRE EL RENDIMIENTO DE SOJA DE SEGUNDA Y LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LOS ATRIBUTOS EDÁFICOS DENTRO DE UNA MISMA CHACRA

por

Francisco BOSCH RODRIGUEZ
Felipe LECUEDER FILIPPI

TESIS presentada como uno de los requisitos para obtener el título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2011

Tesis aprobada por:

Director _____
Ing. Agr. Oswaldo Ernst

_____
Ing. Agr. Mónica Cadenazzi

_____
Ing. Agr. Guillermo Siri-Prieto

Fecha: 19 de diciembre de 2011

Autor: _____
Francisco Bosch Rodríguez

_____
Felipe Lecueder Filippi

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias y amigos.

TABLA DE CONTENIDO

Página

PÁGINA DE APROBACIÓN……. II
AGRADECIMIENTOS……..... III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES…….. VII

1. INTRODUCCIÓN……..... 1

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA…… 3
2.1. VARIABILIDAD EN LA CHACRA…….……. 3
2.1.1. Determinantes de la variabilidad espacial…… 4
2.2. AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y MANEJO SITIO-ESPECÍFICO 5
2.2.1. Experiencias en agricultura de precisión…… 5
2.2.2. Ambientes edáficos…… 7

2.3. MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD…… 7
2.3.1. Monitor de rendimiento…….. 7
2.3.2. Muestreo de suelos…… 8
2.3.3. Análisis de clusters y CART……. 9
2.3.4. Análisis geoestadístico…….. 10
2.4. RELACIÓN del RENDIMIENTO CON PROPIEDADES DEL SUELO 13
2.4.1. Topografía…… 13
2.4.2. Propiedades del suelo…… 14
2.4.2.1. Propiedades físicas…… 15
2.4.2.2. Propiedades químicas…… 16
2.5. IVND COMO HERRAMIENTA……. 20
2.5.1. Definición de IVND y su capacidad para definir zonas de manejo…….. 20
2.5.2. IVND como estimador de rendimiento…….. 21

3. MATERIALES Y MÉTODOS…… 23
3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENSAYO…… 23
3.1.1. Descripción del sitio de muestreo…….. 23
3.1.2. Manejo del cultivo……. 26
3.2. DETERMINACIONES…… 26

3.2.1. Mapa de rendimiento…… 28
3.2.2. Índice de verde (IVND) …… 28
3.2.3. Registros climáticos…… 28

3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO…… 28
3.3.1. Estadística descriptiva…… 28
3.3.2. Definición de zonas…… 28
3.3.3. Análisis espacial…… 29
3.3.4. Relación entre atributos edáficos y comportamiento del cultivo 30

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN…… 31
4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA…… 31
4.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DE LAS VARIABLES…… 32
4.2.1. Descripción de todas las variables…… 32
4.2.2. Descripción estadística de las variables por ambientes preestablecidos…… 33
4.2.2.1. Atributos edáficos por ambiente pre-establecido…… 35
4.2.2.2. CAAD del perfil, CAAD por horizonte y % C orgánico….. 36
4.2.3. Descripción de las variables por grupo ambiente-suelo…… 39
4.2.3.1. Profundidad del suelo, textura y capacidad de almacenar agua disponible (mm) …… 40
4.2.3.2. Textura…… 41
4.2.3.3. CAAD del perfil y por horizonte (mm) …… 42
4.2.3.4. Fertilidad del horizonte A…… 43
4.2.3.5. Rendimiento de soja (kg/ha) según grupo ambiente-suelo…… 46
4.2.3.6. Índice de verde normalizado (IVND) en estadio R5…… 47
4.2.4. Contingencia entre ambientes pre-establecidos y grupos ambiente-suelo…… 49
4.2.5. Análisis de correlaciones…… 51
4.2.6. Análisis de árboles de clasificación y regresión…… 53
4.2.6.1. Árbol de regresión y clasificación para IVND…… 53
4.2.6.2. Árbol de regresión y clasificación para rendimiento… 54

5. CONCLUSIONES…… 57

6. RESUMEN…… 59

7. SUMMARY…… 61

8. BIBLIOGRAFÍA…….. 62

9. ANEXOS…… 67

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No. Página

1. Propiedades químicas por horizonte en dos Brunosoles del Uruguay…… 17

2. Descripción de los grupos de suelos CONEAT…….…….…….. 23

3. Resumen de manejo agronómico…….…….……...…….…… 26

4. Indicadores de posición y dispersión de las variables relevadas 32

5. Rendimiento en grano de soja de segunda (kg/ha) según "Ambiente A", "Ambiente D" y "Ambiente B"…..…….…… 33

6. Profundidad del perfil del suelo (cm) hasta el material madre según ambiente preestablecido…….…….…….…….…… 35

7. Capacidad de almacenar agua disponible (CAAD) del perfil, por horizonte y % C orgánico según ambiente…….…….. 36

8. Significancia entre ambientes para las variables más importantes…….…….…….…….…….…….…….…… 38

9. Profundidad total del suelo y de cada horizonte (cm) por grupos…….…….…….…….…….…….…….…….…… 40

10. Capacidad de almacenaje de agua disponible en el perfil y en cada horizonte (mm).…….…….…….…….…….…… 42

11. Concentración de carbono orgánico (%) en el horizonte A…... 43

12. pH $_{H2}$O y pH KCl por grupo…….…….…….…….…….. 44

13. Rendimiento de soja (kg/ha) según grupo…….…….…… 46

14. Índice de verde normalizado (IVND) en estadio R5…….. 47

15. Tabla de contingencia para ambientes pre-establecidos y grupos ambiente-suelo…… 49

16. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables más relevantes…… 52

Figura No.

1. Factores que afectan la productividad de los cultivos……. 4

2. Ejemplos de semivariogramas y sus parámetros…… 12

3. Ubicación del muestreo en la chacra y ambientes predefinidos. 25

4. Precipitaciones mensuales Octubre 2010 a Mayo 2011 (Erro, Media Lucha, Dolores), serie histórica 1980-2009 (INIA) y ciclo fenológico del cultivo…… 31

5. Rango de variación del rendimiento de soja de segunda (kg/ha) según ambiente preestablecido……. 34

6. Variabilidad en la profundidad del perfil del suelo dentro y entre ambientes de producción pre-establecidos…….. 36

7. Mapa interpolado para profundidad total del perfil del suelo y del horizonte A (cm), % carbono orgánico, CAAD en el perfil (mm) y elevación (m)…… 39

8. Rango de variación de la concentración de carbono orgánico (%) en el horizonte A por grupo……. 43

9. Rendimiento de soja (kg/ha) según grupo…….. 47

10. Índice de verde normalizado (IVND) en estadio R5…….……. 48

11. Mapa de rendimiento (izquierda) e IVND (derecha) interpolados…….…….…….…….…….…….…….…...…….…….… 49

12. Concordancia entre mapa de grupos ambiente-suelo (derecha) y mapa de ambientes pre-establecidos (izquierda).. 51

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de producción agrícolas de Uruguay presentan el desafío constante de aumentar los niveles de producción en respuesta a una creciente demanda de la población mundial por alimentos. El camino para lograrlo no solo debe ser la expansión en superficie sino que se debe incrementar el rendimiento y productividad por unidad de superficie.

Esto se debe lograr en un ambiente de alta variabilidad espacial y temporal al que son sometidos los cultivos. El desafío es determinar el origen y magnitud de dicha variabilidad, entender cuáles son las variables que definen el potencial y qué manejo se debe incorporar para contemplar y manejar esas limitantes.

El manejo de cultivos diferenciado por las características del ambiente de producción, comúnmente llamado agricultura de precisión, tiene como objetivos reducir costos en la producción de granos, aumentar la productividad y hacer un uso más eficiente de los insumos (Bongiovanni, 2004a) de forma de asociar determinadas medidas de manejo o secuencias de cultivos a zonas con potenciales de producción y limitantes similares.

Tradicionalmente en Uruguay esta asociación estuvo definida por la unidad de potrero y el potrero asociado a variables cualitativas como la historia de chacra y el cultivo antecesor, pero con atributos edáficos variables.

En los últimos años se ha generalizado la definición de zonas con rendimientos homogéneos definidas a partir del estudio de la variabilidad espacial y temporal del rendimiento de los cultivos. Para ellos se utilizan cosechadoras equipadas con monitores de rendimiento que registran la información de manera georeferenciada, pero no se incluye información de atributos del suelo que explique el comportamiento diferencial de los cultivos entre zonas. Esto podría ser

una de las causas que expliquen la falta de concordancia de las diferencias entre zonas de manejo y el comportamiento de los cultivos entre años.

El presente trabajo se planteó con el objetivo de determinar las zonas (ambientes) dentro de una chacra con igual historia de manejos a partir de atributos edáficos y analizar la relación de éstos con la respuesta vegetal.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 VARIABILIDAD EN LA CHACRA

La agricultura en el Uruguay se realiza en un ambiente de alta variabilidad climática y de atributos edáficos. Esa variabilidad se refleja en términos de respuesta vegetal dentro de una misma chacra.

Las características del suelo y del cultivo varían en el espacio (distancia y profundidad) y en el tiempo. La variación espacial se expresa en diferencias de producción en un mismo campo, en una misma zafra y en una misma cosecha (Mantovani et al. 2006, Roel y Terra 2006c).

Según Mulla y Scheppers, citados por Bongiovanni (2004a) la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y de la productividad de los cultivos es la norma más que la excepción. A pesar de ello Terra et al. (2010a) establecen que es generalizado el manejo uniforme de los cultivos, generando ineficiencias económicas y ambientales.

De acuerdo con Hatfield, citado por Plant (2001) un sistema productivo está afectado por diversos factores pero la variación que existe intrachacra puede ser dividida en tres clases:

1- Natural, como la variación de tipo de suelo, procesos de formación y topografía

2- Aleatoria, como las precipitaciones

3- Manejable, como la fertilización o la densidad de siembra.

La interacción entre estas tres marcan las diferencias productivas entre distintos sitios específicos en una misma chacra (Bongiovanni, 2004a).

2.1.1 Determinantes de la variabilidad espacial

Una vez encontrada la variabilidad se debe establecer una estrategia para manejarla. Desde el punto de vista técnico y económico, el cultivo se debe manejar según aquellas variables que tengan un alto efecto en la productividad, presenten mayor variabilidad y explican en mayor medida esa variabilidad en el rendimiento, siempre y cuando puedan ser controladas (Plant, 2001).

Plant (2001) propone que si el factor primario que afecta el rendimiento es una variable manejable, entonces se puede ingresar en un sistema para levantar esa limitante. El problema radica cuando las limitantes son estructurales de la chacra o cuando existen distintos factores que limitan el rendimiento.

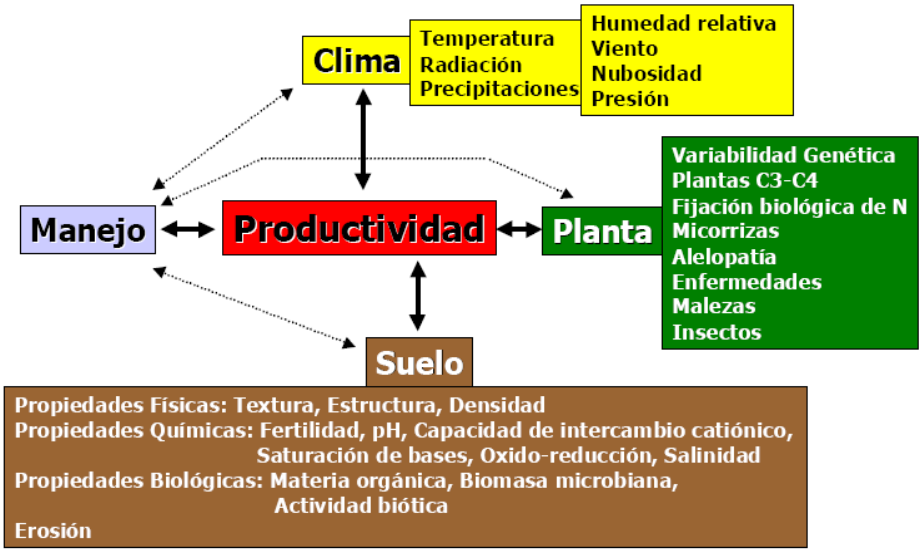


Figura No. 1 Factores que afectan la productividad de los cultivos (Fageria et al., citados por García, 2002).

En la Figura No. 1 se presentan todos los factores que afectan el rendimiento de los cultivos. Se encuentran los que definen el potencial de rendimiento como el genotipo, la radiación solar y la temperatura ambiente; los que determinan el rendimiento lograble, como el agua y

nutrientes; y finalmente los reductores como malezas, enfermedades y plagas, que definen el rendimiento logrado (Soldini, citado por Otaño y Zarucki, 2010).

Las propiedades atribuibles al suelo según esquematizados en la Figura No. 1 representan atributos fisiográficos estables, que generan la variabilidad natural intrínseca de la chacra. El clima representa la variabilidad aleatoria temporal que afecta la productividad de la chacra. Finalmente, las medidas de manejo pueden generar variabilidad dentro de la chacra (fertilización, densidad de siembra, rotación) clasificándose como inducida o manejable.

2.2 AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y MANEJO SITIO-ESPECÍFICO

La agricultura de precisión puede ayudar a generar una producción de cereales amigable con el ambiente. Utilizando información específica de cada sitio en la chacra, se puede definir niveles óptimos de fertilización, semilla y agroquímicos utilizándolos en el lugar y momento correctos (Bongiovanni y Lowenberg-Deboer, 2004b).

Este cambio de paradigma implica sustituir insumos por la aplicación de información y conocimiento agronómico, buscando alcanzar un potencial que aproxime el óptimo biológico al económico (Bongiovanni y Lowenberg-Deboer, 2004b).

La agricultura de precisión debe medir la variabilidad, generar información y aplicarla en función de la misma. Por ello es importante identificar, cuantificar y mapear esa variabilidad, para poder manejar las chacras según sus limitantes eliminando del sistema el manejo promedio (Mantovani et al., 2006).

2.2.1 Experiencias en agricultura de precisión

El principal objetivo del manejo sitio-específico es identificar el factor que afecta el rendimiento en primer lugar, siendo esa la principal limitante del sitio (Plant, 2001).

Para ello se utilizan herramientas que permiten la obtención y análisis de datos georeferenciados para realizar los diagnósticos de cultivos y suelos, mejorando la toma de decisiones y la eficiencia en el uso de los recursos. El manejo uniforme de los cultivos y la aplicación de insumos promedio en la chacra disminuye la eficiencia de uso de los mismos ya que las zonas no presentan los mismos requerimientos ni expresan la misma respuesta (Mulla y Scheppers, citados por Plant, 2001).

El manejo sitio-específico se ha transformado en un manejo en zonas (ambientes), delineadas a través del análisis de información surgido de monitores de rendimiento y diseñadas mediante la aplicación de la geoestadística. Eso ha permitido una disminución considerable en los costos y una simplificación importante de la herramienta, lo cual acerca más la tecnología al productor (Bongiovanni, citado por García, 2002).

Miller et al., citados por Plant (2001) definió tres criterios para que se justifique el manejo por zonas:

1- Existe variabilidad espacial en factores que afectan el rendimiento.

2- Dicha variabilidad se puede identificar y medir.

3- Dicha información se puede utilizar para manejar distinto los cultivos, mejorar los rindes y disminuir los riesgos ambientales.

Para delimitar ambientes, las diferencias en rendimiento deben ser mayores entre ambientes que dentro de ellos y los factores limitantes del rendimiento deben ser iguales dentro de un mismo ambiente. De esta forma, el número de ambientes óptimo es aquel que contempla el tamaño, variabilidad natural de la chacra y la practicidad del manejo que disminuya al máximo la varianza (Plant, Fraisee et al., citados por Roel y Terra, 2006c).

En investigación se trabaja con puntos georeferenciados para identificar las variables que explican la varianza dentro de la chacra. Mediante análisis de regresión de CART (Classification And Regresion

Trees, Breiman et al. 1984) y análisis de clusters o conglomerados se busca eliminar aquellas variables poco relacionadas o asociar grupos con valores similares de distancias entre variables para obtener y revelar aquellas asociaciones que explican la mayor parte de la variabilidad (Roel et al., citados por Roel, 2006b).

Según Roel y Firpo (2006a), a nivel comercial es necesario georeferenciar la información, identificar áreas distintas, delinear esas zonas y comenzar a trabajarlas distinto según expectativas de rendimiento, entendiendo los cambios y adaptando el manejo a los mismos.

2.2.2 Ambientes edáficos

Los atributos edáficos y topográficos están correlacionados con los patrones de variabilidad de los rendimientos de cultivos agrícolas. El objetivo una vez identificados esos atributos y analizar su posible correlación con los patrones de rinde, es delinear distintas zonas que ameritan un manejo distinto. Esas zonas deben expresar una combinación homogénea de factores del rendimiento para las que sería apropiado un manejo similar tanto del suelo como del cultivo (Terra et al., 2010).

2.3 MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD

Para definir zonas agrupando variabilidades se utiliza la información obtenida con monitores de rendimiento y muestreo de suelos y se procesa utilizando métodos que incorporan la variabilidad espacial como geoestadística y análisis multivariado.

2.3.1 Monitor de rendimiento

Los mapas de rendimiento son la mejor herramienta para la generación de zonas de manejo ya que el rendimiento es el mejor indicador de productividad del suelo en una chacra (Roel y Terra, 2006c).

El monitor de rendimiento refleja la variabilidad dentro de la chacra pero es un simple delimitador de zonas. Con esta información se debe estudiar qué genera variabilidad en las distintas zonas, si es manejable o no, si es natural o inducida.

Esta herramienta es útil para verificar la eficiencia de las zonas delineadas para detectar diferencias en productividad (Fraisse et al., citados por Roel y Terra, 2006c). Sin embargo, la generación de zonas de manejo a partir de mapas de rendimiento es cuestionada por Stafford et al., citados por Plant (2001) por considerarla insuficiente. En esta misma línea existen autores que afirman que la variación temporal es frecuentemente superior a la espacial, lo cual estaría cuestionando la validez de zonas de manejo determinadas en un año y un cultivo específico (Whelan y McBratney, citados por Terra et al., 2010).

Si el objetivo es conocer qué genera la variabilidad espacial y manejar la chacra en función de la potencialidad de cada ambiente, el monitor de rendimiento es una herramienta que brinda información que luego se debe correlacionar con características físicas y químicas del suelo, distintos manejos anteriores, rotaciones y fertilización (Bragachini et al., 2006).

La formación del rendimiento de un cultivo es un proceso complejo, afectado por más de un factor y el orden de importancia de estos factores varía dentro de una misma chacra. El objetivo es identificar y cuantificar el factor dominante para cada zona de la chacra. Se pueden obtener distintas zonas definidas por factores limitantes del rendimiento para luego ser manejadas de acuerdo a sus propiedades intrínsecas (Kravchenko y Bullock, 2000).

2.3.2 Muestreo de suelos

Según Roel y Terra (2006c) para la realización de mapas de propiedades del suelo, la limitante es la cantidad de muestras que deben ser recolectadas y analizadas, con un alto costo en tiempo y dinero, lo que lo hace a priori prohibitivo a nivel productivo.

Por otra parte, la información obtenida por satélites o aviones que caractericen a las condiciones del suelo, el crecimiento y desarrollo del cultivo puede ser muy útil en el manejo sitio-específico y a un relativo bajo costo (Mooran et al., Senay et al., citados por Plant, 2001).

Esta información obtenida a partir de precepción remota no es útil por sí sola, sino que se debe procesar e incorporar a la información previa, y analizar una posible relación ente las variables medidas y las condiciones de manejo (Bragachini, 2007). Presenta también limitantes en cuanto a su diseño y calibración que no permite la comparación de imágenes de distinto momento sin pasar por un proceso de estandarización en donde se eliminen los efectos atmosféricos y de radiación que afectan la percepción remota.

Es importante la validación de estas herramientas para poder demostrar que la reflectancia medida puede estar correlacionada con propiedades del cultivo y del suelo que afectan el rendimiento (Bragachini, 2007).

2.3.3 Análisis de clusters y CART

El objetivo del análisis de clusters es generar agrupación de datos que minimicen la varianza dentro ellos y la maximicen entre ellos. La delimitación de zonas con comportamientos productivos diferentes de una serie de mapas constituye el entendimiento de la variabilidad espacial y temporal del rendimiento dentro de la chacra (Roel y Firpo, 2006a).

Luego de cuantificar y agrupar los atributos del terreno, es un factor clave evaluar cómo están relacionados con la productividad y las propiedades del suelo (Fraisse et al., Muller et al., citados por Roel y Terra, 2006c).

CART es un método no paramétrico por lo que no necesita que sus datos presenten una distribución normal. En los análisis estadísticos clásicos, el resultado es la identificación de una estructura dominante que tiene efecto sobre el rendimiento. Sin embargo, en la conformación del árbol de regresión y clasificación (CART) se trabaja

con múltiples estructuras de datos en distinto tiempo y espacio lo que permite identificar no solo cuáles son las distintas variables que están afectando sino a qué nivel (Plant, citado por Roel y Firpo, 2006a).

Este tipo de análisis tiene varias ventajas sobre el uso de métodos de regresión lineal clásica: 1) no hay necesidad de especificar en forma funcional y verificar que se ajuste a los datos; 2) hace la selección de variables en forma automática; 3) minimiza el efecto de los valores extremos, aislándolos en pequeños nodos, y 4) aísla el efecto de las variables a las artes del árbol, para descubrir la dependencia del contexto y las interacciones entre las variables (Plant, citado por Otaño y Zarucki, 2010).

Plant (2001) encontró que la metodología de análisis de CART es una valiosa y objetiva información para la conformación de zonas de manejo y útil en describir la relación entre variables de respuesta y variables explicativas como pueden ser las propiedades del suelo.

2.3.4 Análisis geoestadístico

El conjunto de técnicas estadísticas que toman en cuenta en su estructura la ubicación espacial de los puntos estudiados se denomina análisis de datos espaciales. El análisis de datos con un componente espacial se denomina geoestadística (Cressie et al., citados por Plant, 2001).

La geoestadística opera básicamente en dos etapas, la primera en el análisis estructural, en la cual se describe la correlación entre puntos en el espacio. En la segunda fase se hace predicción en sitios de la región no muestreados por medio de técnicas de interpolación (Bosques Sendra, citado por Otaño y Zarucki, 2010).

Esa interpolación de datos de zonas muestreadas a zonas sin muestro debe contar con estimadores confiables, no tendenciosos y robustos (Alves da Silva et al., 2003). En la mayoría de las variables, observaciones cercanas en el espacio son más semejantes entre sí que con aquellas más distantes, por lo que la distribución espacial de dichos atributos no es independiente (Plant 2001, Best y León 2006).

La interpolación geoestadística es un instrumento utilizado en agricultura de precisión y su efectividad depende de la cantidad de muestras, de la variabilidad intrínseca de la chacra y de la estructura espacial de los datos. En este sentido, Best y León (2006) establecieron que esa interpolación de datos a espacios que no contienen información se basa en el principio de auto correlación o asociación espacial.

Para representar en un mapa las variables de interés es necesario llenar los espacios que no contienen información con datos estimados o también llamados “interpolados”. Sólo si existe esta asociación espacial o autocorrelación es posible desarrollar un mapa de interpolación, dado que en este caso tendremos zonas en las cuales la variable poseerá niveles más altos o más bajos. Si la variable bajo estudio muestra un patrón aleatorio, no existe autocorrelación espacial y no es posible representarlo en un mapa (Best y León, 2006).

En los métodos de medición continuos, medidas de la variable son obtenidas en todo el campo y se obtienen mediante técnicas de sensoramiento remoto como las imágenes satelitales y monitores de rendimiento. En los métodos de muestreo discretos, se relevan algunos sitios predeterminados y sólo algunos puntos de la chacra son observados (Mulla y McBratney, citados por Pravia, 2009).

El análisis geoestadístico permite conocer las características de variabilidad y de correlación espacial de los datos así como estimar valores de una variable en sitios donde no ha sido medida. En cuanto a las aplicaciones de geoestadística en muestreos el objetivo es analizar datos donde la variabilidad ya está presente, como lo es el procesamiento de datos de rendimiento para su posterior inclusión en esquemas de delineación de zonas (Otaño y Zarucki, 2010).

Una de las herramientas ampliamente utilizadas para la descripción espacial de los conjuntos de datos corresponde al semivariograma y es de gran importancia para la determinación de una de las mejores técnicas de interpolación utilizadas, el método de kriging (Best y León, 2006).

El semivariograma es una descripción matemática de la relación entre la varianza entre pares de observaciones (puntos de datos) y la distancia que separa esos puntos (h). Una representación gráfica típica de un semivariograma lo podemos observar en la Figura No. 2.

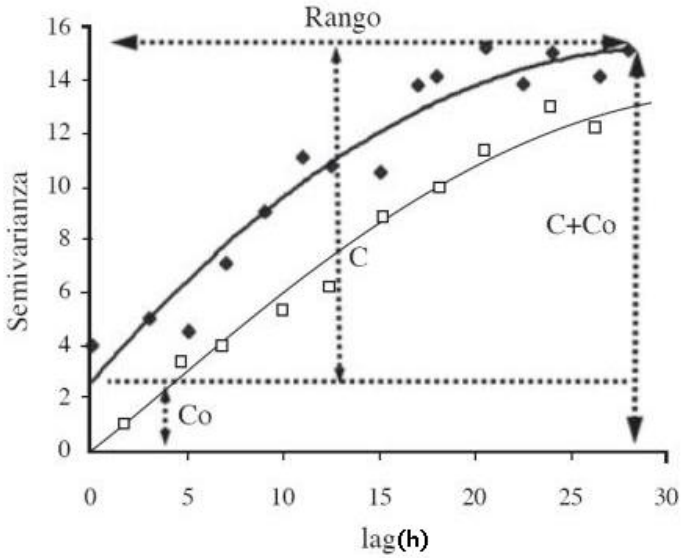


Figura No. 2 Ejemplos de semivariogramas y sus parámetros (Fuente: Best y León, 2006).

Para interpretar el semivariograma experimental se parte del supuesto de que a menor distancia entre los sitios mayor similitud o correlación espacial entre las observaciones. Por ello en presencia de autocorrelación se espera que para valores de h pequeños el semivariograma experimental tenga magnitudes menores a las que este toma cuando las distancias h se incrementan (Giraldo, citado por Pravia, 2009).

En la Figura No. 2 además del semivariograma experimental se encuentra el semivariograma teórico al cual han sido ajustados los datos. Allí aparecen los parámetros del semivariograma, siendo “Co” el efecto pepita, “rango” la distancia a la cual se estabiliza la semivarianza y a partir de donde ya no existe correlación entre pares de puntos, y “C + Co” los valores de semivarianza alcanzados en el rango (Best y León, 2006).

2.4 RELACIÓN DEL RENDIMIENTO CON PROPIEDADES DEL SUELO

2.4.1 Topografía

El manejo de los sitios específicos de rendimiento requiere un conocimiento cuantitativo importante de los factores que afectan e interactúan con el mismo. Según Terra et al. (2010) la topografía es uno de los factores que está altamente relacionado con el rinde y lo afecta de diversas maneras.

En primer lugar, influye en la redistribución de las partículas del suelo, materia orgánica y nutrientes provocada por erosión y/o deposición, lo que genera cambios a nivel físico y químico de las propiedades del suelo tanto en el bajo como en lomas. En segundo lugar, afecta la disponibilidad de agua y su redistribución en la chacra, que para cultivos de verano es un importante determinante del rendimiento. En este sentido, la productividad de los cultivos de secano en Uruguay está vinculada a atributos estables del suelo relacionados con la acumulación y dinámica del agua intrachacra.

Kravchenko y Bullock (2000) encontraron para charcas en Iowa que las características topográficas explicaron un 20% de la variación del rendimiento (6 a 54%) en donde los rendimientos altos fueron consistentemente ubicados en las zonas bajas (correlación negativa entre rendimiento y elevación). Cuando se analizó conjuntamente con las propiedades del suelo, éstas explicaron el 40% de la variación (10 a 78%).

La relación entre el régimen pluviométrico con la topografía y el rendimiento relatados en la literatura son contradictorias explicadas principalmente por las diferencias del suelo y condiciones climáticas que se generaron (Kravchenko y Bullock, 2000).

Los atributos topográficos cobraron importancia en los años secos mientras que años con precipitaciones moderadas perdían importancia relativa (Kaspar et al., citados por Terra et al. 2010, Simmons et al., citados por Otaño y Zarucki 2010).

Kaspar et al., citados por Martín et al. (2004) encontraron que en años secos el rendimiento estuvo correlacionado positivamente con variables relacionadas a la disponibilidad de agua, posición topográfica, suelos de textura fina y alto contenido de carbono orgánico, siendo la posición topográfica el factor más importante.

Por otro lado, Halvorson y Doll, citados por Otaño y Zarucki (2010), observaron menor influencia de la topografía sobre el rendimiento en años secos y lo relacionaron al menor efecto de la redistribución topográfica del agua que fue más homogénea en la chacra.

2.4.2 Propiedades del suelo

La principal limitante para la producción de cultivos de verano en la zona litoral oeste del país es una baja capacidad de almacenar agua de sus suelos (entre 80 y 180 mm de agua disponible), existiendo una amplia variabilidad para cada tipo de suelo según sea su génesis y posición topográfica y a su vez dentro de cada unidad de suelo (Ernst et al., citados por Otaño y Zarucki, 2010).

Según MacBratney y Pringle, citados por Plant (2001), la relación entre la variabilidad espacial del rendimiento y la variabilidad de las propiedades del suelo es compleja. Los métodos que se basan en manejar la información de mapas de rendimiento para transformarlo en zonas manejables se basan que en esas zonas el rendimiento está limitado por uno o pocos principales factores.

La distribución de las propiedades del suelo tiene una dependencia espacial con la topografía y esto puede tener una influencia tanto en el rendimiento como en la calidad del grano de soja (Jiang y Thelen, citados por Plant, 2001). Roel y Terra (2006c) determinaron que el suelo y los atributos del terreno explicaron entre el 15 y el 60 % de la variación del rendimiento, variando entre años y prácticas de manejo de suelos.

2.4.2.1 Propiedades físicas

Propiedades del suelo como capacidad de retención de agua, drenaje, profundidad radicular y fertilidad fueron identificadas como causas más importantes de la variabilidad espacial del rendimiento en soja (Irmak et al., 2001).

La estimación precisa de propiedades del suelo que influyen en el estrés hídrico es la clave para explicar la variabilidad en el rendimiento. En años secos es más frecuente encontrar correlaciones estrechas entre rendimiento y profundidad del perfil. Perfiles con mayor cantidad de arcilla presentan una menor disponibilidad de agua hacia las raíces, disminuyendo la capacidad de almacenaje del perfil (Irmak et al., 2001). El volumen de suelo explorado por las raíces determina la cantidad de agua disponible para el cultivo y se relaciona, entre otros aspectos edáficos, con su textura (Álvarez et al., 2009).

En el mismo sentido, sub horizontes arcillosos significaron menor disponibilidad de nutrientes traduciéndose en menores rendimientos (Irmak et al., 2001). Según Cox et al., citados por Martín et al. (2004) las áreas con mayor arcilla tuvieron mayor rendimiento, atribuible a una mayor cantidad de agua disponible durante periodos secos. Por otra parte, el efecto de la arcilla en años con precipitaciones normales podría ser opuesto y reducir el rendimiento.

La productividad depende también de la profundidad a la que se encuentra el horizonte Bt. Álvarez et al. (2009) registraron una caída lineal de los granos de soja fijados a medida que el horizonte Bt se encontraba por encima de una profundidad de 41 cm. La determinación del límite superior de este horizonte nos puede orientar acerca del potencial productivo de la chacra y plantear estrategias de manejo acordes. La alta variabilidad que presenta la profundidad a la que se encuentra el horizonte argilúvico en escalas reducidas, restringe la implementación de estrategias diferenciales de manejo de los cultivos.

2.4.2.2 Propiedades químicas

Entre las características químicas de un suelo que están directamente relacionadas con la fertilidad del mismo se puede mencionar a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), afectada positivamente por la materia orgánica y el contenido de arcilla.

La CIC es la cuantificación de la capacidad del suelo de retener cationes y se expresa como meq/100 g de suelo. Las posiciones de intercambio están ocupadas por bases como Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+} H^{+}, Al^{3+}, Mn^{2+} y Fe^{3+} (Durán et al., 1997).

El carbono orgánico es un indicador de la calidad del suelo y es un atributo relevante ya que además de su función como reservorio de nutrientes, define también muchos atributos físicos, químicos y biológicos (Ernst y Siri, 2011). Kravchenko y Bullock (2000) encontraron niveles mayores de materia orgánica en zonas topográficas más bajas. Ésta fue la propiedad del suelo que presentó mayor correlación con el rendimiento de soja siendo alta y positiva para valores de análisis inferiores a 3%.

La conductividad eléctrica y el fósforo son propiedades del suelo con alta variación mientras que pH, textura y carbono orgánico son características estables con baja variabilidad (Mulla y MacBratney, citados por Terra et al., 2010).

Otra determinación importante de la fertilidad de los suelos es el porcentaje de saturación de bases que representa el porcentaje de la CIC cubierta por cationes tales como el calcio (Ca), el magnesio (Mg), el potasio (K) y el sodio (Na).

Graham, citado por Kopittke y Menzies (2007) propone que el % de saturación de bases de un suelo “ideal” se aproxima a los siguientes valores: 65 a 85% para Ca, 6 a 12% para Mg, y 2 a 5% para K. En este sentido, las relaciones entre ellos serían: 6,5:1 para Ca/Mg, 13:1 para Ca/K, 3,25:1 para Ca/H y 2:1 para Mg/K.

Durán et al. (1997) establecen que los valores promedio para los suelos del Uruguay son de 70-80% para Ca, 10-20% para Mg, y 10% para K+Na, expresados como % de bases totales.

Un amplio rango de relaciones Ca/Mg son capaces de satisfacer los requerimientos nutricionales del cultivo de soja. Asimismo, si el suelo presenta cantidades absolutas de Ca, Mg y K adecuadas, la relación entre ellos no influye en el rendimiento del cultivo ya que la disponibilidad total de los mismos es más importante (Liebhardt, citado por Kopittke y Menzies, 2007).

Los rangos de contenidos absolutos de cationes intercambiables en los suelos del Uruguay son: 0,5-30 cmolc kg^{-1} para Ca^{+}, 0,3-10 cmolc kg^{-1} para Mg^{+}, 0,1-1,5 cmolc kg^{-1} para K^{+} y 0,1-2,0 cmolc kg^{-1} para Na^{+} (Durán et al., 1997).

Dentro de los Brunosoles, la clase Éutrico que presenta en su horizonte A una CIC mayor a 20-25 meq/100g y saturación de bases mayor a 50-60%. Los Brunosoles Subéutricos presentan en su horizonte A una CIC de 10 a 20 meq/100 g (Durán y García Préchac, 2007a).

Cuadro No. 1 Propiedades químicas por horizonte en dos Brunosoles del Uruguay

Suelo	Horizonte	pH	% Mat Org	% Arcilla	CIC (meq/100g)
Brunosol Éutrico	A	6	5,7	33	28
	B	6,5	2,5	51	38
Brunosol Subéutrico	A	5,6	3,6	24	15
	B	6,3	1,8	45	28

Fuente: Durán y García Préchac (2007a).

El cultivo de soja tiene una alta exigencia de azufre, similar a la de fósforo, y las raíces presentan exigencias elevadas de calcio durante el proceso de infección radicular por los rhizobia. El Mg es el segundo

catión en importancia cuantitativa después del Ca (Ausilio y Magra, 2004).

Existe una alta importancia de la relación Ca/ Mg para el rendimiento de soja. Dicha relación encuentra su óptimo en 25 (Quaggio et al., 1982).

La deficiencia de magnesio se puede medir a través del análisis de su competencia para la adsorción en donde encontramos deficiencias cuando la CIC es menor a 20% y la relación Ca/Mg: > 10:1 - 15:1, K/Mg > 0,6:1.

La salinidad interrumpe la absorción de nutrientes minerales de la planta de dos formas: 1) la fuerza iónica del sustrato puede influir en la absorción y traslocación de nutrientes; 2) reduciendo la disponibilidad de nutrientes por competencia con otros cationes mayores en el sustrato (Na y Cl). Este último es el mecanismo más común por el cual la salinidad afecta la relación de minerales de las plantas (Grattan y Grieve, 1992).

El sodio puede ser problemático para el cultivo de soja cuando toma valores por encima del 15% de la CIC ya que tiene efecto sobre el pH, pudiendo provocar deficiencia de micronutrientes debido al pH alto. Puede también sustituir al K en ciertas funciones en las plantas, especialmente relacionadas a mantenimiento de la turgencia, y afectar por efecto osmótico la absorción de agua (García et al., 2009).

Según Grattan y Grieve (1992), las plantas son selectivas de altas relaciones K/Na. La selectividad de K por sobre Na varía entre especies y cultivares. En soja, a mayor salinidad menor absorción de K y menor presencia en tejidos de diversas plantas lo cual afecta el rendimiento. Álvarez et al. (2009) encontraron que el rendimiento de soja se correlacionó negativamente con los niveles de Na^+ intercambiable y valores de 0,61 meq/100g se correspondieron con sectores de muy baja producción de soja.

La baja disponibilidad de cationes es consecuencia de la desaturación del suelo, la cual se agudiza frente a la adsorción

competitiva de mayor cantidad de aluminio e hidrógeno. La absorción de calcio y magnesio a pH bajo se encuentra limitado incluso en condiciones de alta disponibilidad (García et al., 2009).

En lo que refiere a pH, Byre et al. (2004) indican que afecta la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes esenciales para el cultivo de soja y es una variable que controla y determina distintos procesos de la planta y microorganismos, siendo los pH ácidos negativos para el cultivo.

Por su parte Tisdale et al., citados por Byre et al. (2004), plantean que si el pH es de 5,5 o menos es probable la presencia de aluminio que pueda afectar al cultivo por toxicidad y la absorción de molibdeno, nutriente fundamental para las bacterias que fijan nitrógeno. Además, con estos niveles de acidez se reduce la disponibilidad de fósforo y se incrementa el potencial de lixiviación del potasio (García et al., 2009).

El rango de pH deseable para la soja es entre 6 y 7 debido a que el pH bajo reduce la nodulación, produce amarillamiento internerval en las hojas jóvenes, engrosa y aumenta el espesor de las raíces, reduce raíces laterales y produce hojas pequeñas ahuecadas (García et al., 2009).

Albrecht, citado por Kopittke y Menzies (2007) concluyó que la nodulación en suelos ácidos es limitada más bien por la baja concentración de Ca que por la acidez en sí, y también concluyó que el crecimiento de la planta y la nodulación aumentaban cuando el Ca aumentaba su concentración en el complejo de intercambio.

Kravchencko y Bullock (2000) hallaron que las propiedades del suelo (CIC, MO, P, K) explicaron el 30 % de la variación en el rendimiento en soja (desde 5% hasta 71%) mientras que Cox et al., citados por Otaño y Zarucki (2010) establecieron que variables como saturación de bases, pH, contenido de arcilla y elevación, explicaron en menor medida la variabilidad del rendimiento.

2.5 IVND COMO HERRAMIENTA

2.5.1 Definición de IVND y su capacidad para definir zonas de manejo

El índice de verde es un método de percepción remota que obtiene información a partir de sensores satelitales que miden la reflectancia de la radiación solar absorbida por el cultivo.

Se parte de la base que el suelo y el cultivo reflejan la radiación solar de manera distinta (Perry y Lautenshlager, citados por Seidl et al., 2000). En distintos experimentos se han alcanzado buenas aproximaciones del estado sanitario del cultivo e incluso estimación del rendimiento a partir del índice de verde normalizado.

La mayoría de las imágenes obtenidas por percepción remota de índice de verde que están sin calibrar pierden validez en explicar diferencias en el crecimiento del cultivo en biomasa o IAF y poder diferenciar zonas distintas dentro de la chacra (Seidl et al., 2000).

La calibración es fundamental para poder utilizar los datos de índice de verde como input en modelos de crecimiento de cultivos. La calibración se realiza a través de un algoritmo de optimización entre el rendimiento observado y el rendimiento estimado para disminuir la suma cuadrado del error (Goffe et al., citados por Seidl et al., 2000).

Para el cálculo de índice de verde normalizado con valores entre 0 y 1 se aplica la siguiente fórmula:

$$NVI = \frac{VI - MinVI}{MaxVI - MinVI}$$

NVI -índice de verde normalizado

VI – índice de verde promedio para cada celda

Min VI - mínimo promedio de índice de verde para cada celda en toda la chacra

Max VI – máximo promedio de índice de verde para cada celda en toda la chacra.

2.5.2 IVND como estimador de rendimiento

Ma et al. (2001) plantean que el IVND tiene un uso potencial como rápido, confiable y repetible indicador para proyectar y estimar rendimiento en grano. Para el caso de soja encontró una alta y positiva correlación entre ellos con mejoras progresivas de R4 a R5, respecto de R2. Martín et al. (2004) encontraron que el IVND presenta limitaciones en su habilidad para determinar el status nutricional y energético de la planta en estados avanzados en donde el canopeo ya está completamente desarrollado.

Existen diversos estudios empíricos que afirman que INVD es un buen estimador de biomasa y rendimiento de ciertos cultivos agrícolas. Distintos autores encontraron una alta correlación entre el IVND y el rendimiento de trigo (Yuzhu, Benedetti y Rossini, citados por Plant, 2001) aunque varió mucho cuando se analizaron distintos cultivares (Ball y Frazier, citados por Plant, 2001).

Algunos estudios no han encontrado ninguna relación entre el IVND y rendimiento (Plant, 2001). Las causas son varias y entre ella se menciona que el IVND se relaciona con IAF, color de las hojas y biomasa por encima del suelo. También se plantea que este indicador debería tomar en cuenta la estructura genética del canopeo (Ma et al., 2001).

Según Seidl et al. (2000) la relación entre índice de verde y rendimiento sigue una tendencia lineal para soja antes de comenzar el proceso de senescencia y se pueden observar correlaciones entre 0,5 y 0,6 entre rendimiento e índice de verde.

Existen resultados contrastantes respecto de este indicador para estimar rendimiento en grano de soja. El IVND no es del todo eficiente para aquellos cultivos en donde el material vegetal no es el componente económico y éste último depende de distintos factores como índice de cosecha y calidad (Plant, 2001).

Martín et al. (2004) encontraron una alta correlación entre rendimiento e IVND en zonas bajas de la chacra con pendientes suaves, con alto carbono orgánico y elevada conductividad eléctrica.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENSAYO

3.1.1 Descripción del sitio de muestreo

El trabajo de campo se realizó en el verano 2010-2011, en una chacra comercial del establecimiento Las Martinetas perteneciente a la empresa Agronegocios del Plata (ADP), ubicada 2km al Sur de la ciudad de Dolores por ruta 21, departamento de Soriano, Uruguay (33°32'55.31"S, 58°14'13.80"O). La chacra se sitúa sobre la formación Fray Bentos según carta geológica de Uruguay y la unidad de suelos predominante es Villa Soriano con algo de Fray Bentos. El grupo de suelos CONEAT dominante es 03.51 y en menor medida 11.2.

Cuadro No. 2: Descripción de los grupos de suelos CONEAT.

Unidad CONEAT	Unidad de suelos	Suelos dominantes	Suelos asociados
03.51	Villa Soriano	Brunosoles Éutricos Lúvicos	
11.2	Fray Bentos	Brunosoles Éutricos Típicos	Brunosoles Éutricos Típicos superficiales, Planosoles Éutricos Melánicos

Fuente: URUGUAY. MGAP. PRENADER (2010).

En esta chacra se realiza agricultura continua desde 2003 y está integrada a lo que la empresa denomina Agricultura por Ambientes. Cuenta con información de rendimiento y otros parámetros georeferenciados así como una delimitación de ambientes de producción denominados de “Ambiente A”, “Ambiente B” y “Ambiente C”.

Cada ambiente se definió en base a:

- registros de monitores de rendimiento de todos los cultivos de una secuencia dominada por trigo/soja en los últimos 8 años.

- índice de verde (IVND) obtenido a través de imágenes satelitales durante los ciclos de cultivos.

- e información de planimetría y altimetría del terreno.

Las imágenes satelitales son obtenidas una vez por mes sin poder elegir un estado fenológico o condición hídrica del suelo en cada una de ellas.

Los ambientes se identifican con la letra “A” cuando presenta resultados consistentemente superiores según los criterios anteriores y “D” cuando son consistentemente inferiores. El ambiente “B” se define como variable siendo errática su respuesta según cultivo y/o año. Para el caso de la información de rendimiento, el ambiente “A” se definió como aproximadamente 30% superior a la media de la chacra todos los años; “D” 30% menos y “B” variable comportándose como “A” o “D” según cultivo y/o año.

Los subíndices de cada ambiente refieren a la ubicación topográfica en la chacra siendo “ml” (media loma).

El trabajo se realizó en una superficie de 7 hectáreas en las que se incluyeron los tres ambientes mencionados (Figura No. 3).

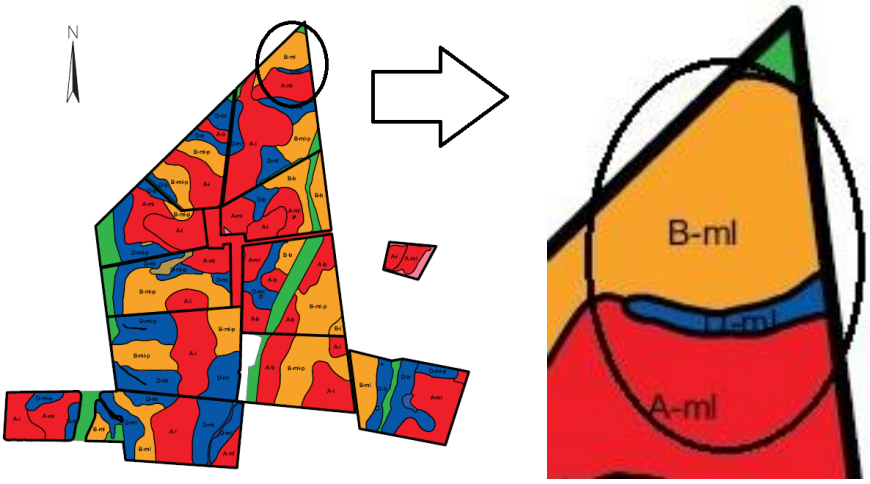


Figura No. 3 Ubicación del muestreo en la chacra y ambientes predefinidos

Se realizó un muestreo intensivo en grilla de 79 sitios a intervalos regulares de 30 metros en todas las direcciones. Cada sitio de muestreo fue georeferenciado. La grilla fue confeccionada a partir de una imagen de LANDSAT de IVND del 14 de marzo del 2011, de un cultivo de soja de segunda que estaba en el estadio fenológico R5 según la escala de Fehr y Caviness (1971).

La distancia entre ellos es la mínima para obtener un valor de IVND por celda. A cada celda le correspondió además un rendimiento de grano de soja, el que se obtuvo como promedio de todos los registros pertenecientes a cada celda obtenidos con el monitor de rendimiento GreenStar GS1/GS2 de una cosechadora John Deere modelo STS 9750.

Los ambientes “A”, “B” y “D” contaron con 27, 44 y 8 sitios de muestreo respectivamente.

3.1.2 Manejo del cultivo

Cuadro No 3: Resumen de manejo agronómico

	FS	Cosecha	Cv.	Fertilizante	
Fecha	16 dic	5 mayo	Nidera 4990	16 dic	
	60pl/m^2			2-38-0	K_2O
Dosis				110	100

Malezas		Herbicidas		Malezas	Herbicidas
Conyza		21 dic		Conyza	4-5 feb
Hoja ancha	Pancel gold	Starane	Imazetapir	Verdolaga y cardo	Glifosato
Dosis	1,5	0,5	0,1	Trigo guacho	

Plaga	Insecticidas	Fungicida
		4 marzo
Trips	Clorpirifós	Ópera
Arañuela		0,5

3.2 DETERMINACIONES

Se muestreó el perfil de suelo con taladro holandés hasta la profundidad a la cual se alcanzó el material madre de cada sitio. Una vez extraído y desplegado el perfil se determinó profundidad total y de cada horizonte (A, B, B/C y C). Se extrajeron muestras de cada horizonte identificadas, que se picaron y secaron a estufa 48 horas a 60º para luego ser molidas en molinillo.

Para el horizonte A se analizó pH por el método potenciométrico, materia orgánica por el método de Walkley-Black y fósforo Bray Nº1 en laboratorio de la EEMAC, Facultad de Agronomía.

Se realizaron 19 muestras compuestas que se generaron a partir del 50% de los sitios aproximadamente para analizar textura de los

horizontes A, B y B/C. El criterio utilizado fueron rangos de profundidad diferentes para cada horizonte.

Posteriormente se estimó la capacidad de almacenaje de agua disponible (CAAD) de cada perfil y para cada horizonte, utilizando las funciones propuestas por Molfino y Califra (2001).

Se enviaron muestras compuestas al laboratorio del INIA La Estanzuela para determinación de CIC a pH_7, bases (Ca, Mg, Na, K) y acidez titulable. Se generaron 8 muestras compuestas a partir de 47 sitios que abarcaron los tres grupos generados a partir de propiedades del suelo (ver anexo No. 3). Las muestras G1W, G1E y G1S corresponden a tres zonas diferentes del ambiente-suelo 1. Las muestras G2W, G2S y G2N corresponden a tres zonas del ambiente suelo 2. Las muestras G3 y RB corresponden a dos zonas del ambiente 3 que se diferenciaron en rendimiento siendo mayor y menor a la media del grupo. De esta manera las muestras generadas a partir de los grupos ambiente-suelo abarcan la variabilidad entre y dentro de ellos.

Para cada sitio georeferenciado se contó con información de:

- rendimiento soja 2010-2011
- IVND del cultivo de soja de segunda 2010-11 al estadio R5
- Elevación del terreno
- profundidad*
- fósforo disponible (Bray Nº1)
- Concentración de carbono orgánico
- pH
- textura*
- CAAD*
- CIC**
- Potasio**

*para todo el perfil y de cada horizonte

**muestras compuestas que contemplan el 60% de los sitios

3.2.1 Mapa de rendimiento

La cosecha de la soja se realizó el 5 de mayo y se obtuvo la información del monitor de rendimiento en la grilla de muestreo. También se obtuvo la información de rendimiento del trigo antecesor para los mismos sitios.

3.2.2 Índice de verde (IVND)

Los datos de IVND se obtuvieron mediante fotos satelitales que corresponden al 14 de marzo del 2011 cuando la soja estaba en el estadio fenológico R5 según la escala de Fehr y Caviness (1971).

3.2.3 Registros climáticos

Esta información fue obtenida para los meses de Octubre a Mayo, de la Central Meteorológica de Erro en la Media Lucha, Dolores. Los registros históricos se obtuvieron del INIA y corresponden a la zona para el período 1980 a 2009.

3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.3.1 Estadística descriptiva

Se realizó un análisis mediante estadística descriptiva utilizando los indicadores media, desvío estándar, coeficiente de variación, mínimo y máximo. Se determinó el coeficiente de correlación lineal de Pearson para establecer grados de asociación entre variables utilizando el Microsoft Excel.

3.3.2 Definición de zonas

Se procedió a realizar un análisis de conglomerados (cluster), estableciendo un máximo de 3 grupos definidos por la Distancia Euclidiana Promedio, utilizando solamente los atributos de suelo estandarizados. Para ello se utilizó el programa Infostat (2001). Esto permitió establecer los grupos ambiente-suelo CAAD161, CAD139 y CAD118, nombrados en base al promedio de su CAAD.

Se estudió la variación de los datos dentro de las zonas de manejo establecidas previamente por ADP y para los agrupamientos establecidos con la información propia. Para ello se graficó la distribución en quantiles y se realizó el Test de Tukey con 0,05 como nivel de significancia a priori, utilizando el programa JMP 8 (SAS, 2008). Mediante un análisis de contingencia se estudió la concordancia entre los ambiente “A”, “B” y “D” y los grupos CAAD161, CAD 139 y CAD118 determinados en base a atributos edáficos.

3.3.3 Análisis espacial

La estructura espacial de todas las variables medidas se analizó utilizando el programa ARCGIS 10 (2011). Para ello se calcularon los semivariogramas estandard, esférico y exponencial. Se analizó la relación pepita/umbral, clasificando la correlación espacial como fuerte (menor a 0,25) o moderada (entre 0,25 y 0,75) (Cambardella et al., citados por Pravia, 2009). Luego se procedió a realizar la validación cruzada de los puntos muestreados con los procedimientos kriging ordinario, removiendo consecutivamente un valor de los datos, el que es estimado a partir de los datos restantes. Se graficó la relación entre observados y estimados, lo que fue utilizado para la selección del mejor estimador semivariograma en base a comparación de los coeficientes de determinación y el residuo de los errores de los modelos.

Las variables que presentaron autocorrelación espacial fuerte, altos coeficientes de determinación entre estimado y observado y además tener bajo error estándar, fueron interpoladas para generar mapas de las variables estimadas.

Para la realización de los mapas se utilizaron herramientas geoestadísticas que permitieron interpolar datos desde los sitios muestreados hacia zonas no muestreadas según la función de semivariograma.

Para todas las variables relevadas, el valor de “Range”, según el método esférico siempre fue superior a la distancia de la grilla de muestreo de 30 metros por lo que fue válida la interpolación entre sitios y realización de los mapas.

3.3.4 Relación entre atributos edáficos y comportamiento del cultivo

Se realizaron árboles de regresión y clasificación para determinar la importancia relativa de los atributos del suelo en determinar el IVND al estadio R5 y el rendimiento de soja de segunda. Para ello fue utilizada la rutina “Partition” del programa estadístico JMP 8.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

La zafra se caracterizó por deficiencias hídricas en el período octubre-diciembre (llenado de grano de trigo, siembra e implantación de soja de segunda) y fines de febrero-marzo (ver Figura No. 4), meses en los que se ubicó el período crítico de definición del rendimiento de soja.

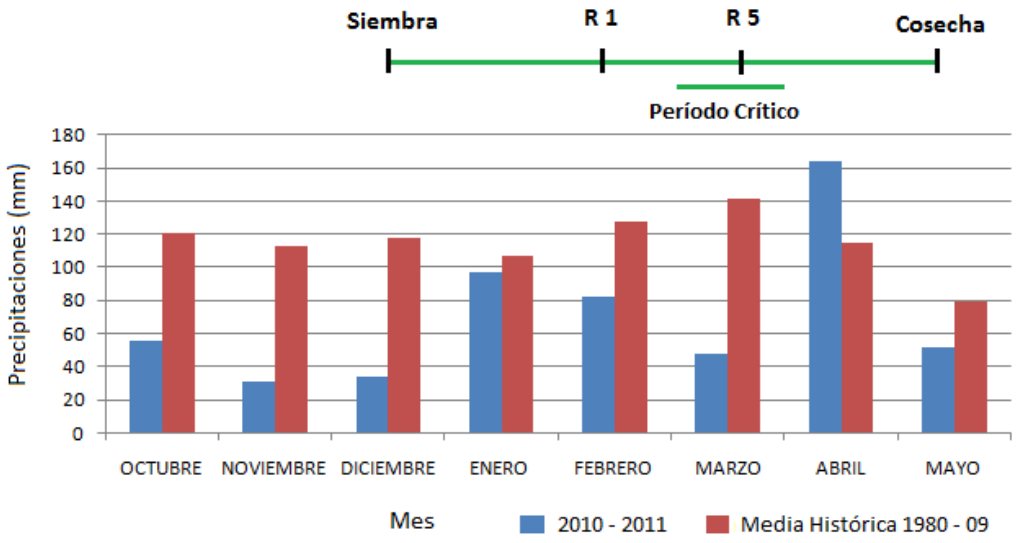


Figura No. 4 Precipitaciones mensuales octubre 2010 a mayo 2011 (Erro, Media Lucha, Dolores), serie histórica 1980-2009 (INIA) y ciclo fenológico del cultivo

En tanto, durante abril, se registraron precipitaciones superiores a la media histórica, lo que afectó la fase de llenado de grano.

Es importante destacar que el cultivo tuvo una alta incidencia y severidad de *Phomopsis sojae* (tizón de la vaina y el tallo), particularmente en el ambiente D. Esta enfermedad se asocia al monocultivo de soja en verano, y estuvo favorecida por las condiciones de lluvia y humedad registradas durante el llenado de grano. Esto se

sumó a los efectos del déficit hídrico inicial, colaborando con la concreción de un rendimiento medio del cultivo de sólo 1193 kg/ha, lo que representa una limitante para la detección de asociaciones entre rendimiento y las zonas establecidas.

4.2 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DE LAS VARIABLES

4.2.1 Descripción de todas las variables

En el cuadro No. 4 se resume la información de suelo y de cultivo relevada.

Cuadro No. 4 Indicadores de posición y dispersión de las variables relevadas

	Media	CV%	Max	Min	Desvío
Altura	15,3	10	18,8	12,9	1,5
IVND	0,50	28	0,76	0,16	0,14
Rendimiento	1193	37	2326	421	436
Prof total	86	18	122	50	16
Prof hz A	17	33	28	7	6
Prof hz B	53	29	100	22	15
Prof hz B/C	33	41	60	0	14
P ppm	19	68	77	5	13
pH h2o	5,61	7	6,77	4,86	0,39
pH KCl	4,82	6	5,99	4,30	0,31
% C org	2,1	17	3,0	1,2	0,4
% MO	3,6	17	5,1	2,1	0,6
% Ac A	26	29	39	19	7
% Ar A	34	25	48	17	9
% L A	40	21	55	27	8
% Ac B	30	21	39	20	7
% Ar B	25	38	41	17	9
% L B	44	13	51	35	6
% Ac B/C	32	8	35	24	3
% Ar B/C	24	32	40	18	8

% L B/C	43	15	50	32	6
CAAD mm	141	18	190	80	25

El rendimiento medio de soja fue de 1193 kg/ha con un CV de 37% lo que se refleja en un rango de casi 2000 kg/ha del rendimiento dentro de una zona de muestreo de tan solo 7 hectáreas.

La profundidad total del suelo es de 86 ± 16 cm promedio con una CAAD de 141 ± 25 mm. Estos valores están dentro de los reportados para las unidades de suelo Villa Soriano (173,3 mm, muy alta) y Fray Bentos (135,7 mm, media) (Molfino y Califra, 2001).

Si bien las características físicas y químicas del suelo y la ubicación de la chacra muestran, a priori, una buena aptitud agrícola, existe alta variabilidad en los atributos del suelo de la zona estudiada. Según Kravchencko y Bullock (2000) estas características pueden explicar el 30% de la variación en rendimiento. Esto justificaría el manejo diferencial por zonas dentro de una misma chacra.

4.2.2 Descripción estadística de las variables por ambientes preestablecidos

Se agruparon los 79 sitios relevados según los ambientes previamente definidos por ADP como “Ambiente A”, “Ambiente D” y “Ambiente B” y se realizó la descripción estadística de las variables para cada uno (ver anexo No.1).

En la Figura No. 5 y Cuadro No. 5 se presenta la distribución del rendimiento en grano de soja según los ambientes pre-establecidos.

Cuadro No. 5 Rendimiento en grano de soja de segunda (kg/ha) según “Ambiente A”, “Ambiente D” y “Ambiente B”

Ambiente	N	Media (kg/ha)	EE
A	27	1359 a	230
D	**8**	1173 a b	423

B	44	1096	b	180

n: número de sitios; EE: error de muestreo

Medias con una misma letra no presentan diferencia significativa según Test de Tukey (p<0.05)

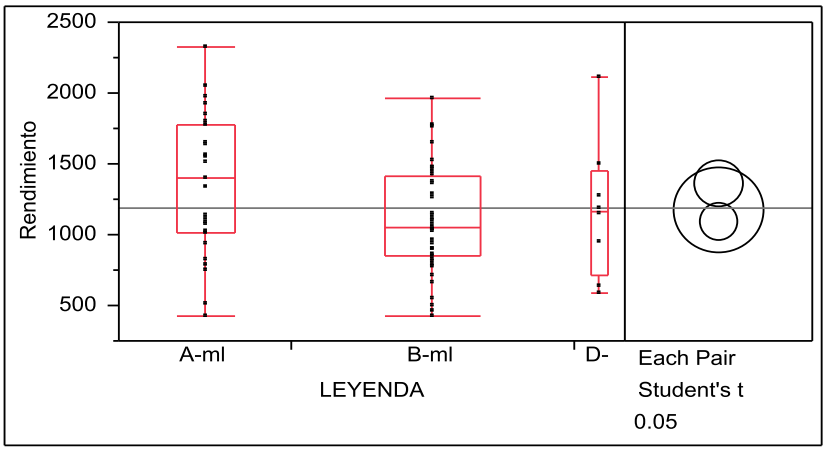


Figura No. 5 Rango de variación del rendimiento de soja de segunda (kg/ha) según ambiente preestablecido (A: “Ambiente A” rendimiento esperable 30% superior; B: “Ambiente B” rendimiento variable entre años y/o cultivo; D: “Ambiente D” rendimiento esperable 30% inferior).

El ancho de las cajas representa la cantidad de sitios que integran cada ambiente.

Existieron diferencias significativas en rendimiento medio de soja entre el promedio obtenido en el ambiente A y B, no diferenciándose del D. El ambiente A, definido como superior al comportamiento promedio en todos los años, logró manifestar esta superioridad, pero el D, definido con comportamiento menor al promedio todos los años, no siguió la tendencia esperada.

Como sólo el 10% de los sitios se corresponde con el ambiente D, se exige una diferencia mayor en kg/ha de soja y más consistente para establecerlo como diferente de A, y varió dentro del mismo rango

que el B. Por su parte, los ambientes A y B tuvieron una diferencia de 263 kg y difieren significativamente. En este caso el ambiente previamente definido como variable expresó los menores rendimientos.

La superposición de los rangos de variación de rendimiento no permite definirlos como ambientes diferentes ya que, como lo establecen Plant (2001), Fraisee et al., citados por Roel y Terra (2006c) para delimitar ambientes las diferencias en rendimiento deben ser mayores entre ambientes que dentro de ellos.

4.2.2.1 Atributos edáficos por ambiente pre-establecido

El ambiente A presenta una profundidad total del suelo en torno a un metro, siendo superior a B y D en promedio 19 y 25 cm respectivamente, con un máximo de 35 cm (ver Cuadro No. 6). Esta marcada superioridad para esta característica estaría indicando un ambiente superior para cultivos de verano donde el agua es la principal limitante.

Cuadro No. 6 Profundidad del perfil del suelo (cm) hasta el material madre según ambiente preestablecido.

Ambiente	N	Media (cm)	EE
A	27	99 a	7
B	44	79 b	5
D	8	74 b	12

n: número de sitios; EE: error de muestreo; A: “Ambiente A” rendimiento esperable 30% superior; B: “Ambiente B” rendimiento variable entre años y/o cultivo; D: “Ambiente D” rendimiento esperable 30% inferior.

Medias con una misma letra no presentan diferencia significativa según Test de Tukey ($p<0.05$)

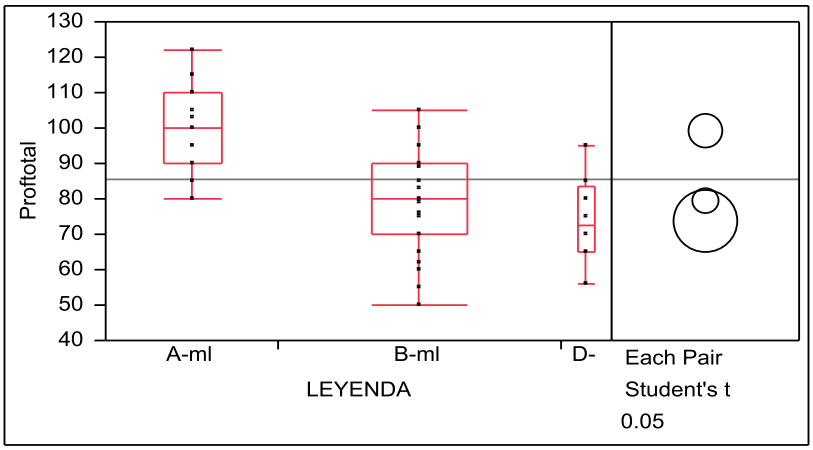


Figura No. 6 Variabilidad en la profundidad del perfil del suelo dentro y entre ambientes de producción pre-establecidos. (A: “Ambiente A” rendimiento esperable 30% superior; B: “Ambiente B” rendimiento variable entre años y/o cultivo; D: “Ambiente D” rendimiento esperable 30% inferior).

El ambiente B presenta mayor variabilidad en la profundidad total del suelo y abarca los registros más bajos, no diferenciándose del ambiente D.

Esa misma variabilidad espacial en la profundidad total del perfil podría estar explicando el motivo por el cual se comporta como variable según el año y/o cultivo. Esto afecta la CAAD y exploración radicular que sumado al déficit hídrico permitió expresar esa alta variabilidad en términos de respuesta vegetal.

4.2.2.2 CAAD del perfil, CAAD por horizonte y % C orgánico

Cuadro No. 7 Capacidad de almacenar agua disponible (CAAD) del perfil, por horizonte y % C orgánico según ambiente

Ambiente	n	CAAD perfil	EE	CAAD hz A	EE	CAAD hz B	EE	% C org	E E
A	27	162 a	11	42 a	5	80 a	7	2,43a	0
B	44	132 b	8	29 b	4	62 b	5	1,88b	0
D	8	118 b	19	25 b	9	73 a	13	1,94b	0

n: número de sitios; EE: error de muestreo; CAAD: Capacidad de almacenaje de Agua Disponible (mm); A: “Ambiente A” rendimiento esperable 30% superior; B: “Ambiente B” rendimiento variable entre años y/o cultivo; D: “Ambiente D” rendimiento esperable 30% inferior.

Medias con una misma letra no presentan diferencia significativa según Test de Tukey ($p<0.05$).

La CAAD estimada reprodujo las diferencias en profundidad total del suelo. El ambiente A, con 162 mm es significativamente mayor que B y D ($p<0.05$) (ver Cuadro No. 7).

El ambiente A con mayor profundidad del suelo y mayor CAAD presenta mejores condiciones para lograr mayores rendimientos en cultivos de verano, sin embargo no logró expresar esta diferencia.

Para el ambiente B la dispersión de los valores tanto de CAAD como profundidad total puede estar explicando que se comporte como variable en su rendimiento según el año.

La CAAD del horizonte A es significativamente mayor en el ambiente A, con una media de 42 ± 5 mm y un valor máximo de 60 y mínimo de 22 mm.

La CAAD del horizonte B representa aproximadamente el 50% de la CAAD total del perfil para los tres ambientes. La diferencia entre ambientes es similar en número pero sensiblemente menor si la comparamos con el horizonte A. De esto se desprende que la CAAD del perfil está mayormente influenciada por la CAAD del horizonte A y más precisamente del espesor de dicho horizonte.

El % de carbono orgánico para el ambiente A es significativamente mayor al B y D. Esta característica se asocia a fertilidad de suelo y acompaña la superioridad establecida a priori de este ambiente en el rendimiento esperado.

Cuadro No. 8 Significancia entre ambientes para las variables más importantes

	A	B	D
Rendimiento soja	a	b	a –b
Profundidad total	a	b	b
CAAD total	a	b	b
CAAD hz A	a	b	b
CAAD hz B	a	b	a
% C org	a	b	b

CAAD: Capacidad de almacenaje de agua disponible (mm); A: “Ambiente A” rendimiento esperable 30% superior; B: “Ambiente B” rendimiento variable entre años y/o cultivo; D: “Ambiente D” rendimiento esperable 30% inferior.

Diferente letra dentro de filas establecen diferencias significativas entre ambientes ($p<0.05$ por Test de Tukey).

El ambiente A presentó diferencias significativas en las características del suelo mostradas anteriormente que no se vieron reflejadas en el rendimiento ($p<0.05$) respecto al ambiente D.

El ambiente B definido previamente como “rendimiento esperable variable según el año” presentó menor rendimiento que el A, valores significativamente menores para todas las variables y con mayor dispersión.

Los ambientes generados con registros de información previa al cultivo de soja en cuestión no lograron reproducir las características esperadas para dichos ambientes en la zafra 2010-2011. Eso sigue la misma línea que Whelan y McBratney, citados por Terra et al. (2010) que afirman que la variación temporal es frecuentemente superior a la

espacial lo que cuestiona la validez de estas zonas para un año específico.

4.2.3 Descripción de las variables por grupo ambiente-suelo

Se utilizaron herramientas geoestadísticas que permitieron interpolar datos desde los sitios muestreados hacia zonas no muestreadas según la función de semivariograma. En la Figura No. 7 se presentan los mapas de las variables que presentaron mayor auto correlación espacial, mayor correlación entre lo estimado y observado y bajo error estándar. Estas variables presentaron un valor de "Range" superior a la distancia de muestro que hacía válida la interpolación entre sitios (ver anexo No. 4).

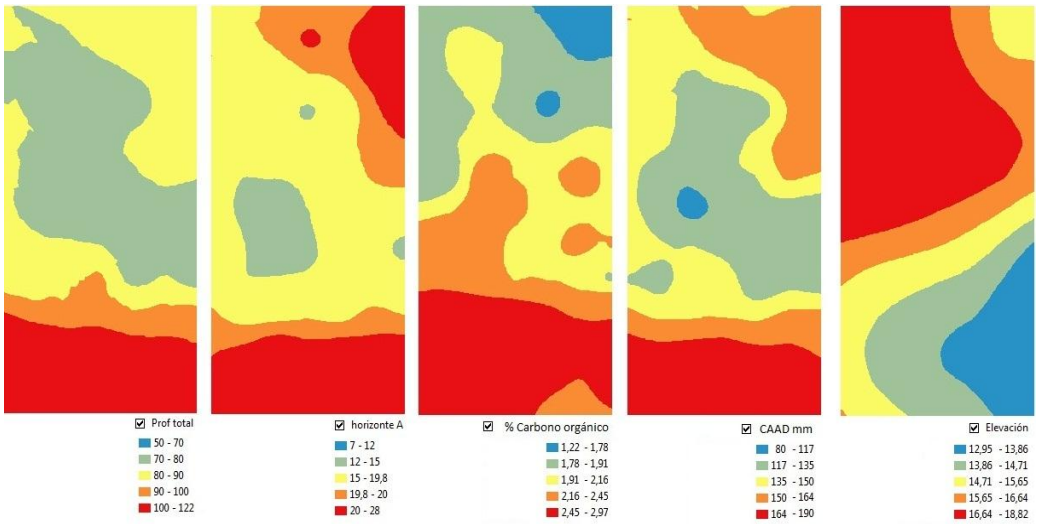


Figura No. 7 Mapa interpolado para profundidad total del perfil del suelo y del horizonte A (cm), % carbono orgánico, CAAD en el perfil (mm) y elevación (m).

Los mapas presentan zonas diferenciables. La zona ubicada topográficamente más baja (cota 13 a 15,7 metros) presenta características buenas para la agricultura de cultivos de secano. En tanto, las zonas altas (cota superior a 15,7 metros) presenta peores características y con mayor variabilidad. Los mapas aislados de cada variable no permiten establecer medidas de manejo por lo que se deben

conformar zonas o ambientes que contemplen las variables en su conjunto.

En este sentido se realizó un conglomerado jerárquico contemplando todas las características edáficas relevadas (ver cuadro No. 4) y se agruparon los 79 sitios en 3 grupos con atributos edáficos similares dentro de grupos y diferenciables entre grupos.

Los grupos 1, 2 y 3 quedaron conformados por 29, 22 y 28 sitios respectivamente y se nombraron según sus características más relevantes (ver anexo No. 2):

1-Medio

2-Menor profundidad y menor CAAD

3-Profundo y alta CAAD

4.2.3.1 Profundidad del suelo, textura y capacidad de almacenar agua disponible (mm)

Cuadro No. 9 Profundidad total del suelo y de cada horizonte (cm) por grupos

Grupo	n	Prof total	EE	Prof hz A	EE	Prof hz B	EE	Prof hz B/C	EE
Profundo y alta CAAD	28	98 a	6,4	21 a	2,4	65 a	4,8	33 a b	7,1
Medio	29	83 b	6,3	17 b	2,3	54 b	4,7	30 b	7,0
Menor profundidad y CAAD	22	73 c	7,2	12 c	2,7	35 c	5,4	38 a	8,0

n: número de sitios; EE: error de muestreo; Prof hz: Profundidad por horizonte (cm)

Medias con una misma letra no presentan diferencia significativa según Test de Tukey ($p<0.05$).

El grupo “profundo y alta CAAD” es el más profundo con una media de 98 cm y baja dispersión en los valores. Eso indica la existencia de una zona con suelo más profundo, diferenciable del resto.

El horizonte A es el de mayor importancia desde el punto de vista de la exploración radicular y dinámica de nutrientes y en él se encuentran diferencias significativas entre los 3 grupos en un rango de 7 a 28 cm. Nuevamente el grupo “profundo y alta CAAD” aparece como superior con una media de 21 cm mientras que los otros dos tienen mayor superposición de valores.

El horizonte B representa más del 50% de la profundidad total del suelo y contribuye a las diferencias encontradas en esta variable para los tres grupos. El grupo “profundo y alta CAAD” es significativamente superior con una media de 65 cm que representa casi el doble de la profundidad del grupo “menor profundidad y CAAD”. La profundidad del horizonte B para el grupo “profundo y alta CAAD” es marcadamente superior al resto y con menor dispersión de los valores.

4.2.3.2 Textura

En cuanto a la textura del horizonte A no se registraron diferencias desde el punto de vista estadístico ($p<0,05$) para ninguna de las tres fracciones.

Por su parte, la textura del horizonte B presentó diferencias en la fracción arcilla. A pesar de que el grupo “medio” y “profundo y alta CAAD” fueron superiores en % arcilla en horizonte B, los valores que toman son medios no superando nunca el 40%. El grupo “profundo y alta CAAD” en un rango de 35 a 39% de arcilla fue el que presentó la media superior diferenciándose en mayor magnitud del grupo “menor profundidad y CAAD” (media 21%) y en menor magnitud del grupo “medio” (media 33%).

En cuanto a la relación de arcilla entre el horizonte A y B se presenta de forma aleatoria para los tres grupos relaciones en torno a 1,2. No se diferencia para un grupo particular mayor diferenciación textural que pueda explicar diferencias entre ellos.

4.2.3.3 CAAD del perfil y por horizonte (mm)

Cuadro No. 10 Capacidad de almacenaje de agua disponible en el perfil y en cada horizonte (mm)

Grupo	n	CAAD perfil	EE	CAAD hz A	EE	CAAD hz B	EE	CAAD hz C	EE
Profundo y alta CAAD	28	161 a	9,8	42 a	5	80 a	5	39 ab	8,7
Medio	29	139 b	9,6	31 b	4	74 b	5	34 b	8,6
Menor profundidad y CAAD	22	118 c	11	24 c	5	51 c	6	44 a	9,8

n: número de sitios; EE: error de muestreo; CAAD: Capacidad de almacenaje de agua disponible (mm)

Medias con una misma letra no presentan diferencia significativa según Test de Tukey ($p<0.05$).

En cuanto a la CAAD total del perfil se reflejó el mismo ordenamiento que para las variables profundidad total y % arcilla en el horizonte B. El grupo “profundo y alta CAAD” presentó los valores más altos, mayores a 160 mm, perteneciendo a la clase de “Muy Alta” según Molfino y Califra (2001). El grupo “medio” y “menor profundidad y CAAD” se clasifican como clase “Alta” y “Media” respectivamente según Molfino y Califra (2001).

La variable CAAD es muy importante para cultivos de verano pero es un dato potencial, que depende de otros factores como las precipitaciones para expresarse y generar diferencia en rendimiento entre los grupos.

La CAAD de cada horizonte acompaña el mismo ordenamiento que la CAAD total del perfil siendo el horizonte A el principal responsable de las diferencias entre perfiles. Esas diferencias se reflejan en mayor medida para el grupo “profundo y alta CAAD” y se asocian a mayores valores de carbono orgánico y profundidad del

horizonte A, siendo la textura una variable secundaria en la incidencia de la CAAD.

4.2.3.4 Fertilidad del horizonte A

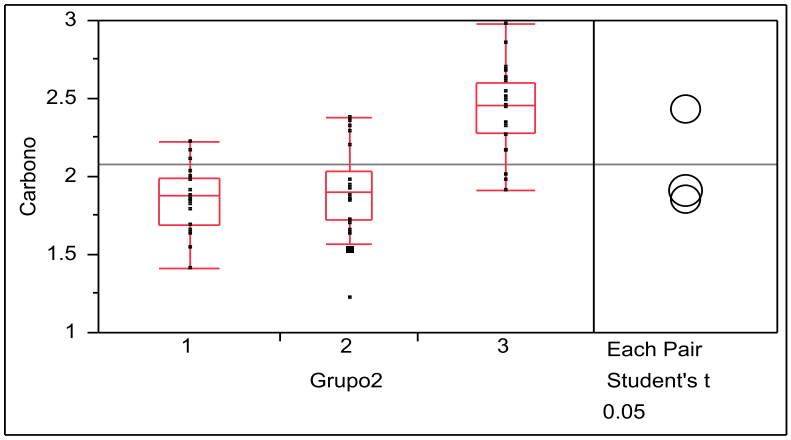
% Carbono orgánico

Cuadro No. 11 Concentración de carbono orgánico (%) en el horizonte A

Grupo	n	Media	EE
Profundo y alta CAAD	28	2,4 a	0,129
Menor profundidad y CAAD	22	1,9 b	0,145
Medio	29	1,8 b	0,126

n: número de sitios; EE: error de muestreo

Medias con una misma letra no presentan diferencia significativa según Test de Tukey (p<0,05).



1: “Medio”; 2: “Menor profundidad y menor CAAD”; 3: “Profundo y alta CAAD”

Figura No. 8 Rango de variación de la concentración de carbono orgánico (%) en el horizonte A por grupo

Se observan dos grandes grupos en cuanto al carbono orgánico presente en el horizonte A. Por un lado se encuentra nuevamente el grupo “profundo y alta CAAD” como superior ($p<0,05$) con un valor promedio superior y con casi la totalidad de los valores por encima de la media de la chacra. Por otro lado, los otros dos grupos, no se diferenciaron desde el punto de vista estadístico y representan un grupo con valores inferiores. Las diferencias claras en materia orgánica encontradas nos marcan que existen dos grandes zonas en cuanto a la fertilidad en la chacra.

Fósforo disponible

No existieron diferencias significativas en nivel de fósforo presentando medias de 21, 20 y 16 ppm para los grupos “medio”, “menor profundidad y CAAD” y “profundo y alta CAAD” respectivamente.

Martín et al. (2004) afirman que fósforo y potasio fueron inconsistentes para explicar la variabilidad del rendimiento en soja. Kravchenko y Bullock (2000) tampoco encontraron relación entre fósforo y rendimiento para niveles iniciales similares no limitantes para el crecimiento del cultivo.

Los tres grupos presentaron valores elevados pero la dispersión de los datos, si bien no es alta, provoca que aparezcan valores por debajo del nivel crítico del cultivo.

pH H_2O y pH KCl

Cuadro No. 12 pH H_2O y pH KCl por grupo

Grupo	n	pH H_2O		EE	pH KCl		EE
Medio	29	5,78	a	0,186	4,95	a	0,153
Menor	22	5,65	a	0,214	4,83	a	0,175

profundidad y CAAD							
Profundo y alta CAAD	28	5,41	b	0,190	4,67	b	0,155

n: número de sitios; EE: error de muestreo

Medias con una misma letra no presentan diferencia significativa según Test de Tukey ($p<0.05$).

Los valores de pH para los tres grupos se encuentran por debajo del rango óptimo del cultivo (6-7). El grupo “profundo y alta CAAD” se diferencia estadísticamente de los otros grupos pero presenta los valores más bajos para esta variable.

Los grupos “medio” y “menor profundidad y CAAD” no difieren desde el punto de vista estadístico y presentan un valor superior, cercano al óptimo para el cultivo, que no se traduce en respuesta vegetal.

CIC y bases

Las diferencias de pH entre los grupos deben analizarse en el contexto de qué bases y en qué concentración forman dicha variable.

No existen grandes diferencias a nivel de propiedades químicas entre los 4 grupos (ver anexo No. 4) que expliquen la variabilidad entre ellos.

Según el mapa de suelos CONEAT en la zona los suelos dominantes son Brunosoles Éutricos Lúvicos y Típicos y la relación de bases reportada por Durán y García Préchac (2007a) no concuerda con los datos obtenidos. Éstos son más cercanos a un Brunosol Subéutrico.

Entre los antecedentes y la información relevada existió una diferencia en valores de CIC y bases. Esto puede estar explicado por la historia de agricultura continua con secuencias trigo-soja de alto poder extractivo.

La muestra compuesta G3 (ver anexo No. 3) pertenece al ambiente de mejores atributos edáficos y presenta muy bajos valores de Na y un buen equilibrio entre las distintas bases. Por su parte el subgrupo RB quien también forma parte del ambiente de mejores características edáficas presenta mayores valores de sodio lo que se tradujo en menor respuesta vegetal.

Las variables que más difieren entre los distintos grupos son potasio y sodio, y éste último en mayor medida afectando la disponibilidad y absorción de los otros. Los valores de K están todos por encima de 0,35 meq/100g no limitante para el crecimiento del cultivo. A pesar de ello, su participación en la CIC no supera el 3% y marca una deficiencia en la capacidad de reposición del nutriente.

Las diferencias entre G3 y RB fueron explicadas por la mayor presencia de potasio respecto a sodio reflejado en diferencias en rendimiento si bien ambos corresponden al mismo cluster. El grupo G3 presentó el valor más bajo de sodio de toda la chacra (0,094 meq/100g) mientras que el grupo RB presentó un valor similar a los otros grupos (0,168 meq/100g). Los valores de sodio no llegan a alcanzar valores problemáticos para el crecimiento del cultivo ya que presenta un máximo de 3% de la CIC, cuando Durán et al. (1997) advierten problemas a partir de 15%.

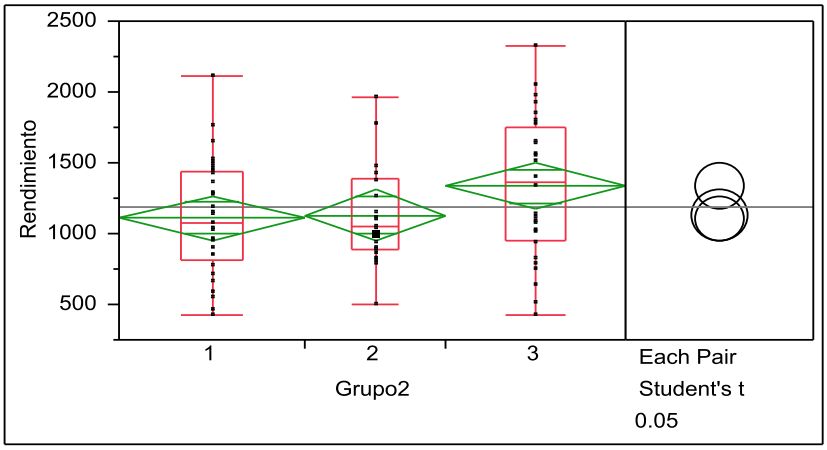
4.2.3.5 Rendimiento de soja (kg/ha) según grupo ambiente-suelo

Cuadro No. 13 Rendimiento de soja (kg/ha) según grupo

Grupo	n	Rendimiento (kg/ha)	EE
Profundo y alta CAAD	28	1333 a	229
Menor profundidad y CAAD	22	1128 a	258
Medio	29	1109 a	225

n: número de sitios; EE: error de muestreo

Medias con una misma letra no presentan diferencia significativa según Test de Tukey (p<0.05).



1: “Medio”; 2: “Menor profundidad y menor CAAD”; 3: “Profundo y alta CAAD”

Figura No. 9 Rendimiento de soja (kg/ha) según grupo

La dispersión de los valores de rendimiento dentro de cada agrupamiento ambiente-suelo es alta, presentando el grupo “profundo y alta CAAD” un CV de 38%, mínimo de 422 kg y máximo de 2326 kg.

Desde el punto de vista estadístico la diferencia en rendimiento de los grupos “medio” y “profundo y alta CAAD” no es significativa al 5%. Igualmente existe una tendencia que muestra una superioridad del grupo “profundo y alta CAAD” que es significativa al 5,24% y 9% frente al grupo “medio” y “menor profundidad y CAAD” respectivamente.

4.2.3.6 Índice de verde normalizado (IVND) en estadio R5

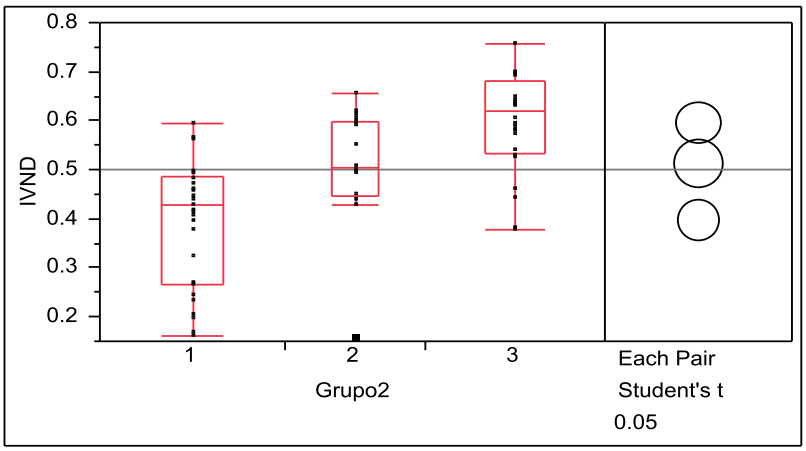
Cuadro No. 14 Índice de verde normalizado (IVND) en estadio R5

Grupo	n	IVND	EE
Profundo y alta CAAD	28	0,60 a	0,06
Menor profundidad y	22	0,51 b	0,07

CAAD				
Medio	29	0,40	c	0,06

n: número de sitios; EE: error de muestreo

Medias con una misma letra no presentan diferencia significativa según Test de Tukey (p<0.05).



1: “Medio”; 2: “Menor profundidad y menor CAAD”; 3: “Profundo y alta CAAD”

Figura No. 10 Índice de verde normalizado (IVND) en estadio R5

El IVND refleja la tendencia marcada anteriormente en el rendimiento pero presentando diferencias significativas entre los grupos (p<0,05). Es posible separar al grupo “menor profundidad y CAAD” y “profundo y alta CAAD” con medias superiores a la media general, y el grupo “medio” con una media de 0,40, sensiblemente por debajo de la misma e incluyendo los registros más bajos de IVND.

Ma (2001) señala que la utilidad del IVND para proyectar y estimar rendimiento en grano es altamente confiable en R4 y R5. En el mismo sentido, el grupo “profundo y alta CAAD” presentó los mayores valores IVND registrados en R5 y mayor media para rendimiento en soja (p<0,0524).

En la figura No. 8 se muestra la variación del rendimiento en grano de soja de segunda obtenido con el monitor de rendimiento e IVND en estadio R5.

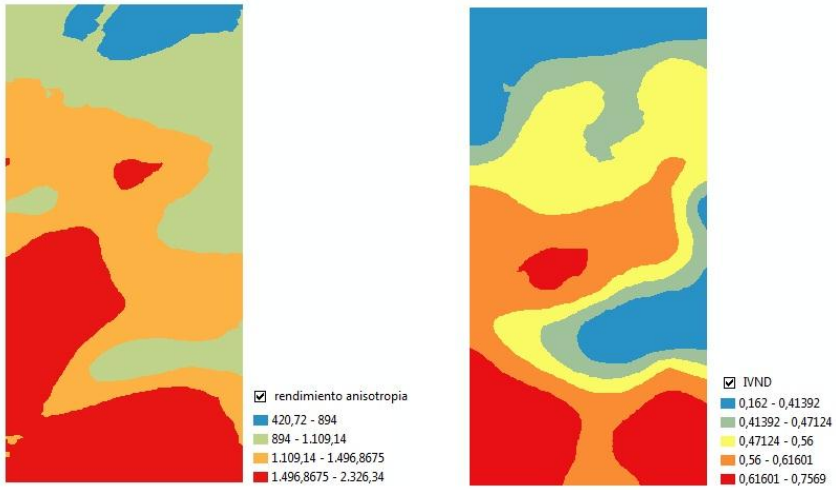


Figura No. 11 Mapa de rendimiento (izquierda) e IVND (derecha) interpolados

La figura No. 11 muestra la distribución en la chacra de los rendimientos e IVND donde se observa la coincidencia de los valores superiores con la zona baja y de mejores atributos edáficos (ver figura No. 8). Para los valores medios y bajos la variabilidad en el mapa de colores es mayor y no se observa tan claramente.

4.2.4 Contingencia entre ambientes pre-establecidos y grupos ambiente-suelo

Cuadro No. 15 Tabla de contingencia para ambientes pre-establecidos y grupos ambiente-suelo

	A	B	D	Total
Medio	0	22	7	29
Menor prof y CAAD	0	22	0	22
Profundo y alta CAAD	27	0	1	28
Total	27	44	8	79

A: “Ambiente A” rendimiento esperable 30% superior; B: “Ambiente B” rendimiento variable entre años y/o cultivo; D: “Ambiente D” rendimiento esperable 30% inferior.

Los monitores de rendimiento contemplan la variabilidad temporal, mientras que el mapa de propiedades del suelo muestra la variabilidad espacial más pura, repetible y estable. El cuadro No. 12 muestra el grado de asociación entre los ambientes predefinidos y los clusters generados a partir de los atributos edáficos. El nivel de concordancia indica que la variabilidad de respuesta vegetal acompaña la variabilidad de las propiedades del suelo intra-chacra.

De los sitios relevados que corresponden al ambiente A, el 100% pertenece al grupo “profundo y alta CAAD”. El ambiente que sistemáticamente en todos los años rindió más explica su mejor comportamiento por las propiedades del suelo que lo definen como de mejor aptitud agrícola. La metodología para clasificar ambientes a partir de IVND y monitores de rendimiento fue una buena herramienta para delimitar las zonas de mayor potencial en las condiciones de la zafra pasada.

El ambiente B, que se definió como variable según el año, explica su variabilidad desde las propiedades del suelo. Esa variabilidad temporal tiene un sustento en la variabilidad espacial intra-chacra ya que el 50% de los sitios de muestreo se encuentran en el grupo “medio” y el otro 50% en el grupo “menor profundidad y CAAD”.

Cuando el ambiente B presenta altos rendimientos se puede adjudicar al efecto año ya que desde el punto de vista de los atributos edáficos no tiene sustento para explicar ese comportamiento. En este sentido, cuando el efecto año no es favorable, se comporta acorde a las características del suelo más importantes.

En este caso el monitor de rendimiento e IVND no fueron buenas herramientas para definir zonas de manejo, ya que son muy dependientes del efecto año y no son capaces de interpretar las verdaderas limitantes de la zona que serán las que definan el manejo más adecuado.

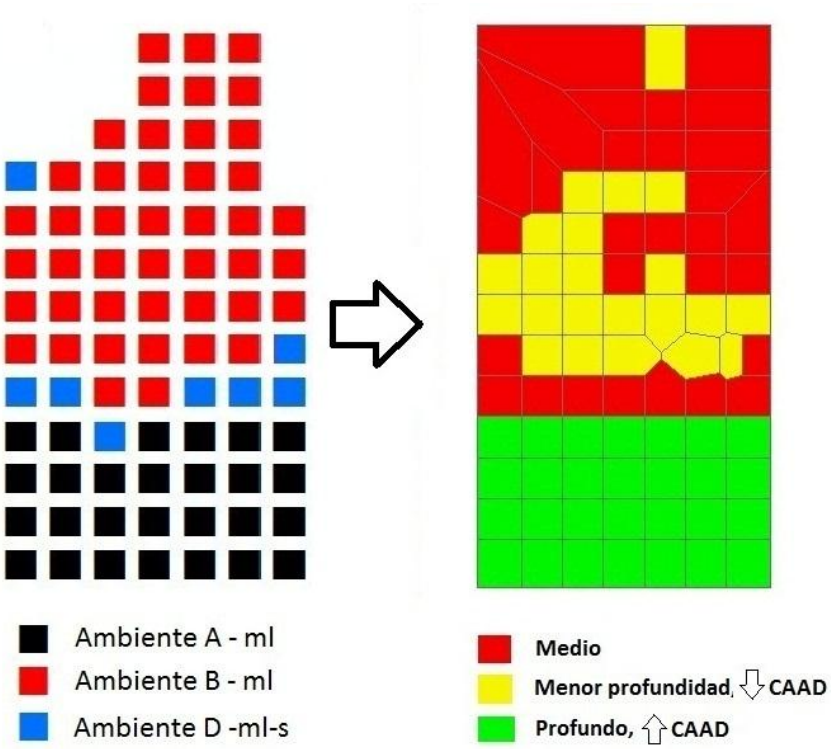


Figura No. 12 Concordancia entre mapa de grupos ambiente-suelo (derecha) y mapa de ambientes pre-establecidos (izquierda)

La Figura No. 12 muestra que existe una alta concordancia, confirmando lo mencionado por Terra et al. (2010) en que los atributos edáficos están correlacionados con los patrones de variabilidad de los rendimientos de cultivos agrícolas.

La variabilidad temporal del rendimiento, contemplada en los ambientes de ADP, tuvo una alta relación con la variabilidad espacial de las propiedades del suelo en la chacra a pesar de que la relación entre ellas es compleja (MacBratney y Pringle, citados por Plant, 2001).

4.2.5 Análisis de correlaciones

El cuadro No. 16 muestra el signo y magnitud de las correlaciones entre las variables relevadas que tienen mayor representatividad en explicar las relaciones entre rendimiento, IVND y propiedades del suelo.

Cuadro No. 16 Coeficientes de correlación de Pearson para las variables más relevantes

	Y	IVND	Altura	Proftotal	Prof hzA	pHKCl	% C org	Ac hzA	Ac hzB	CAAD
Y		0,312	-0,154	0,299	0,124	-0,188	0,263	-0,092	0,157	0,253
IVND			-0,162	0,379	0,339	-0,149	0,536	0,155	0,036	0,404
Altura				-0,330	-0,337	0,174	-0,462	-0,150	-0,542	-0,306
Proftotal					0,621	-0,175	0,467	0,221	0,584	0,930
Prof hzA						-0,091	0,289	0,330	0,578	0,793
pHKCl							-0,267	0,256	-0,128	-0,154
% C org								0,136	0,406	0,443
Ac hzA									0,161	0,266
Ac hzB										0,588
CAAD										

Y: rendimiento de soja 2011; Ac: % arcilla; CAAD: capacidad de almacenaje de agua disponible.

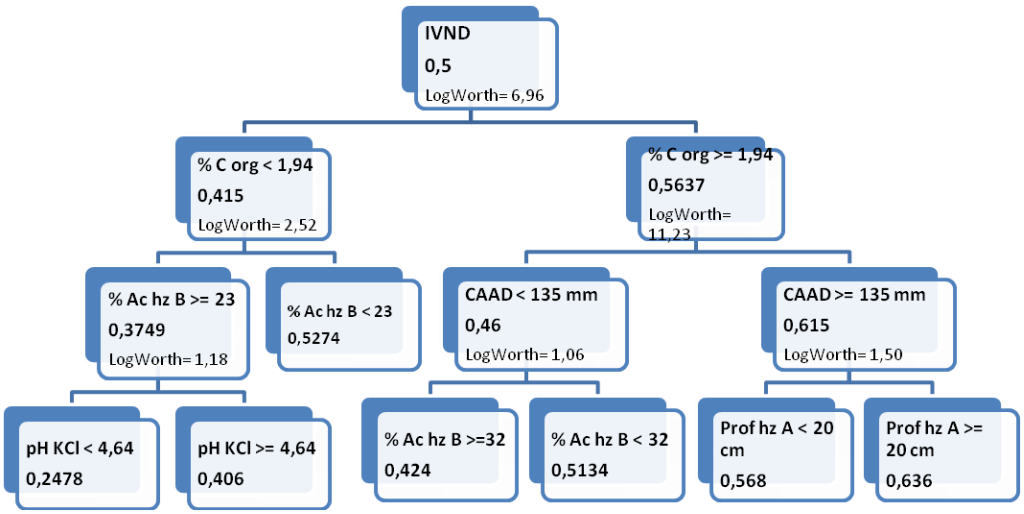
La altura se correlacionó negativamente con la profundidad del perfil, lo que afirma lo encontrado por Kravchenko y Bullock (2000). En el mismo sentido, la correlación fue alta y negativa con % carbono orgánico, % arcilla en el horizonte A y B y CAAD del perfil.

Estas propiedades del suelo no lograron correlacionarse en forma clara con el rendimiento, la respuesta entre ellos fue errática. La interpretación de los valores de las correlaciones pierden peso relativo cuando múltiples variables como las que afectan el rendimiento están en juego (Martín et al., 2004).

El rendimiento de soja se correlacionó alta y positivamente con profundidad total, y CAAD del perfil. Los valores más altos de IVND se correlacionan en gran medida con alta CAAD, y ésta a su vez, con una correlación de 0,93, con mayor profundidad del perfil, variable contemplada dentro de las ecuaciones de estimación de CAAD (Molfino y Califra, 2001).

4.2.6 Análisis de árboles de clasificación y regresión

4.2.6.1 Árbol de regresión y clasificación para IVND



Los valores de IVND promedio registrados fueron bajos debido a la presencia de rastrojo de trigo sobre el suelo (soja de segunda) y problemas en alguna zona de la chacra por la sequía que afectó el crecimiento y desarrollo del canopeo.

Se distinguen dos grupos según % carbono orgánico, encontrando los mejores resultados con valores por encima de 1,94%.

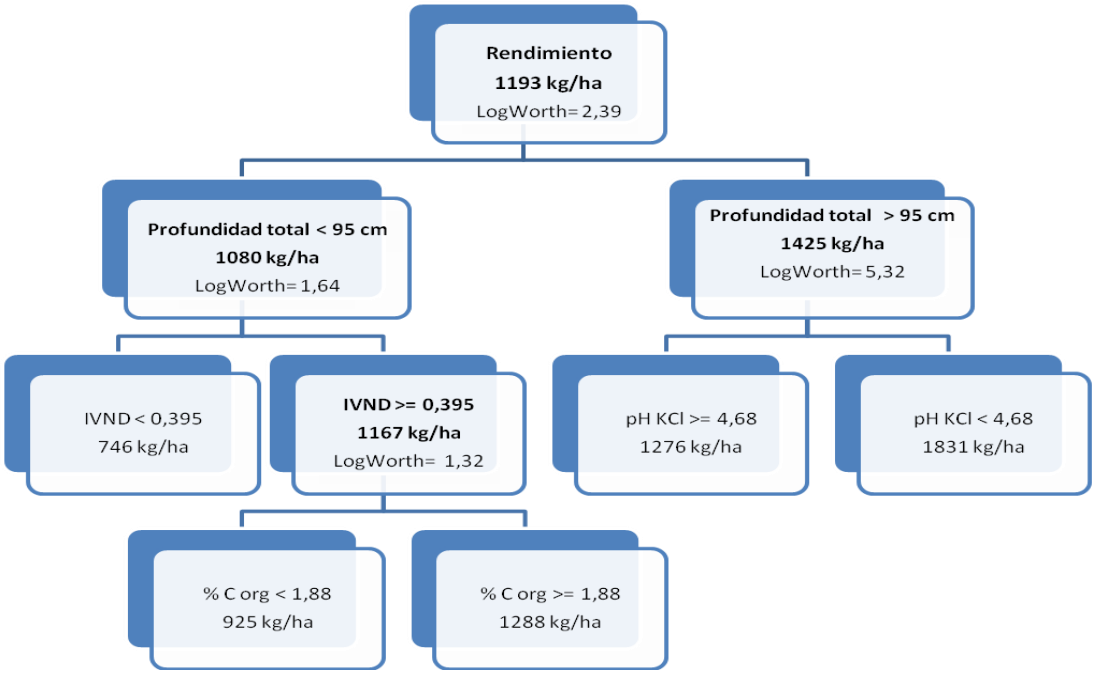
Por el lado de los IVND superiores se destacan los sitios con CAAD en el perfil mayor a 135 mm y horizonte A de más de 20 cm. Esta rama sigue una secuencia lógica, en donde todas las características que la definen, representan un ambiente de muy buenas condiciones para el crecimiento del cultivo aumentando su peso relativo por las condiciones climáticas del verano 2010-2011, con precipitaciones por debajo de la media.

Dentro de los valores superiores, en la rama de CAAD menor a 135 mm, los mayores IVND se obtuvieron con menos de 32% de arcilla en el horizonte B.

Por el lado de los menores % carbono orgánico (<1,94%), los grupos que presentaron menor índice de verde son aquellos que tienen más de 23 % de arcilla en el horizonte B y pH en KCl menor a 4,64.

El % de arcilla en el horizonte B aparece en dos circunstancias en el árbol explicando un mayor IVND cuando presenta valores inferiores a 23 y 32%. Esto coincide con lo reportado por Irmak (2001) donde establece que perfiles con mayor cantidad de arcilla, en un rango de 20,6% a 31,5%, significaron menor disponibilidad de agua y nutrientes. Esto generó menores valores de IVND tanto en la rama de valores superiores como inferiores.

4.2.6.2 Árbol de regresión y clasificación para rendimiento



El rendimiento estuvo influenciado en primer lugar por la profundidad total del suelo donde por encima y por debajo de 95 cm de distinguen dos grupos de rendimientos contrastantes (1425 y 1080 kg/ha respectivamente). Esto concuerda con lo expresado por Irmak (2001) donde establece que la estimación precisa de propiedades del suelo que influyen en el estrés hídrico es la clave para explicar la variabilidad en el rendimiento. Particularmente en años secos, como ocurrió durante el ciclo del cultivo, es más frecuente encontrar correlaciones estrechas entre rendimiento y profundidad del perfil.

Dentro del grupo de mayor profundidad de suelo (> 95 cm), la variable que aparece con mayor influencia es el pH en KCl.

El rango de valores de pH obtenidos en el ensayo está por debajo de los óptimos para la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes esenciales y el proceso de fijación simbiótica del nitrógeno (Byre et al. 2004, Ausilio y Magra 2004, García et al. 2009).

En contraposición a lo reportado por la bibliografía, se obtuvieron los rendimientos más altos conforme el pH en KCl era menor a 4,68. Los valores de pH en torno al óptimo indican la presencia de bases como Na que afectan el crecimiento de la planta y dificultan la dinámica de absorción de agua y nutrientes lo cual disminuye los rendimientos. Estos valores no fueron elevados a tal punto que sólo definieron diferencias en la rama de rendimientos más elevados.

En la rama de rendimientos menores, si bien la profundidad del perfil era menor a 95 cm, la combinación de IVND mayor a 0,395 y % carbono orgánico mayor a 1,88 permitió obtener rendimientos de 1288 kg/ha, superando al límite inferior de la rama de rendimientos más altos.

En el mismo sentido que lo encontrado por Kravchenko y Bullock (2000), el nivel de materia orgánica fue la propiedad del suelo que presentó mayor correlación con el rendimiento de soja siendo alta y positiva para valores de análisis inferiores a 3%.

Visto de otra manera, carbono orgánico mayor a 1,88% permitió obtener valores de IVND (r^2=0,5) y rendimientos altos aún cuando la profundidad del suelo era menor a 95 cm.

La profundidad fue la variable que primero definió el rendimiento y valores menores a 95 cm obtuvieron los valores más bajos. La profundidad es una característica intrínseca de la chacra, estable, y para manejarla es necesario planificar el uso y manejo del suelo. Con solo eliminar las zonas donde a priori las características edáficas no respaldan la probabilidad de sacar buenos rendimientos, podemos levantar el rendimiento promedio.

5. CONCLUSIONES

Los ambientes generados con los datos de monitor de rendimiento e IVND de años anteriores tuvieron un alto grado de asociación con los grupos (ambiente-suelo) generados a partir de los atributos edáficos determinados en la grilla de muestreo definida en la chacra.

El grado de asociación fue mayor entre el ambiente pre establecido como de rendimiento esperable superior (A) y el ambiente-suelo denominado “profundo y alta CAAD”. El ambiente “B” de rendimiento variable según año y cultivo no tuvo una buena asociación con ningún grupo en particular ya que los sitios se repartieron entre los grupos “medio” y “menor profundidad y CAAD”.

El ambiente “A” justifica su comportamiento por sus atributos edáficos: profundidad del perfil del suelo y del horizonte A, concentración de carbono orgánico en el horizonte A y capacidad de almacenaje de agua disponible. En este caso, las herramientas como IVND y monitor de rendimiento copiaron la variabilidad espacial lo cual nos indica que pueden ser herramientas válidas para la definición de zonas de alto potencial. Estos resultados son alentadores ya que su practicidad y facilidad a la hora de tomar los datos será útil únicamente si es capaz de determinar zonas con bajo error y alta repetibilidad.

Los atributos del terreno asociados a los relativamente más altos rendimientos de soja obtenidos en el ambiente suelo “profundo y alta CAAD” fueron la profundidad del perfil, marcando un límite en 95 cm, y en segundo nivel fue la CAAD generando diferencias a partir de 135mm. Para el IVND, la variable que afectó en primer nivel fue la fertilidad medida como concentración de carbono orgánico en el horizonte A (> y < 1,94%).

Al ser las propiedades del suelo definidas como estructurales, contemplan la variabilidad natural y son relativamente incambiables en el corto plazo, por lo que permiten definir zonas de manejo de manera independiente de la variabilidad espacial-temporal que recogen los monitores de rendimiento e IVND.

Existió relación aunque no de mayor magnitud entre IVND y rendimiento ya que su correlación fue de r^2 =0,3. Ambas variables fueron afectadas por la condición del cultivo (FS, Antecesor: trigo, problemas sanitarios) y el déficit hídrico y por ello los valores fueron bajos afectando la correlación entre ellas. El IVND no se comportó como un buen estimador de rendimiento, incluso cuando los valores se tomaron en el estado fenológico (R5) cuando la bibliografía señala más preciso para la estimación.

6. RESUMEN

Existe la necesidad de aumentar la productividad en un ambiente de alta variabilidad espacial y temporal a la que son sometidos los cultivos en los sistemas de producción del Uruguay. A pesar de ello, es generalizado el manejo uniforme de los cultivos utilizando el potrero como unidad de decisión agrícola, generando ineficiencias económicas y ambientales. Esto exige ajustar el manejo agronómico en función de la variabilidad del rendimiento siendo el desafío determinar el origen y magnitud de dicha variabilidad, entender cuáles son las variables que definen el rendimiento lograble y el manejo que se debe incorporar para contemplar esas limitantes. El objetivo del presente estudio fue cuantificar y comparar la variabilidad intrachacra de los atributos edáficos (espacial) y el rendimiento en soja de segunda (temporal) y evaluar su interacción. Se trabajó en una chacra ambientada con datos de monitor de rendimiento e IVND y se realizó un muestreo en grilla de puntos georeferenciados que abarcaban todos los ambientes preestablecidos. Con esa información se realizó un mapa de propiedades del suelo a partir de nuevos grupos ambiente-suelo generados por análisis de clusters. El grado de asociación entre el ambiente preestablecido como de “alto rendimiento esperado” y el grupo ambiente-suelo generado fue total lo que demuestra la eficiencia de la metodología para definirlos y también la validez del monitor de rendimiento e IVND para delimitar zonas pre siembra de rendimientos elevados. El IVND no demostró mayor correlación (r^2=0,3) con el rendimiento por lo que su validez como estimador confirma las dudas encontradas en la revisión bibliográfica. Las variables explicativas que afectaron en mayor magnitud a las variables de respuesta (IVND y rendimiento) fueron la profundidad total del perfil, la fertilidad y la CAAD. Estas variables son estables, difíciles de modificar, por lo que el manejo debe apuntar a contemplarlas en un sistema que defina zonas a partir de ellas y que expresen una combinación homogénea de factores del rendimiento para las que sería apropiado un manejo similar tanto del suelo como del cultivo.

Palabras clave: Variabilidad temporal; Variabilidad espacial; Zonas de manejo.

7. SUMMARY

The agricultural zone of Uruguay needs to increase crop yields in an environment with high temporal and spatial variability. Despite this, uniform management of crops is generalized among farmers, using the paddock as a decision unit, causing economic and environmental inefficiencies. This requires adjusting the agronomic management taking into consideration yield variability, being the most important challenge to determine the origin and magnitude of this variability, to understand the causes that define achievable yield and the practices that need to be included to consider these limitations. The aim of this study was to quantify and compare within field variability of soil properties (spatial) and soybean after wheat yield (temporal), and assess their interaction. The study was conducted in a field zoned by its productivity using yield monitor and IVND images, where a soil grid sampling was performed in geo-referenced sites in order to include all pre-established productivity zones. This information was used to map soil properties starting from new zones that were defined by a cluster analysis and contemplate spatial variability. The association between pre-established zone named “high expected yield” and the zone generated and defined by the best soil properties was total, which demonstrates the efficiency of the method to determine them and also the validity of yield monitor and IVND to delimit high yield zones before sowing. IVND had low correlation (r^2=0,3) with soybean yield so its validity as an estimator confirm the doubts found in literature. The explanatory variables that affected mostly yield and IVND were total soil depth, fertility, and available water storage capacity. These variables are permanent, so practices should contemplate them in a system that defines zones from them and express a homogeneous combination of yield factors that would be appropriate for similar soil and crop management.

Keywords: Temporal variability; Spatial variability; Management zones.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ, C.; BARRACO, M.; SCIANCA, C. 2009. Efecto de las condiciones sitio-especifico sobre la productividad y variabilidad de los cultivos en la región de la pampa arenosa. In: Jornada Agrofutura (1º, 2009, Trenque Lauquen). Trabajos presentados. Buenos Aires, INTA General Villegas. p. irr.

2. ALVES da SILVA, E. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; GODOY SOUZA, E.; VIEIRA ROCHA, J. 2003. Um estimador robusto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos de solo e planta. Acta Scientiarum. Agronomy (Maringá). 25 (2): 365-371.

3. AUSILIO, A.; MAGRA, G. 2004. Corrección de la acidez de los suelos. Revista Agromensajes. no. 13: 31-36.

4. BEST, S.; LEÓN, L. 2006. Geoestadística. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 147-161.

5. BONGIOVANNI, R. 2004a. La agricultura de precisión en la cosecha. Proyecto Agricultura de precisión. INTA Manfredi. Revista Idia XXI. 6:85-90.

6. _____.; LOWENBERG-DEBOER, J. 2004b. Precision agriculture and sustainability. Precision Agriculture. 5:359-387.

7. _____.; _____. 2006. Adopción de la agricultura de precisión en el cono sur de américa In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 201-219.

8. BRAGACHINI, M.; von MARTINI, A.; MÉNDEZ, A. 2000. Alcances y precisión de los monitores de rendimiento. Componentes de agricultura de

precisión. Proyecto Agricultura de precisión. Córdoba, Argentina. INTA Manfredi. 5 p.

9. _____.; MÉNDEZ, A.; SCARAMUZZA, F.; PROIETTI, F. 2006. Monitoreo de rendimiento y elaboración de mapas. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 43-52.

10. _____. 2007. La agricultura de precisión, presente y futuro. In: Curso de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas (7º, 2007, Manfredi, Córdoba, Argentina). Actualización técnica sobre los avances en agricultura de precisión. Manfredi, INTA. pp. 13-28.

11. BYRE, K. R.; CHEN, P.; PURCELL L. C.; MOZAFFARI, M.; NORMAN, R. J. 2004. First-year soybean growth and production as affected by soil properties following land leveling. Plant and Soil. 263:323-334.

12. CAMBARDELLA, C. A.; KARLEN, D. L. 1999. Spatial analysis of soil fertility parameters. Precision Agriculture. 1:5-14.

13. DURÁN, A.; IPPOLITTI, G.; ZAMALVIDE, J. P.; GARCÍA, F. 1997. Propiedades físico químicas de los suelos. Montevideo, Facultad de Agronomía. 109 p.

14. _____.; GARCÍA PRÉCHAC, F. 2007a. Suelos del Uruguay; origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Hemisferio Sur. t. 1, 358 p.

15. _____.; _____. 2007b. Suelos del Uruguay; origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Hemisferio Sur. t. 2, 334 p.

16. ERNST, O.; SIRI, G. 2011. La agricultura en el Uruguay, su trayectoria y consecuencias. In: Simposio Nacional de Agricultura (2º, 2011, Paysandú). No se llega, si no se sabe a dónde ir. Paysandú. Hemisferio Sur. pp. 149-163.

17. FEHR, W. R.; CAVINESS, C.E. 1977. Stages of soybean development. Iowa State University. Special Report no. 80. 11 p.

18. GARCÍA, F. O. 2002. Beneficios potenciales del uso de las herramientas de agricultura de precisión en el diagnóstico y aplicación de fertilizantes. In: Taller de Agricultura de Precisión del Cono Sur de América (3º, 2002, Córdoba, Argentina). Textos. Córdoba, PROCISUR/INTA/INIA. pp. 1-6

19. _____.; CIAMPITTI, I. A.; BAIGORRI, H. E. 2009. Manual de manejo del cultivo de soja. Buenos Aires, IPNI. cap. 3, pp. 33-76.

20. GRATTAN, S. R.; GRIEVE, C. M. 1992. Mineral element acquisition and growth response of plants grown in saline environments. Agricultural Ecosystems Environment. 38:275-300.

21. GRUPO INFOSTAT. 2010. Manual del usuario; versión 2010e. Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. 336 p.

22. IRMAK, A.; JONES, J. W.; BATCHELOR, W. D.; PAZ, J. O. 2001. Estimating spatially variable soil properties for application of crop models in precision farming. Transactions of the ASAE. 44(5): 1343-1353.

23. KOPITTKE, P. M.; MENZIES, N. W. 2007. A review of the use of the basic cation saturation ratio and the “ideal” soil. Soil Science Society of American Journal. 71:259–265.

24. KRAVCHENKO, A.; BULLOCK, D. 2000. Spatial variability; correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. Agronomy Journal. 92(1): 75-83.

25. MA, B. L.; DWYER, L. M.; COSTA, C.; COBER, E. R.; MORRISON, M. 2001. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurments. Agronomy Journal. 93:1227-1234.

26. MARTÍN, N. F.; BULLOCK, D. G.; BOLLERO, G. 2004. Associations between field characteristics and soybean plant performance using canonical correlation analysis. Plant and Soil. 273:39-55.

27. MANTOVANI, E.; DE CARVALHO PINTO, F. de A.; MARÇAL DE QUEIRO, D. 2006. Introducción a la agricultura de precisión. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 13-22.

28. MOLFINO, J.H.; CALIFRA, A. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay; segunda aproximación. Montevideo, MGAP. DGRNR. División Suelos y Aguas.12 p.

29. OTAÑO, C.; ZARUCKI, I. 2010. Impacto de distintos niveles de fertilidad y atributos de terreno sobre la variabilidad de rendimiento del cultivo de soja a escala de chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de agronomía.107 p.

30. PLANT, R. E. 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production. Computers and Electronics in Agriculture. 30:9-29.

31. PRAVIA, V. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espaciotemporal en la investigación de cultivos agrícolas, A) Impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra, B) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSATv4 CERES-Rice. Tesis M.Sc. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 102 p.

32. QUAGGIO, J. A.; MASCARENHAS, H. A. A.; BATAGLIA, O. C. 1982. Reposta da soja a aplicacao de doses crescentes de calcario em latossolo roxo distrofico de cerrado. Revista Brasileira do Ciencia do Solo. 6:113-118.

33. ROEL, A.; FIRPO, H. 2006a. Agricultura de precisión en Uruguay. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 236-242.

34. _____. 2006b. Análisis de cluster y CART. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 168-170.

35. _____.; TERRA, J. 2006c. Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 65-80.

36. SAS INSTITUTE. 2008. JMP Users guide; versión 8.0. Cary, NC. 280 p.

37. SEIDL, M. S.; BATCHELOR, W. D.; PAZ, J. O. 2000. Integrating remotely sensed images with a soybean model to improve spatial yield simulation. Transactions of the ASAE. 47(6):2081-2090.

38. TERRA, J.; MELO, D.; SAWCHIK, J. 2010. Atributos edáficos y topográficos relacionados a los patrones de variación de rendimiento de cultivos agrícolas en Uruguay. In: Reunión Técnica (1ª, 2010, Colonia del Sacramento, Colonia, Uruguay). Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos. Montevideo, Sociedad Uruguaya de Ciencias del Suelo/International Soil and Tillage Research Organization. pp. 7-17.

39. URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. PRENADER. 2010. Cartografía de suelos CONEAT. (en línea). Montevideo. Consultado 17 may. 2010. Disponible en http://www.prenader.gub.uy/coneat

Anexo No. 1 Descripción estadística de las variables por ambiente

Grupo	Variable	Y	IVND	Altura	Prof total	Prof hz A	Prof hz B	Prof hz B/C	P ppm	pH H2O	% C org	% Ac hz A	% Ar hz A	% L hz A	% Ac hz B	CAAD mm	CAAD hz A	CAAD hz B
A-ml	Media	1359	0,60	14,0	99	21	66	34	15	5,43	2,4	28	35	37	36	162	42	80
	Desv	494	0,09	0,7	11	4	13	14	6	0,28	0,3	8	11	8	2	17	10	10
	Max	2326	0,76	15,3	122	28	100	60	28	5,90	3,0	36	48	53	39	190	60	110
	Min	422	0,38	13,0	80	10	50	0	7	4,91	1,9	19	17	33	35	126	22	65
	CV %	36	16	5	11	21	20	43	38	5	10	28	31	20	6	10	23	13
B-ml	Media	1096	0,47	16,2	80	15	44	36	17	5,69	1,9	25	34	41	26	132	28	62
	Desv	363	0,12	1,1	13	5	11	12	9	0,36	0,2	7	7	9	6	21	9	15
	Max	1963	0,65	18,6	105	28	70	60	49	6,77	2,4	39	46	55	35	172	57	100
	Min	421	0,16	13,8	50	7	22	10	5	5,00	1,2	19	17	27	20	80	11	30
	CV %	33	26	7	16	33	24	33	53	6	13	29	21	21	23	16	32	23
D-ml-s	Media	1173	0,32	14,8	74	13	57	17	42	5,77	1,9	22	35	44	35	118	25	73
	Desv	490	0,11	1,8	13	3	8	11	23	0,62	0,3	3	8	5	2	14	5	8
	Max	2109	0,48	18,8	95	18	70	35	77	6,70	2,5	29	46	53	39	137	34	86
	Min	583	0,19	13,2	56	10	45	0	19	4,86	1,5	20	17	34	32	98	19	59
	CV %	42	35	12	17	23	14	66	56	11	16	14	23	12	5	12	19	12

Anexo No. 2 Descripción estadística de las variables por grupo

Grupo	Variable	Y	IVND	Altura	Prof total	Prof hz A	Prof hz B	Prof hz B/C	P ppm	pH H2O	% C org	% Ac hz A	% Ar hz A	% L hz A	% Ac hz B	CAAD mm	CAAD hz A	CAAD hz B
1	Media	1109	0,40	15,9	83	17	54	30	20,7	5,78	1,9	26	34	41	33	139	31	74
1	Desv	409	0,13	1,4	12	5	7	13	18,0	0,42	0,2	8	8	10	2	19	9	9
1	Max	2109	0,59	18,8	105	28	70	60	77,1	6,77	2,2	39	46	55	39	172	57	100
1	Min	421	0,16	13,2	56	10	45	0	5,1	5,17	1,4	19	17	27	32	98	19	59
1	CV %	37	33	9	14	29	13	46	87	7	11	31	24	24	5	14	28	12
2	Media	1128	0,51	16,2	73	12	35	38	20,3	5,65	1,9	23	35	42	21	118	24	51
2	Desv	342	0,10	1,2	12	4	5	12	10,1	0,33	0,3	5	7	6	1	18	7	8
2	Max	1963	0,65	18,2	90	20	42	55	48,8	6,19	2,4	39	46	53	23	146	35	61
2	Min	500	0,17	13,8	50	7	22	12	9,8	5,00	1,2	19	17	27	20	80	11	30
2	CV %	30	21	7	17	29	15	31	49	6	15	21	19	15	5	15	28	17
3	Media	1333	0,60	14,0	98	21	65	33	16,1	5,41	2,4	28	35	37	36	161	42	80
3	Desv	504	0,10	0,6	12	5	13	15	7,5	0,30	0,2	8	11	8	2	18	10	10
3	Max	2326	0,76	15,3	122	28	100	60	41,1	5,90	3,0	36	48	53	39	190	60	110
3	Min	422	0,38	13,0	75	10	50	0	6,7	4,86	1,9	19	17	33	35	124	22	65
3	CV %	38	16	5	12	23	19	44	47	5	10	29	31	20	6	11	24	13

Grupo 1: “Medio”; Grupo 2: “Menor profundidad y CAAD”; Grupo 3: “Profundo y alta CAAD”.

Anexo No. 3 Construcción de muestras compuestas para análisis de CIC y bases

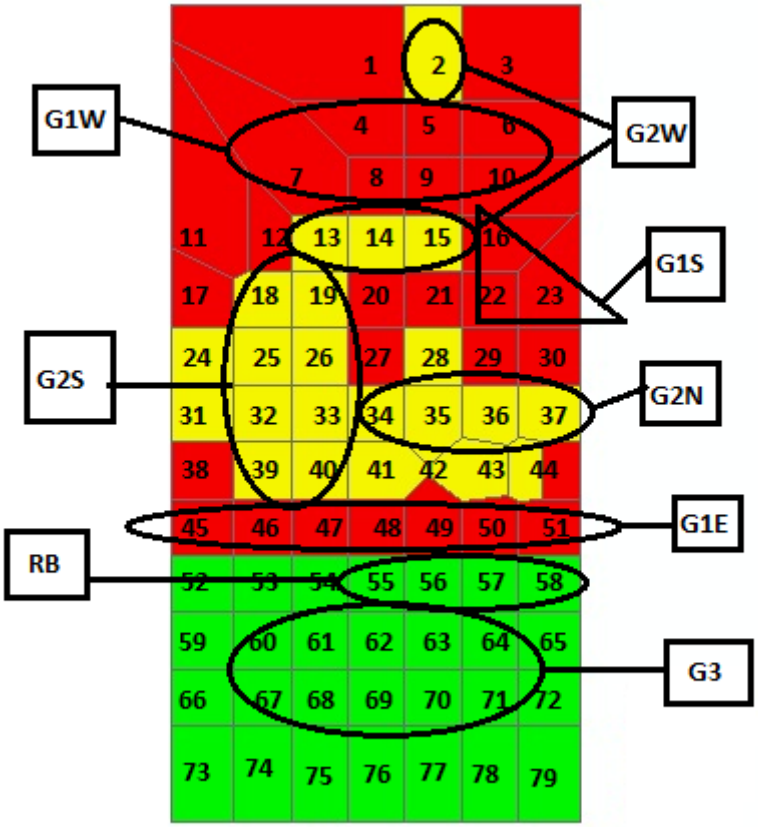


Figura No. 1 Mapa de grupos y muestras compuestas para análisis de CIC y bases (Rojo: Grupo “medio”; Amarillo: Grupo “menor profundidad y CAAD”; Verde: Grupo “profundo y alta CAAD”)

Cuadro No. 1 Valores de Ca, Mg, K, Na, CIC, Bases totales y % Saturación de Bases para cada muestra compuesta

Nombre Muestra	GRUPO	Ca	Mg	K	Na	$CICpH_7$	Bases Totales	% Sat Bases
G1 W	1	11,15	1,072	0,41	0,506	16,486	13,138	79,7
G1 E	1	10,02	1,135	0,392	0,13	14,832	11,677	78,7
G1 S	1	12,26	0,937	0,567	0,081	16,038	13,845	86,3
G2 W	2	12,71	1,408	0,475	0,139	18,118	14,732	81,3
G2 S	2	12,94	1,074	0,489	0,253	18,489	14,756	79,8
G2 N	2	13,36	0,997	0,61	0,187	18,309	15,154	82,8
G3	3	11,09	1,214	0,548	0,094	17,794	12,946	72,8
RB	4	9,87	1,033	0,461	0,168	16,727	11,532	68,9

Cuadro No. 2 % que cada base ocupa sobre la CIC y relación de bases

		% sobre CIC						
	GRUPO	Ca	Mg	K	Na	Ca/Mg	Mg/K	Ca+Mg/K
G1 W	1	0,6763	0,065	0,025	0,031	10,4	2,61	13,76
G1 E	1	0,6755	0,076	0,026	0,009	8,8	2,89	12,91
G1 S	1	0,7644	0,058	0,035	0,005	13,1	1,65	13,91
G2 W	2	0,7015	0,078	0,026	0,008	9,0	2,96	15,67
G2 S	2	0,6999	0,058	0,026	0,014	12,0	2,19	15,14
G2 N	2	0,7297	0,054	0,033	0,010	13,4	1,63	14,99
G3	3	0,6232	0,068	0,031	0,005	9,1	2,21	13,31
RB	4	0,5900	0,062	0,028	0,01	9,6	2,24	12,11

Anexo No. 4 Semivariogramas

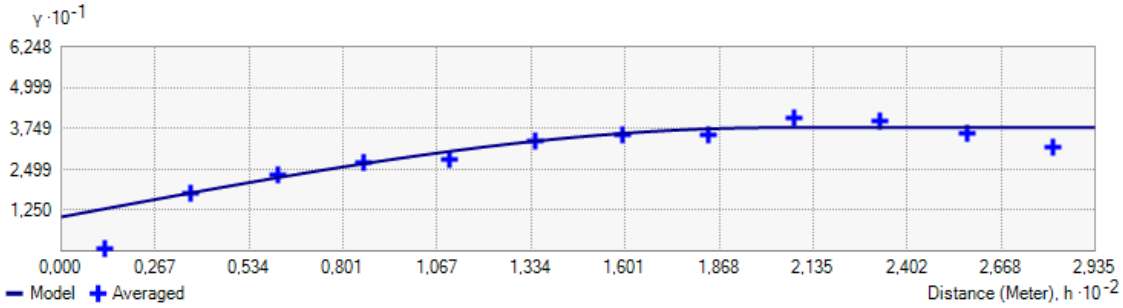
Variable	Horz A	% C	CAAD	Elevación	IVND
Modelo de ajuste	Estable	Esférico	Esférico	Exponencial	Esférico
Co	10,436	0,032	207,805	0	0,004
Meseta	27,293	0,148	566,066	3,966	0,0139
Rango	203,14	402,59	233,05	402,59	127,26
Relación Co/(Co+Meseta)	0,277	0,178	0,268	0	0,223

Anexo No. 5 Validación cruzada

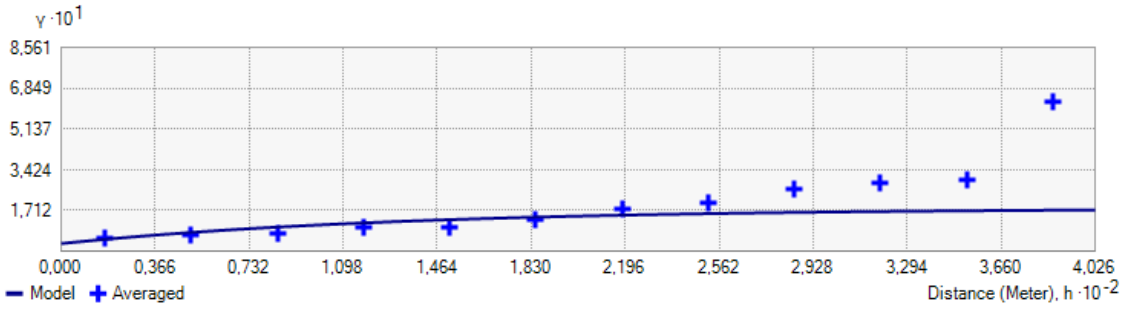
Variable	Horz A	%Carbono	CAAD	Elevación	IVND
Función de regresión	0,524 * x + 8,055	0,529 * x + 0,978	0,483 * x + 73,207	0,981 * x + 0,286	0,572 * x + 0,221
Mean	0,0086	-9,645e-005	0,0367	-0,0042	0,00218
Root-Mean-Square	4,023	0,259	18,48	0,094	0,0906
Mean Standardized	0,00197	-5,913e-005	0,0030	-0,0045	0,0181
Root-Mean-Square Standardized	0,963	0,996	1,007	0,148	0,939

Anexo No. 6 Representación gráfica de los semivariogramas

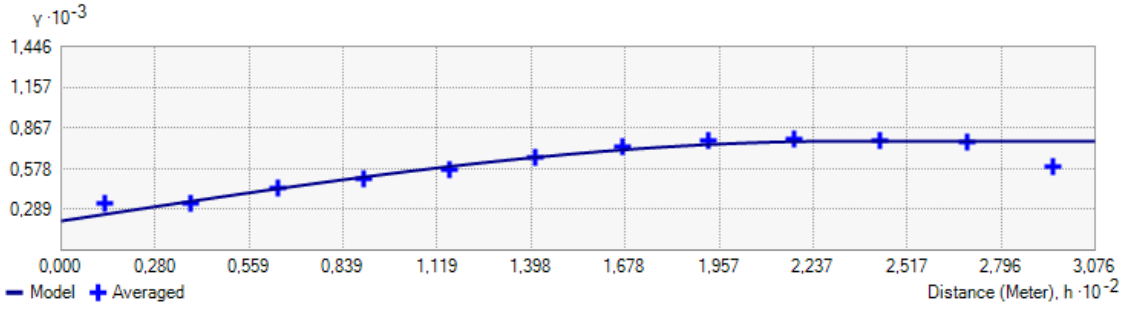
Profundidad del horizonte A



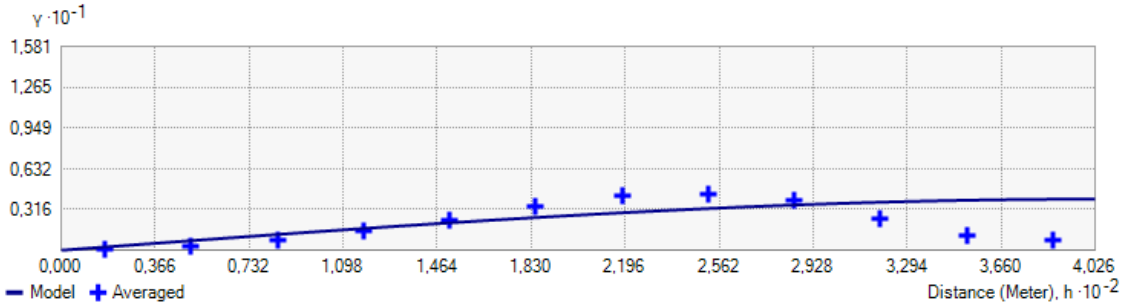
% Carbono orgánico



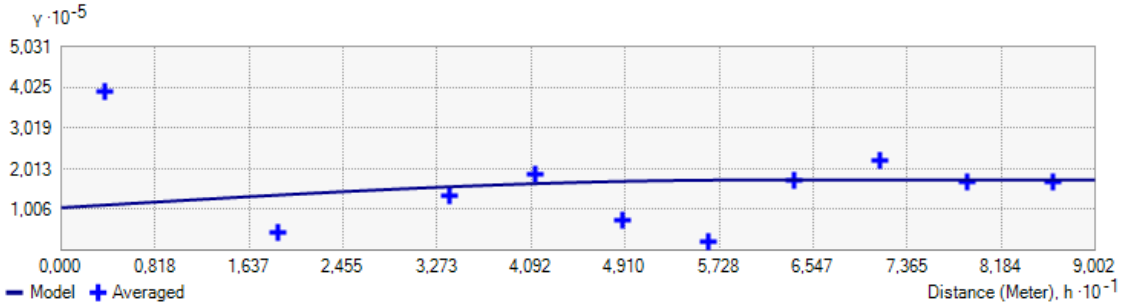
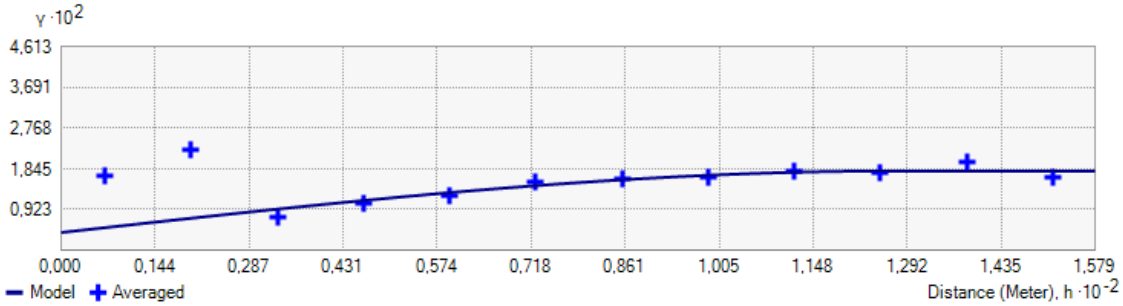
Capacidad de almacenaje de agua disponible



Elevación



Rendimiento



IVND