UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

FACTORES QUE AFECTAN LA VARIABILIDAD INTRA CHACRA DEL RENDIMIENTO EN MAÍZ

por

Bernardo Gusmán DEL CAMPO VEGA

TESIS, presentada como uno de los requisitos para obtener el título de ingeniero agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2007

Tesis aprobada por:

Director: ----------
Nombre Completo y Firma

Nombre Completo y Firma

Nombre Completo y Firma

Nombre Completo y Firma

Fecha ----------

Autor: ----------
Nombre Completo y Firma

AGRADECIMIENTOS

- Al Sr. Miguel Carbajal por haber permitido realizar el trabajo de tesis en su establecimiento

- Al director de la presente tesis el Phd Ing. Agr. Jorge Sawchik, por orientación y apoyo durante la elaboración del trabajo

- Marcelo Schusselin y Leonardo silva que me ayudaron en el trabajo de campo.

- A la estación experimental INIA “la Estanzuela”, por haber permitido usar los laboratorios e infraestructura necesaria para llevar a cabo el trabajo de tesis

- A las empresas: Geosys, (Dante Prato, Rocca) y a Aerofoto, (Antonio Ruik) por la colaboración de un GPS venture y una fotografía aérea, respectivamente.

- A familiares y amigos por el apoyo constante brindado en cada etapa del proceso

- Ing. Agr. PHd José Terra INIA treinta y tres, que hizo las corridas estadísticas y aportó muy buenas ideas para el trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

Página

PAGINA DE APROBACIÓN_____ II
AGRADECIMIENTOS_____ III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES_____ V

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No. Página

1. Variables medidas y coeficientes estadísticos.....30
2. Capacidad de almacenaje de agua, capacidad de campo, punto de marchitez permantente y densidad aparente para las distintas profundidades.....37
3. Medición de agua total (por gravimetría) en R5 para las distintas profundidades.....38
4. Variabilidad de Distintos Factores.....40
5. Eigenvalues de la matriz de correlación, Princomp procedure.....57
6. Eigenvalues de la matriz de correlación , Factor procedure.....59
7. Factores del FA y relación lineal de las variables con los 5 factores más importantes determinados por el análisis.....59

Figura No.

1 . Diseño de la Grilla de Muestreo de la chacra de maíz.....22
2. Grilla de los puntos de muestreo en la chacra de maíz superpuesta sobre Coneat.....22
3. Precipitaciones media del 1961-90 y zafra 2004-2005.....29
4. Contenido de carbono orgánico y CV para distintas profundidades.....34
5. Proporción de las distintas fracciones granulométricas para las celdas muestreadas en distintas profundidades de 0-60 cm.....35
6. Frecuencia de la distribución de los rendimientos promedio de maíz, de las celdas para los puntos A y B de la grilla en estudio.....39
7. Rendimiento y sus componentes; promedio, CV y correlación con rendimiento.....41
8. Población y rendimiento de maíz para los distintos puntos de muestreo.....42
9. Rendimiento de los Puntos A y B.....44
10. Mapa de rendimiento para los puntos A y B.....45

11. Población de maíz en las parcelas de estudio para cada punto A y B.....45
12. Relación entre largo de espiga y rendimiento de espiga.....47
13. Rendimiento de espiga y peso de mil granos.....47
14. Largo de espiga y peso de mil semillas.....47
15. Grilla de las parcelas y unidades de suelo en toda la chacra de maíz.....55

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura de secano en Uruguay se realiza en un marco de una alta variabilidad climática y de ambientes edáficos. Esto determina importantes variaciones de rendimiento entre años y a su vez una gran variación en la respuesta vegetal intra o entre chacras.

Ahunchain y Klassenn (1990), mencionan que: "Una gran característica de nuestras chacras es la gran heterogeneidad del potencial del suelo, causando variaciones de gran relevancia en el desarrollo del cultivo, en el cual se transforma en rendimiento promedio bajo. Esto es de fundamental importancia por que es típico del país y contrasta con las regiones agrícolas tradicionales donde la uniformidad de la chacra es notoria". Esta heterogeneidad de ambientes en situaciones comerciales de chacra está dada principalmente por tipo de suelos, manejos anteriores, topografía, combinación con otros rubros agropecuarios, entre otros.

Existen escasos antecedentes nacionales de trabajos que hayan buscado identificar y cuantificar las causas de esta variabilidad, debido a las dificultades de este tipo de estudio, a la falta de tecnología en el pasado y a los altos costos. Dos trabajos nacionales pioneros son el de Ahunchain y Klasseen (1990) que estudiaron las causas de

variabilidad en el rendimiento del cultivo de trigo, y el de Roel (2006), Agricultura de precisión, variabilidad de rendimiento en arroz.

Uno de los desafíos que enfrenta el sector agrícola en el mediano plazo es caracterizar de mejor forma los ambientes edáficos sobre los que se desarrolla la producción. Esto permitiría avanzar en el delineamiento de zonas de respuesta vegetal contrastantes dentro de chacras y permitiría el uso del conocimiento y de las tecnologías adecuadas para éstas. Así, es esperable que esta práctica genere ventajas desde el punto de vista físico, económico y ambiental (Van den Heuvel et al., 1996).

La Agricultura de Precisión puede definirse como, un grupo de tecnologías que permiten la aplicación de insumos agrícolas (fertilizantes, semillas, plaguicidas, etc.) en forma variable dentro de un potrero de acuerdo a los requerimientos y /o potencial productivo de varios sectores homogéneos, pre-definidos dentro del mismo (Ortega, 2000). Esto perimitiría lograr incrementos de rendimiento en aquellas zonas con mayor potencial de respuesta que el promedio del lote, bajar costos de producción al evitar excesos en zonas de baja respuesta, y por tanto mejorar el cuidado del medio ambiente.

En definitiva, el concepto de agricultura sitio-específica o agricultura de precisión implica el uso de información acerca de la variabilidad presente en las chacras de manera de delinear zonas y prácticas agronómicas adecuadas a las mismas (Roel y Terra, 2006). Tres criterios básicos deberían cumplirse para justificar el manejo sitio-específico: a) la existencia de importante variabilidad espacial en factores que influencian la

productividad de los cultivos; b) la identificación y cuantificación de las causas de la variabilidad de estos factores y c) el conocimiento científico-agronómico que permita utilizar la información recolectada para el logro de un beneficio productivo, económico o ambiental (Plant, citado por Roel y Terra, 2006).

En la actualidad existen diferentes tecnologías que pueden acelerar el proceso de generación de conocimiento y adopción del manejo sitio-específico. Dentro de éstas se destacan: la generación de mapas de rendimiento y otros atributos georeferenciados, los mapas detallados de suelo, el uso de las imágenes satelitales y fotografías aéreas, sensores para diferentes propiedades de suelos y cultivos en tiempo real, utilización de dosis variables de agroquímicos, fertilizantes y semillas, entre otras (García 2005, Roel y Terra 2006).

En Montana USA, Larson (1986) comparó el rendimiento de los cultivos entre tipos de suelo y concluyó que haber manejado la variabilidad espacial incrementó los ingresos netos (Colvin et al., 1997).

1.1 OBJETIVO DE LA TESIS

El objetivo de este trabajo fue el de determinar los principales factores que explican la variabilidad de rendimiento de un cultivo de Maíz (*Zea Mays* L.) en una chacra comercial con el manejo agronómico recomendado para el cultivo en Uruguay.

Este cultivo es muy adecuado para este tipo de trabajos debido a su alta sensibilidad a los períodos de stress hídricos (Shaw et al., 1988) y ha sido utilizado frecuentemente como sensor de la variabilidad en las propiedades del suelo (Sadler et al., 2000).

En las condiciones de Uruguay, con suelos de capacidad de almacenaje de agua relativamente baja, debido a la escasa profundidad efectiva del perfil, es probable que la variación de ambientes edáficos asociados a la dinámica del agua dentro de una misma chacra sea uno de los principales factores que explican las variaciones en el rendimiento del cultivo. Esta variación en ambientes edáficos interacciona con las prácticas de manejo del cultivo y puede determinar respuestas vegetales diferenciales dentro de chacras. Es esperable que parte de esa variación en rendimiento pueda ser minimizada adecuando las prácticas de manejo a las condiciones edáficas intra-chacra.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La introducción de la agricultura de precisión y prácticas relacionadas en chacras comerciales, implican la recolección de gran cantidad de información, en forma georeferenciada. Así, propiedades físicas y químicas de los suelos, datos climáticos e incidencia de enfermedades, plagas, malezas y rendimiento del cultivo son las variables más comúnmente registradas en los sistemas que utilizan estas tecnologías (Mallarino et al., 1999).

Sin embargo, la recolección de datos es solamente el inicio de un programa de manejo sitio-específico ya que los agricultores solo podrán ser capaces de manejar esta variabilidad comprendiendo las causas de variación espacial y temporal de los rendimientos en sus chacras (Kaspar et al., 2003). Esto es un requisito necesario para el uso exitoso de las diferentes herramientas de la agricultura de precisión (Kravchenko et al., 2003).

En el trabajo de Ahunchain y Klasseen (1990), estudiaron las causas de variabilidad en el rendimiento de trigo, concluyeron: que si los factores climáticos y los de manejo no fueron limitantes y además pretendieron disminuir las diferencias existentes a nivel de chacra (caso de la fertilización diferencial), deben ser factores de suelo los responsables de la variabilidad de rendimientos. Estos autores sugieren que resultaría

prioritario orientar la investigación para identificar que factores del suelo son los causantes de la variación de los rendimientos.

Por otra parte, los factores que explican la variabilidad de rendimientos intra-chacra no necesariamente son iguales para cada situación o explican solamente parte de la variación en los rendimientos (Mallarino et al., 1999). Estos autores trabajando en 8 chacras comerciales de Maíz encontraron que las variables que se correlacionaban significativamente con rendimiento en algunas chacras no lo hacían en otras. En muchos casos además, algunas variables relacionadas con la fertilidad del suelo, como el valor de análisis de suelo, no se correlacionaban con el rendimiento final.

Aunque estos estudios incrementaron los conocimientos de las variaciones de rendimiento a lo largo de la chacra, la relación obtenida entre el rendimiento en grano, el terreno y las propiedades de suelo explican sólo parte de la variación en rendimiento (Kaspar et al., 2003).

Dentro de los factores que pueden contribuir a la variabilidad del rendimiento intra-chacra se incluyen topografía, hidrología, fertilidad residual, (Schweitzer, 1980), microclima, y calidad del suelo (Ambuel, 1995).

Algunas variables como la topografía, atributos del terreno y su impacto en la redistribución del agua, y algunas propiedades del suelo han sido descriptas como ejemplos de factores relativamente estables y permanentes que afectan el rendimiento de

los cultivos (Kravchenko y Bullock, 2000). Por su lado, la incidencia de malezas, enfermedades e insectos son ejemplos de variables que no necesariamente afectan los rendimientos de los cultivos en forma estable en el tiempo (Kaspar et al., 2003).

Sin embargo, antes que un modelo pueda ser ajustado para tomar decisiones en agricultura de precisión, hay una necesidad básica de entender la variabilidad de rendimiento causado por factores dominantes que determinan variación entre lugares (Colvin et al., 1997).

2.1. PROPIEDADES QUÍMICAS Y FÍSICAS DEL SUELO

Las propiedades químicas y físicas del suelo, solas o en combinación con otras variables pueden explicar parte de la variabilidad en el rendimiento observado dentro de chacras.

En este sentido, Aunchain y Klassen (1990) encontraron un menor contenido de ciertos nutrientes en la zona baja con respecto a las otras posiciones topográficas en una chacra comercial de trigo. Esto, junto a un menor peso radicular por unidad de suelo, habría determinado el menor desarrollo y rendimiento de trigo observado en esta zona.

Dentro de las propiedades de suelo responsables de la variación de rendimiento se han citado: agua disponible, textura, densidad aparente, contenido de arcilla (Stone et al. 1985, Millar et al. 1988, Wright et al. 1990) contenido de carbono (Ciha 1984, Stone et al. 1985, Wright et al. 1990) pH (Kreznor et al. 1989, Moore et al. 1993), acidez del subsuelo (Wright et al., 1990), fertilidad y espesor de suelo (Kreznor et al., 1989).

Algunas propiedades del suelo como pH, bases totales, porcentaje de saturación en bases, y concentración de Mg tuvieron una correlación con rendimiento tanto de maíz como soja, pero en pocos años (Jiang et al., 2004).

Cox et al. (2003) encontraron que la arcilla es uno de los factores de suelo que mas afectan la variabilidad de rendimiento. El contenido de arcilla podía ser usado como uno de los factores para utilizar en el manejo sitio específico y muchas características de suelo como carbono orgánico del suelo, N total, etc. estaban positivamente relacionados con el contenido de arcilla.

Shahandeh et al. (2005) estableció que la estructura de la variación para el rendimiento de maíz con el N total y potencial de mineralización en 2003, tenía una dependencia espacial moderada y fuerte respectivamente. Sin embargo la dependencia espacial del rendimiento con N-NO3 era débil y aleatoria según los años. Otros autores también mostraron que esta dependencia espacial es también temporal (Bruckler et al. citados por Shahandeh et al., 2005).

El análisis de suelo sigue siendo la herramienta más utilizada para determinar los requerimientos nutricionales de los cultivos. Sin embargo, muchos trabajos muestran que los valores de análisis de suelo para los principales nutrientes varían considerablemente a diferentes escalas, dentro de chacras (Cambardella et al. 1994, Mallarino 1996). A pesar de que en algunos trabajos han encontrado relación entre la fertilidad del suelo y el rendimiento de los cultivos, uno de los desafíos sigue siendo como determinar con cierta certeza la variabilidad de la fertilidad de un suelo a escala comercial. Los patrones de variación de nutrientes como fósforo (P) y potasio (K) pueden estar relacionados con el tipo de suelo, pero en muchos casos están más afectados por prácticas de manejo, como la propia fertilización, la historia de la chacra, o la remoción diferencial de nutrientes dentro de las chacras (Cambardella y Karlen 1999, Franzen y Peck 2005, Mallarino 2006). Debido a esto, se han propuesto diferentes sistemas de muestreo para interporlar con cierto grado de certeza el nivel de estos nutrientes en el suelo. Los esquemas de muestreo propuestos son diversos y van desde el clásico muestreo en celdas o grillas (Franzen y Peck, 1995), los muestreos dirigidos o en zonas delineadas según diferentes criterios (Franzen et al., 2002), entre ellos la propia variabilidad del rendimiento. La investigación en ese sentido ha tratado de avanzar hacia sistemas que reduzcan los costos del muestreo y análisis y a la vez representen aceptablemente la variabilidad de los nutrientes en la chacra. Así, por ejemplo con el objetivo de avanzar en el manejo sitio-específico de algunos nutrientes, Oberle y Keeney (1990), Sadler et al. (1998) sugieren usar la información del mapeo de suelos para la evaluación en el manejo del N. Machado et al.

(2000) sugirieron que la fertilización a dosis variable de N debe ser basado en la textura y el contenido de N-NO3. En este sentido, Eghball et al. (2003) demostraron que la variabilidad espacial del rendimiento de maíz, era mucho menor que la variabilidad de N-NO3, indicando una posible ineficiencia utilizando este indicador como único criterio para la fertilización variable con N. Otro estudio demostró la importancia de la textura del suelo en modificar la recomendación de la fertilización con N (Shahandeh et al., 2005). Schmidt et al. (2002) argumentaron que la recomendación de N variable basada sólo en la materia orgánica del suelo era muy simplista, y no refleja la variabilidad de N disponible dentro del campo. Similarmente, Mahmoudjafari et al. (1997) indicaron que el uso del potencial de mineralización de la materia orgánica para ajustar la recomendación de N del suelo era difícil de utilizar, porque la concreción de este potencial está determinada fuertemente por factores como la temperatura y la humedad.

Parece claro de que el rendimiento y su variabilidad intra-chacra es el resultado de la interacción de varios factores que incluyen a las propiedades químicas y físicas del suelo. Así, en ciertos años, 60 % o más de la variación en rendimiento de maíz pudo ser explicada por la combinación de propiedades de suelo y topografía (Jiang et al. 1998, Kravchenko y Bullock 2000, Terra et al. 2006). En ese sentido, para diferentes chacras en Illinois, las propiedades de suelo explicaron el 30% de la variación de rendimiento (entre 5 y 71% para las diferentes chacras (Bullock et al., 2000). Entre el 28 y 85 % de la variabilidad del rendimiento en maíz y soja fueron atribuidos a las variables de suelo y topografía (Jiang et al., 2004). Otro ejemplo es un trabajo en rotación de algodón y maíz

en que las propiedades de suelo y terreno explicaban entre 16 al 66 % de la variación de rendimiento en algodón y entre el 15 y 71% en el maíz dependiendo del manejo y el año (Terra et al., 2006). Por su parte, el efecto combinado de las propiedades de suelo y la topografía explicaron aproximadamente entre el 30 y el 85 % de la variación de rendimiento en una rotación maíz – soja en 7 de los 9 sitios (Kravchenko y Bullock, 2000).

2.2. PROPIEDADES HÍDRICAS

La disponibilidad de agua en el suelo está directamente relacionada con la productividad de los cultivos y es un factor muy importante en la variabilidad de los rendimientos intra-chacra. El rendimiento de maíz en particular, está altamente relacionado al agua disponible y más aún durante estaciones de crecimiento con déficit hídrico. Muchos trabajos han encontrado por tanto una alta correlación entre la variabilidad del rendimiento y propiedades del suelo y atributos del terreno que afectan directamente la capacidad de retención de agua, el drenaje y la distribución del agua en la chacra (Terra et al., 2006). Las precipitaciones durante el período de crecimiento muchas veces interactúan con los atributos del terreno y las propiedades del suelo influenciando el agua disponible para el cultivo y finalmente los rendimientos de grano (Timlin et al. 1998, Jaynes et al. 2002, Kaspar et al. 2003). En años con precipitaciones por debajo del promedio, las áreas más altas de las lomas con mayor pendiente y curvatura convexa usualmente tienen menor agua disponible y menor rendimiento que las áreas más bajas,

con menor pendiente y curvatura cóncava (Ciha 1984, Halvorson y Doll 1991, Afyuni et al. 1993, Timlin et al. 1998, Jaynes et al. 2002). Contrariamente, en los años con precipitaciones por encima de los promedios, las áreas con menor grado de pendiente y cercanas a las depresiones pueden ver sus rendimientos reducidos (Jaynes et al., 2002).

Algunos factores que se relacionan con la capacidad de retención de agua de los suelos como el contenido de limo, arcilla, y los tenores de C orgánico tienen una fuerte relación con el rendimiento y esto es más marcado en lugares que han sufrido procesos erosivos severos, que ha removido la capa superficial de suelo (Kaspar et al., 2003). La combinación de la información de las propiedades de suelo y topografía previo a la estación de crecimiento y las estimaciones del agua disponible del suelo podría significativamente mejorar la precisión de la predicción de la variabilidad espacial de rendimiento (Kravchenko y Bullock, 2000).

En cuanto al escurrimiento superficial o subsuperficial, las áreas de chacra con curvatura convexa tienden a recibir menos agua de posiciones más elevadas. En bajos cóncavos, donde se recibe agua de los lugares más altos también tienen un horizonte superficial mayor (Kaspar et al., 2003).

2.3. POSICIÓN TOPOGRÁFICA

La topografía está estrechamente relacionada con el crecimiento del cultivo y en última instancia con el rendimiento del cultivo. La magnitud de su efecto depende, entre otros factores, de los tipos de suelo asociados, de la variación propia de la topografía en la chacra, pero también del régimen pluviométrico (Kravchenko et al., 2003). En primer lugar, tiene una influencia sobre la redistribución (erosión y deposición) de las partículas de suelo, materia orgánica y nutrientes del suelo, con cambios físicos-químicos en la cima y el bajo (Ovalles y Collins 1986, Pennock y de Jang 1990). En segundo lugar afecta la disponibilidad de agua debido a la redistribución vertical y horizontal (Verity y Anderson, 1990). La redistribución del agua debido a la topografía puede ser marcadamente significativa (Hianna et al., citados por Bullock et al., 2000).

Investigaciones previas que estudiaron varios atributos del terreno como la elevación, pendiente, dirección de la pendiente, y curvatura de la superficie (Ciha 1984, Daniels et al. 1985, Stone et al. 1985, Simmons et al. 1989, Yang et al. 1998, Kravchencko y Bullock 2000) encontraron impactos directos en el crecimiento del cultivo, y en el rendimiento por el efecto directo de estas variables sobre la redistribución del agua, materia orgánica, saturación en bases, temperatura del suelo, entre otras (Franzmeier et al., Bennett et al., Stone et al., citados por Jiang et al., 2004).

La pendiente, electroconductividad, carbono orgánico del suelo y arcilla estaban correlacionado con rendimiento de algodón y maíz para todos los casos analizados (Terra et al., 2006).

Por esta razón, las propiedades de suelo y los atributos del terreno están frecuentemente correlacionados entre sí por el proceso de desarrollo de los suelos, la erosión, y la sedimentación (Gerrard, Pennock y Jong, Moore et al., citados por Kaspar et al., 2003). En el trabajo de Terra et al. (2004) se encontró que la pendiente, elevación y índice compuesto topográfico (CTI) entre otras ayudaban a explicar el 50% de la variabilidad del Carbono del suelo.

En el trabajo de Moore et al. (1991), la pendiente y CTI o índice de mojado, fueron los atributos de terreno que se relacionan con las propiedades de suelo. Estos atribuyen casi la mitad de la variabilidad para el espesor del horizontes A, materia orgánica, pH, P extractable, limo y contenido de arena.

Moore et al. (1991), citaban que 3 índices compuestos basados en características hidrológicas, tienen el potencial de predecir la distribución espacial de ciertas propiedades de suelo. Estos índices eran CTI (o índice de mojado), índice del poder del agua (Stream power index) y el índice de la capacidad de transporte de sedimentos. El índice CTI ha sido usado en la caracterización espacial de distintas zonas de acumulación de agua, y contenido de agua de distintas partes. El índice del poder del agua (Stream

power index), es un índice que mide la energía o el poder erosivo del agua en una superficie. La capacidad de transporte de sedimentos caracteriza la erosión y la deposición de sedimentos en la topografía y da una idea de la pérdida de suelo, Moore et al. (1991). Este índice es análogo al factor Lenght/slope o largo/ gradiente de pendiente (que se usó en esta tesis) aunque hace referencia al relieve en las tres dimensiones (Moore y Wilson, 1992).

Eq1: $$w = \ln\left(\frac{A_s}{\tan\beta}\right),$$ Eq2: $$\tau = \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^m \left(\frac{\sin\beta}{0.0896}\right)^n$$ Eq3: $$\Omega = A_s \tan\beta$$

W= wetness index, Ω= stream power y τ= capacidad de transporte de sedimentos

A_s es el área de captación m^2m^{-1}), ß es la pendiente en grados, m= 0,6 y n =1,3

Se asume que en las ecuaciones A_s es directamente proporcional a q, (Moore et al.,1991)

Los rendimientos de maíz son más bajos en áreas del campo con lomas convexas, alta elevación y horizonte superficial menos profundo. Contrariamente se observaron rendimientos más altos en posiciones cóncavas más bajas, con baja elevación y suelos con horizonte superficial más profundos (Kaspar et al., 2003). En este sentido, Kravchenko y Bullock (2000) encontraron que la elevación era el factor topográfico de mayor importancia y presentaba una correlación consistentemente negativa con el rendimiento de Maíz. En la mayoría de los casos la influencia de la elevación en el rendimiento se refleja en el agua disponible, y los efectos se manifiestan más en climas con condiciones extremas (Kravchenko y Bullock, citados por Jiang et al., 2004).

El análisis multifractal reveló que durante cuatro temporadas de crecimiento, con condiciones climáticas moderadas y secas, los mayores rendimientos se observaron en el bajo mientras que un rango amplio de valores se observaron en sitios con pendiente moderada y alta, (Changere y Conkey, citados por Kravchenko et al., 2000)

Ahunchain y Klasseen (1990) en una chacra de trigo en Uruguay delinearon dos zonas de rendimientos significativamente contrastantes. Por un lado el bajo, que comprende los menores rendimientos con un promedio aproximado de 3900 kg/ha y la mayor variabilidad de los mismos (CV = 20,4%). Por otro lado, la ladera y el alto con rendimientos medios aproximados de 4900 y 4700 kg /ha respectivamente y menor variación (CV= 14,02% y CV =14,08 % respectivamente). Para maíz, en Estados Unidos, Stone (1985), Simmons (1989) reportaron rendimientos más altos en las zonas bajas.

2.4. UNIDADES DE SUELO

La asociación que puede existir entre las Unidades Cartográficas de Suelo y el rendimiento también es un tema que se ha tratado en diversos trabajos científicos, aunque con resultados diversos. Por un lado existe la limitante de que no existen muchos relevamientos detallados de suelo a una escala óptima de trabajo, lo cual es además muy costoso. Por otro lado la definición de los límites entre Unidades de Suelo son difusos e inexactos pero dentro de la misma Unidad de Suelo las propiedades físicas o químicas pueden no ser homogéneas (Moore et al., 1993).

En un trabajo desarrollado en Montana USA, se encontró que la variabilidad de rendimiento estaba afectada por las Unidades de Suelo, y por la variación en relieve, dirección de la pendiente y por la forma de la superficie (Larson, citado por Colvin et al., 1997). Resultados similares fueron reportados por Stafford et al. (1996).

Sin embargo, otros trabajos sugieren que el análisis de las Unidades de Suelo no es efectivo para describir adecuadamente la variabilidad espacial acorde a las herramientas de agricultura de precisión (Colvin et al., 1997).

Para la delineación de zonas homogéneas de manejo para la agricultura de precisión se debería tener en cuenta no solamente un mapa detallado de suelo sino también datos adicionales como los mapas de rendimiento (Sadler et al., 2000). Estos autores sugieren que debido a la escala, los mapas de suelos son más adecuados para explicar diferencias de rendimiento entre chacras que dentro de chacras.

Sadler et al. (2000), estudió cuatro tipos de suelo en una chacra de maíz, determinando que en tres de ellos el rendimiento era significativamente distinto debido al tipo de suelo. La variación de rendimiento constituida por los tipos de suelo explicaba alrededor del 40 % de la variación total.

2.5. ANÁLISIS ESTADISTICO

Además del conocimiento de la media y la desviación de una población de maíz, en agricultura de precisión es crítico el conocimiento de la estructura y la correlación espacial de la población muestreada. La geoestadística es una rama de la estadística aplicada que cuantifica la dependencia y estructura espacial de una variable dada y usa esa información para predecir valores de la variable en sitios no muestreados. Estos dos pasos incluyen típicamente lo que se conoce en geoestadística como modelación espacial e interpolación espacial (Roel y Terra, 2006)

Un número importante de métodos estadísticos han sido utilizados para estudiar las relaciones entre el rendimiento y las propiedades del suelo, topografía y otras variables. Esto incluye el uso de regresiones múltiples y técnicas de estadística multivariada (Kravchenko et al., 2003). La principal debilidad de estos métodos es que ignoran la ubicación en el espacio de los datos y la estructura espacial de los mismos. Aunque debido al alcance de esta tesis, la geoestadística no ha sido utilizada como herramienta estadística en este trabajo, la inclusión de esta técnica puede ser de utilidad en la cuantificación de patrones de rendimiento.

Un análisis de regresión simple demuestra que algunas variables están correlacionadas a menudo entre sí mismos y con el rendimiento (Mallarino et al., 1999). Sin embargo en un análisis de regresión múltiple, el uso de variables altamente correlacionadas puede conducir a errores de la interpretación. Cuando uno o más variables se relacionan casi linealmente con las otras, se dice que existe colinealidad

(Neter et al., 1996) y en estas situaciones, la regresión en todas las variables puede proporcionar buenas predicciones, pero los coeficientes estimados de la regresión pueden tener un error estándar grande y pueden no reflejar exactamente la influencia real de algunas variables en la respuesta media.

Dentro de las técnicas de estadística multivariada, el análisis de componentes principales y el análisis de factores puede ser útil para identificar las variables que explican la mayor parte de la variabilidad en las chacras y para reducir las dimensión de la información en un menor número de variables no correlacionadas entre sí (Fraisese et al., Terra et al., citados por Roel y Terra, 2006).

Las técnicas estadísticas multivariadas proporcionan un marco racional a las variables correlacionadas y manejo de la colinealidad. También, porque varias variables se incluyen simultáneamente, se pueden hacer interpretaciones más útiles comparado con las técnicas univariadas (Brejda, 1998). Dos clásicas técnicas multivariadas se utilizan comúnmente en este sentido: análisis de componentes principales (ACP) y el análisis de factores (AF), que aunque estan relacionadas, tienen objetivos diferentes.

El objetivo de ACP es reducir el número de variables originales en menos componentes que explican la mayor variación posible (Sharma, 1996). En este análisis se genera un menor número de variables (componentes principales) que son combinaciones lineales de las variables originales medidas y que contienen toda la información de las variables originales. Son las combinaciones lineales de las variables originales del sitio y

presentan algunas características importantes. Los componentes principales son construidos en base a matrices de covarianzas o de correlacion, teniendo estas últimas la ventaja de que independizan de las unidades de las variables originales y estandarizan los componentes. En la matriz de correlación la variación de cada variable es igual a uno y si un componente principal no puede justificar más variación que una sola variable por sí mismo, entonces probablemente no es relevante (Johnson, 1998). Las variables del ACP tiene la particularidad de que no están correlacionadas. El primer componente principal que resulta del análisis capta la mayor variación en los datos posible, y en cada componente posterior se va captando parte de la variabilidad restante (Johnson, 1998).

Por otra parte el objetivo del AF, es identificar el/los factor/es que pueden explicar la intercorrelación entre las variables (Sharma, 1996). Mientras que ACP agrupa variables acentuando la variación explicada por la nueva combinación lineal de variables, el AF agrupa variables altamente correlacionadas acentuando la estructura de la covariación. Ambas técnicas pueden revelar relaciones entre las variables que no fueron apreciadas inicialmente y de tal modo permitir las interpretaciones que no se percibirían ordinariamente (Johnson y Wichern, 2002). Las nuevas variables derivadas de ACP o el AF se puede utilizar como variables independientes en análisis de regresión múltiple, así los problemas de la interpretación de los análisis al usar variables correlacionadas serían reducidos (Neter et al., citados por Sawchik, 2003). La regresión múltiple del rendimiento de las nuevas variables derivadas de análisis de factores (AF) o del análisis de los

componentes principales (ACP), demuestran la importancia de las variables agrupadas en explicar la variabilidad de la producción.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1. LOCALIZACIÓN

El estudio se realizó sobre una chacra de maíz del Establecimiento "La Manera", ubicado en el paraje El Tala, Departamento de Soriano. Dentro de esta chacra de 45 ha se seleccionó un área de 11 ha con cierto grado de heterogeneidad, que comprendía una zona de ladera alta casi plana, ladera media y ladera baja, éstas últimas de mayor pendiente. La chacra está bajo un esquema de rotación agrícola en siembra directa (durante más de 13 años) siendo los cultivos antecesores trigo y soja de segunda.

La situación seleccionada se encuentra dentro del padrón 534 del departamento de Soriano sobre las Unidades de Suelo 10.1 y 10.15 del mapa CONEAT. Los suelos corresponden a Brunosoles Eútricos Típico y Vertisoles Rúpticos Lúvicos pertenecientes a las Unidades de Suelo 1:1.000.000 Risso y Bequeló. El material generador de estos suelos sería para la unidad 10.1 sedimentos cuaternarios y para la unidad 10.15 sedimentos influidos por el cretácico. El centro del área experimental tiene como coordenadas latitud: S 33º 16' 28.8'' y longitud: W 57º 24' 08.8''.

3.2. MANEJO AGRONÓMICO

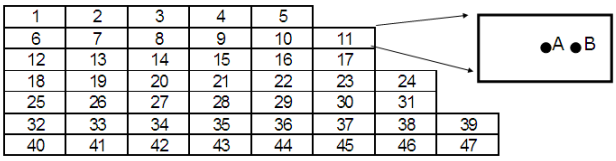
El cultivo de maíz fue sembrado el 19 de setiembre del 2004 con máquina de siembra directa neumática, con una distancia de 0.50 m entre surcos. Se utilizó el cultivar AW 190 MG (híbrido simple). Previo a la siembra se aplicaron 130 kg ha^{-1} de fertilizante 7-40-40-0 + 5S. El control de malezas se realizó un día después de la siembra con una mezcla de glifosato (2 lts ha^{-1}), Atrazina al 50 % (5 kg ha^{-1}) y Acetoclor 69% a 2 lts ha^{-1}.

El cultivo se refertilizó el 2 de noviembre al estado de 6 hojas (V6) con una dosis de 170 lts ha^{-1} de UAN 30 (equivalente a 66kg/N), previo análisis de suelo. Posteriormente se controlaron las malezas y plagas evitando posibles fuentes de variación debido a factores bióticos.

3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

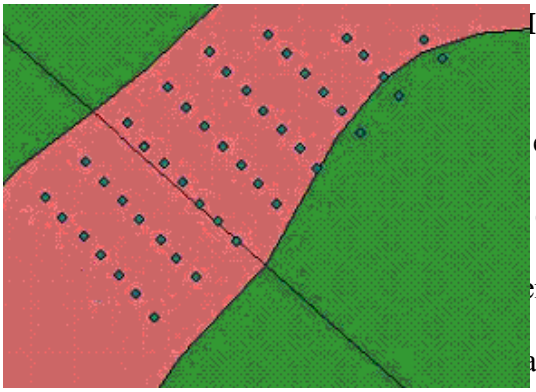
Dentro de la chacra y luego de la emergencia del cultivo se seleccionó un área de aproximadamente 11 ha con una moderada variación topográfica. Sobre esta área se delineó una grilla de muestreo sistemático con 47 celdas rectangulares. El tamaño de las celdas fue de 70 x 32 m lo que determinó un área de celda de 0.224 ha (4.5 celdas ha^{-1}). La disposición de las celdas en el campo se efectuó cruzando la pendiente dominante.

Figura 1 : Diseño de la Grilla de Muestreo de la chacra de maíz



Las celdas fueron delineadas utilizando una cinta métrica y escuadra óptica y el centro de cada celda fue marcado con una estaca, usada como referencia para las determinaciones posteriores. A su vez este punto fue también geo-referenciado utilizando dos GPS manual Garmin; Legend y Venture.

Figura 2: Grilla de los puntos de muestreo en la chacra de maíz superpuesta sobre el croquis Coneat



ISIS DE LABORATORIO

en el estado V4 (4 hojas) se tomó una muestra celda con un calador de tubo a una profundidad ntro de la celda. Cada muestra compuesta se as de suelo fueron llevadas al laboratorio y almacenadas para posteriores análisis. Sobre ellas se realizaron las siguientes determinaciones: pH (H_2O) con una relación suelo/agua 1:1, carbono orgánico (por el método de Tinsley), N-NO3 (CuSO4 y potenciometría), fósforo disponible por el método de Bray I, potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) por incubación anaeróbica (Bremner) y se realizó un análisis de textura por el método de Bouyoucous. Asimismo en este estadio se realizó un conteo de plantas. Para ello se tomaron 2 hileras midiendo 5 m hacia ambos lados desde el centro de cada celda y se contó el número de plantas en cada tramo**.**

El día 20 y 21 de enero aproximadamente R5, se determinó la altura de planta (hasta la punta de la inflorescencia masculina) en 6 plantas ubicadas en un radio de 3 m desde el centro de la celda para las 47 celdas. A su vez en esta misma área, y para cada celda se tomaron 2 muestras de suelo hasta los 60 cm (en intervalos de 20 cm) con el objetivo de evaluar el agua disponible en esa fecha y realizar una caracterización del perfil de suelo en el centro de cada celda. Para ello se utilizó un calador holandés y se determinó la humedad por el método gravimétrico. Para la toma de estas muestras se

eligieron sitios con plantas en competencia perfecta (en la hilera y entre hileras). Las muestras fueron luego transportadas al laboratorio y almacenadas para la determinación posterior de carbono orgánico y textura por los métodos ya descriptos.

Utilizando los datos analíticos de textura y carbono orgánico se estimó la densidad aparente mediante la ecuación descripta por Fernández (1979) para las distintas profundidades evaluadas (0-20; 20-40 y 40-60 cm).

Eq 4: 3,6725-0,0531 x (Corg x1,72)-0,021x(%Ar)-0,0228x(%Limo) -0,0221x (%AC) = DAP (g cm^3)

Con estos datos también se estimaron los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente para cada uno de los horizontes en cada punto de muestreo, según fórmulas empíricas desarrolladas por Silva et al. (1988)[1]. Una vez estimados estos parámetros se calculó la capacidad de almacenaje de agua como la diferencia entre los mismos para cada horizonte.

Eq 5: 21,977 -0,168%Ar +2,601(Corg1,72)+0,127%Ac =CC (para el horizonte A)

Eq 6: 18,448 -0,125Ar +1,932(Corg1,72) +0,295 Ac= CC (en el horizonte B)

Eq 7: -58,1313+0,3718(Corg1,72)+0,5682Ar+0,6414Limo+0,9755Ac= PMP (A, y B)

Siendo CAA (mm) = CC - PMP

El 27 de mayo se realizó el muestreo de cosecha en forma manual. Se cosecharon 10 m x 4 hileras, (5 m a cada lado del centro de la celda, denominados puntos A). En

[1] Silva, A. 1998. com personal (Adaptado Ecuaciones USDA, 2004). es y el número de SW, siguiendo el sentido de las hileras de maíz, y se realizó el mismo procedimiento obteniendo así los puntos B. Se perdieron 11 estaciones de muestreo, la hilera 1-5 en el bajo y otra (18-24) (Figura 1).

En el laboratorio, se realizó para cada sitio de muestreo (puntos A y B en cada celda) un conteo de espigas; número de espigas totales, y espigas no fértiles (menor a 5cm). Posteriormente, se midió el largo de 10 espigas por cada muestra obtenida. El total de espigas de cada muestreo se desgranaron en forma mecánica y se pesó cada muestra, obteniéndose el rendimiento de cada área de muestreo (puntos A y B). Finalmente se determinó el peso de mil semillas de cada muestra.

Se realizaron las mediciones de elevación en el centro de cada celda mediante la utilización de un teodolito, obteniendo un mapa de elevación, de las estaciones de muestreo. Posteriormente mediante la utilización de un software de SIG (Sistema de Información Geográfico Arc View 3,3) se derivaron a partir de los datos de elevación

algunos atributos del terreno. Estos fueron: pendiente, índice compuesto topográfico (CTI), largo/ grandiente de pendiente (Slope length) e índice del poder del agua (Stream power).

Además se realizó un relevamiento detallado de suelos (ver Anexo), seleccionando como lugar físico el centro de diferentes celdas, teniendo en cuenta como criterio de selección: a) celdas de rendimiento promedio bajo, medio y alto y b) posición topográfica. Para cada caso se realizó una descripción detallada de los perfiles de suelo en los sitios seleccionados.

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En primer lugar se realizó un análisis de las variables determinadas utilizando estadística descriptiva univariada (SAS Inst., 2000). A partir de los datos relevados (propiedades químicas, físicas, atributos de terreno, mediciones de agua, etc.) se determinó la media, el desvío estándar, mínimo, máximo, rango, coeficiente de variación, skewness y kurtosis. Se determinó el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre las variables para identificar relaciones significativas entre variables medidas. Con ello se elaboró un cuadro de correlación entre el rendimiento y el resto de las variables medidas para entender mejor la asociación entre éstas. También se realizó el estudio de las variables teniendo en cuenta la distribución espacial en toda la grilla.

Para el estudio de las relaciones entre las distintas variables medidas y el rendimiento y componentes de rendimiento de maíz se ajustaron modelos de regresión múltiple. Se utilizó el método stepwise con un criterio de probabilidad para la adición o la supresión de las variables del 10% (P= 0,1). Este procedimiento se realizó con las variables originales y también se utilizó con los factores extraídos del análisis de factores explicados a continuación.

Se utilizaron dos técnicas multivariadas, el análisis de los componentes principales (ACP) y el análisis de factores (AF), para expresar la variabilidad de los datos y reducir la dimensionalidad de los mismos de forma de extraer luego relaciones con el rendimiento y sus componentes.

El ACP se realizó computando los eigenvectors y eigenvalues de la matriz de correlación utilizando el procedimiento PRINCOMP de SAS (SAS Inst., 2000). Los eigenvectors representan la dirección de la máxima varianza, mientras que los eigenvalues especifican la magnitud de la varianza (Jonson y Wichrern, 2002). Los componentes principales (CP) son combinaciones lineales de las variables originales y presentan algunas características: los CP no están correlacionados, el primer CP cuantifica la mayor variabilidad posible de los datos y así los siguientes CP van captando parte de la variabilidad restante. En tal sentido se tomaron en cuenta solamente CP en donde la variación explicada del CP correspondía a valores de eigenvalues mayores a 1.

El análisis de factores (AF) fue realizado en la matriz de correlación en vez de la matriz de la varianza-covarianza para eliminar los efectos de las diferentes unidades de las variables medidas. Se determinaron grupos de variables correlacionadas utilizando el procedimiento FACTOR de SAS (SAS Inst., 2000). Los factores identificados fueron rotados con el método varimax para arribar a una estructura más simple utilizando un método de rotación ortogonal. Del AF solamente se retuvieron aquellos factores que presentaban eigenvalues mayores a 1, los que fueron conservados para el posterior análisis.

Las variables con valores más altas que +-0,5 dentro de cada factor se escogían para resaltar que ellos procuran representar el factor oculto o latente. Esta misma metodología fue utilizada por Mallarino et al. (1999).

Luego se volvieron a ajustar modelos de regresión múltiple utilizando por un lado los valores de los factores seleccionados y por otro los valores de los CP seleccionados.

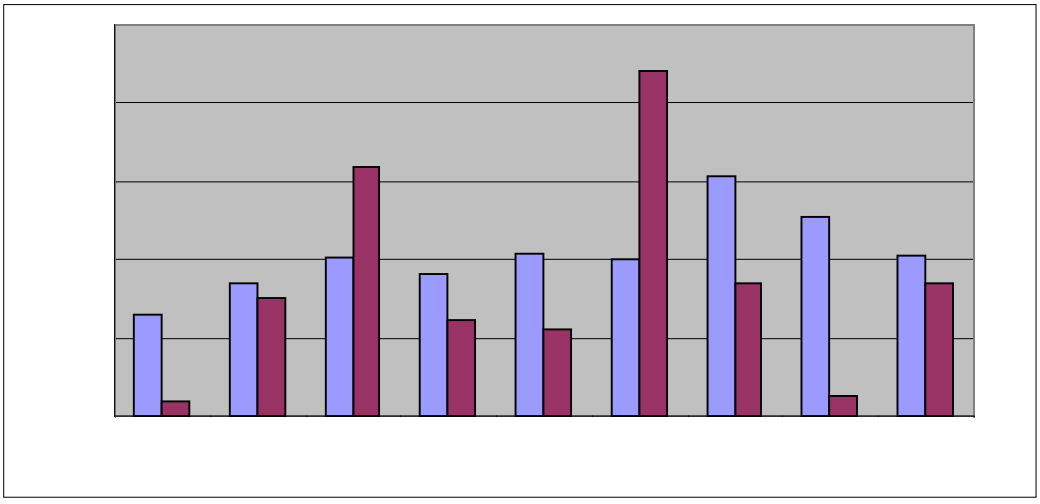
Posteriormente se realizó un análisis de clusters como forma de agrupar celdas con caracteristicas edaficas y topografías similares a los efectos de comparar el rendimiento y sus componentes entre grupo de celdas contrastantes. Para ello se utilizaron 8 de las variables estudiadas, potencial de mineralización, Corg 20, Agua disponible total, elevación, pendiente, índice del poder del agua, largo/gradiente de la pendiente e índice compuesto topográfico.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

Las precipitaciones mensuales desde agosto 2004 a marzo 2005 fueron en promedio 20 mm menores al promedio histórico para esta zona (figura 3). Previo a la siembra, en los meses de agosto y setiembre llovieron 85 mm y durante el ciclo del maíz las precipitaciones registradas fueron de 520 mm aproximadamente (en el período siembra - madurez fisiológica). Sin embargo, existieron eventos puntuales de muy alta intensidad y volumen: 170 mm el 31 de enero y 91 mm el 20 octubre, que probablemente determinaron una baja precipitación efectiva de estos eventos, incidiendo pobremente en la recarga de agua del perfil de suelo.

Figura 3: Precipitaciones media del 1961-90 y zafra 2004-2005



Nota:170 mm el 31/1/2005

Fuente: Dirección Nacional de Meteorología

En términos generales el año fue seco (mensualmente llovió 20 mm menos comparando con el promedio mensual de la serie histórica 61-90). No hubo registros de lluvias hasta 20 días después de la siembra, lo que afectó la implantación del cultivo. Por otro lado, ocurrieron lluvias importantes en octubre (estadios vegetativos tempranos) y un déficit hídrico pronunciado para los meses de noviembre, diciembre y enero (correspondiendo a las etapas de floración y llenado de grano).

4.2. ESTUDIO DE LAS VARIABLES MEDIDAS

En el Cuadro 1 se presentan los valores promedio y la variabilidad para las variables observadas.

Cuadro 1: Variables medidas y coeficientes estadísticos

Variable	Media	Des Est	Mínimo	Máximo	CV
pH	6,06	0,61	5,32	7,40	10,1
N-NO3 (ppm)	17,1	1,8	13,9	21,7	10,4
PMN	86,3	44,7	24,0	206,0	51,8
Fosforo Bray (ppm)	11,1	1,8	7,5	15,5	15,9
Carbono Org_20 (%)	3,34	0,35	2,60	3,94	10,6
Arena_20 (%)	30	3	26	39	10,6
Limo_20 (%)	27	2	22	33	9,2
Arcilla_20 (%)	43	2	38	47	5,1
Densidad Ap_20g/cm^3	1,17	0,03	1,12	1,24	2,7
C. Alamcenaje_20 (mm)	39,9	2,4	34,1	45,5	6,0
Carbono ORG_40(%)	2,28	0,47	0,99	3,11	20,5
Arena_40 (%)	28	3	20	34	12,1
Limo_40 (%)	25	3	18	31	11,8
Arcilla_40 (%)	48	3	41	53	5,9
Densidad Ap40 g/cm^3	1,27	0,04	1,19	1,38	3,3
C. Alamcenaje 40 (mm)	38,6	2,0	32,9	42,7	5,3
Carbono ORG_60 (%)	1,32	0,42	0,52	2,85	32,0

Arena_60(%)	26	3	20	31	10,1
Limo_60 (%)	24	3	18	31	12,3
Arcilla_60 (%)	50	3	41	55	5,8
Densidad Ap60 g/cm^3	1,35	0,04	1,21	1,43	2,9
C. Alamcenaje60 (mm)	22,1	4,3	15,4	36,7	19,4
C. Alamcenaje Tot (mm)	100,6	6,7	83,1	114,5	6,6
Arcilla B/A	1,2	0,1	1,0	1,3	6,9
Profunidad Bt x 20 (cm)*	2,5	0,5	2,0	3,0	20,1
Elevación (m)	7,3	2,8	0,0	11,0	38,6
Pendiente (%)	1,8	0,5	0,5	3,1	29,8
Poder del agua	0,6	0,8	0,0	3,0	136,6
Largo/gradiente de pend.	0,3	0,3	0,0	1,3	96,2
Indice compuesto topog.	5,9	1,8	2,9	11,1	30,0
Agua medida 20(%)	18,9	1,7	14,4	22,0	8,9
Agua medida 40(%)	20,8	1,9	15,9	24,6	9,0
Agua medida 60 (%)	20,6	2,2	15,3	24,1	10,6
Agua medidaTOT (%)	20,1	1,5	15,6	23,1	7,2
Altura de planta (m)	2,07	0,10	1,85	2,25	4,7
Plantas/m²	5,9	0,9	3,9	7,2	15,2
EspigasFer/Plantas	0,96	0,11	0,73	1,19	11,7
Espigas/m²	5,6	0,66	3,70	6,50	11,8
Granos/Espiga	471	45	305	533	9,6
Granos/m²	2616	341	1658	3178	13,0
Peso mil granos (g)	217	15	191	246	6,9
Rendimiento (kg/ha)	5659	824	3255	6996	14,6

[x]20, profundidad del Bt, 2,5x20= 50cm.,

Dentro de las *propiedades químicas* relevadas, el potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) presentó un rango de variación muy amplio (52%). Esto puede estar explicado, entre otras cosas, por la distribución poco uniforme de los residuos sobre la superficie. En el trabajo de Shahandeh et al. (2005), la media para el PMN fue de 20 mg $N\text{-}NH_4$ kg^{-1} y un CV de 27% aunque las muestras fueron obtenidas a 15 cm. Cambardella et al. (1994), reportó que el *potencial de mineralización de N* fue el que presentó mayor variación entre las propiedades químicas estudiadas con coeficientes de variación de 27 y 46% en dos años consecutivos. Este experimento presenta CV similares

a los valores de 24-36 % reportados por Goovaerts y Chiang (1993). La alta variabilidad observada para la variable PMN, no se reflejó en cambio en la medición de concentración de nitratos en el suelo ($N\text{-}NO_3^-$). Para algunas propiedades químicas, como el P disponible, y la concentración de nitratos en el suelo, los valores de CV fueron medios a bajos. El rango observado para la variable $N\text{-}NO_3^-$ se ubicó dentro del rango de respuesta a N para maíz previamente reportado (Perdomo y Cardellino, 2006). Cabe señalar, que luego de este muestreo, el cultivo de maíz se refertilizó con (66 kg de N/ha) por lo que es probable que el N no haya sido limitante para la concreción de altos rendimientos. El CV para la variable $N\text{-}NO_3^-$ fue bajo (10%), similar a los reportados por Shahandeh et al. (2005), de 12 al 22% en un año y 11 al 16 % en otro. Por su parte, los valores promedio de P disponible fueron de 11 ppm (rango de 7,5-15,5 y CV=16). Se puede inferir que el área experimental presentaba valores de P disponible dentro del rango de respuesta para maíz (Perdomo y Cardellino, 2006).

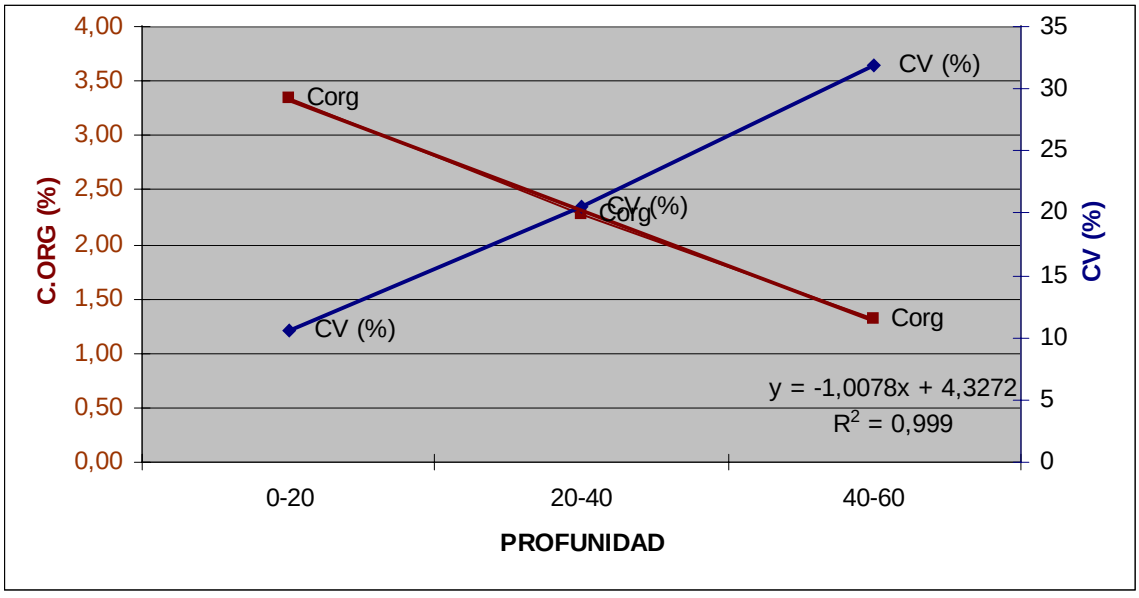
En términos generales se puede considerar que la chacra presentaba un aceptable nivel de fertilidad, con algunas celdas con ciertos valores por debajo de los niveles críticos utilizados para decidir la fertilización nitrogenada y fosfatada para el cultivo de maíz.

Los valores de Carbono orgánico en superficie presentaron para toda el área experimental valores altos y muy altos (Cuadro 1) en comparación con la bibliografía de base, lo que denota un adecuado nivel de fertilidad. Esto está estrechamente relacionado con dos factores: por un lado, el área experimental se encuentra en un sistema bajo

siembra directa desde hace 13 años, con una rotación diversificada de cultivos que partió de un suelo virgen. Por otro lado, los suelos dominantes del área seleccionada son Vertisoles y Brunosoles de alta fertilidad natural. Esta variable presentó baja variabilidad dentro del área seleccionada. Como está muy estrechamente relacionada al tipo de suelo, y manejo anterior, otros autores han encontrado CV más altos. Así, Mc Bratney y Pringle (1999) encontraron CV bastante más altos en un rango entre 21-41 % y categorizaron esta variable como de moderada o alta variación. Las variaciones en el contenido de Corg pueden deberse entre otros factores, a procesos de formación de suelo, a la utilización de abonos de origen animal (el manejo y la distribución generan problemas de uniformidad), y a procesos erosivos y de deposición de sedimentos. Para este trabajo, los valores de Corg son altos y en general mayores que los reportados en otros trabajos científicos. Así por ejemplo Shahandeh et al. (2005), reportan valores promedio de 0,9 y 1 % en suelos livianos para la profundidad de 0-15 cm. Otros autores, para suelos del área del cinturón maicero americano reportan valores muy inferiores a los encontrados en este trabajo (Kravchenko et al. 2000, Kaspar et al. 2003).

Los valores promedio de Corg en profundidad van decreciendo casi linealmente (Figura 4). Mientras que para la profundidad 0 – 20 cm el valor promedio era 3.3 %, a la profundidad 40 – 60 era 1.32 %. Por su parte, la variabilidad en el contenido de Corg aumenta en profundidad de 10.6 a 32 % para los intervalos 0-20 y 40-60 respectivamente.

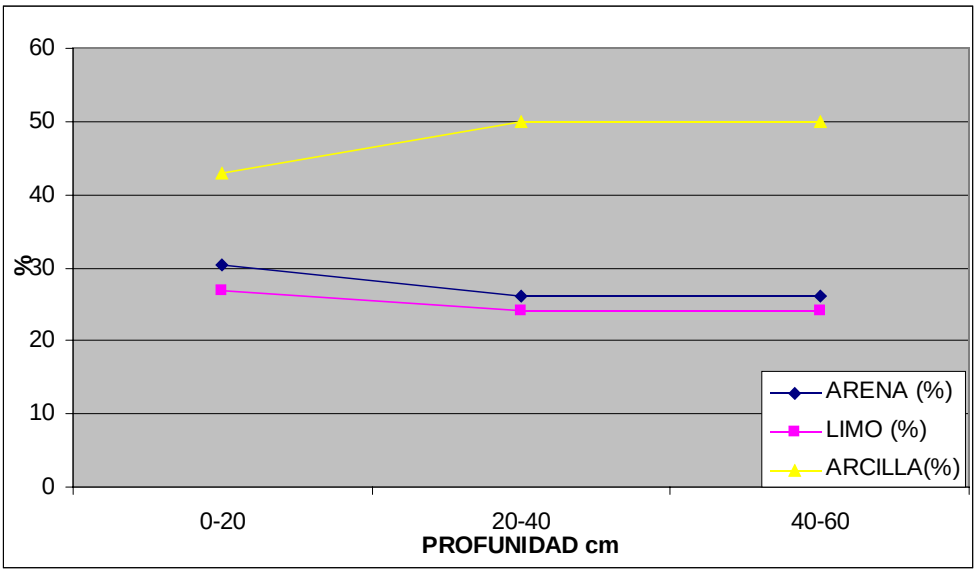
Figura 4: Contenido de carbono orgánico y CV para distintas profundidades



El pH presentó un valor medio de 6.1 (rango 5.3 – 7.4) y considerados normales para este tipo de suelo. Si bien el CV no es demasiado alto el rango de valores encontrado puede considerarse relevante para nuestros suelos. Los valores más bajos de pH corresponden a suelos de reacción ligeramente ácida, mientras que los valores más altos estuvieron asociados a la presencia de carbonato de calcio. En general, las celdas de pH más alto se encontraban en la parte alta del área experimental, de escasa pendiente y dominada por Vertisoles Rúpticos de "doble perfil". En esta área el relevamiento detallado de Suelos reveló la presencia de las fases superficial y profunda típica de los Vertisoles, con una alta microvariación. En el caso de la fase superficial, la presencia de calcáreo es muy fuerte cerca de la superficie lo que determina valores de pH más altos.

El análisis mecánico reveló que las fracciones granulométricas presentaron CV relativamente bajos (10.6, 9.2, y 5.1 % para arena, limo y arcilla respectivamente), siendo la arcilla la fracción dominante en toda el área experimental. En un trabajo similar los resultados presentados por Mc Bratney y Pringue, citados por Roel y Terra (2006) varían en distinta magnitud, presentando la arcilla una variación mucho mayor que la encontrada en este trabajo. En la figura 5 se presenta la distribución de las diferentes fracciones granulométrica (arcilla, limo y arena) en profundidad.

Figura 5: Proporción de las distintas fracciones granulométricas para las celdas muestreadas en distintas profundidades de 0-60 cm.



En términos generales la arcilla representaba cerca de la mitad de las fracciones granulométricas, mientras que el limo y la arena por separado componían algo más de la cuarta parte de las fracciones determinadas. El limo y la arena presentaban a su vez una mayor variación entre estaciones de muestreo que la arcilla. Las variaciones observadas se corresponden en general de manera adecuada con el relevamiento detallado de suelos. En la parte alta y plana, dominada por Vertisoles, los contenidos de arcilla, eran altos y homogéneos en todo el perfil (ver anexo). Por su parte, en las posiciones de ladera media y baja los suelos dominantes eran Brunosoles Eútricos de fase vértica, caracterizados por una mayor diferenciación textural, y contenidos más altos de limo y arena. El patrón de comportamiento de estos constituyentes edáficos muestra la incidencia de los materiales generadores con posiblemente mayor relevancia de sedimentos limo-arcillosos y arcillosos del Cuaternario.

En cuanto al *capacidad de almacenaje de agua (CAA) del suelo*, en promedio estos suelos son capaces de almacenar en el entorno de los 100 mm (para la profundidad de 0-60cm), con una variación relativamente baja (CV= 6,6%). Es necesario aquí realizar algunas precisiones. Por un lado, la CAA fue estimada en forma empírica a través de las ecuaciones ajustadas por Silva et al. (1988) utilizando 99 Unidades de Suelos del Uruguay. Estas ecuaciones utilizan además una estimación de densidad aparente según la ecuación descripta por Fernández (1979). Estas fórmulas toman en cuenta las fracciones granulométricas y el Corg que fueron efectivamente determinados en este trabajo. Esto, si bien es un método aceptado para nuestro país, puede constituir una limitante.

Por otra parte, la CAA se calculó hasta la profundidad de 60 cm. Sin embargo, el relevamiento detallado de suelos reveló diferencias en la profundidad efectiva de suelo o de arraigamiento. Así, mientras en la parte alta y plana del área seleccionada los suelos presentes eran Vertisoles Rúpticos de fase superficial y profunda, en las posiciones de ladera media y baja predominaban suelos más diferenciados y de relativamente menor profundidad de arraigamiento que los Vertisoles en su fase profunda (ver anexos). Esto determina a) diferencias potenciales en la CAA total debido a la profundidad total de suelo y b) diferencias en la energía de retención de agua en los diferentes perfiles de suelo. En el cuadro 3 se presenta un resumen de las constantes hídricas para las profundidades de suelo evaluadas.

Cuadro 2: Capacidad de almacenaje de agua, capacidad de campo, punto de marchitez permantente y densidad aparente para las distintas profundidades

	CC %		PMP %		dap		Cad	
	Prom	*CV(%)*	Prom	*CV(%)*	g/cm3	*CV(%)*	Mm	*CV(%)*
0-20	37	*4*	20	*4*	1,17	*3*	40	*6*
20-40	37	*4*	21	*5*	1,27	*3*	39	*5*
40-60	30	*6*	22	*5*	1,35	*3*	22	*19*

En este caso, la capacidad de almacenaje de agua para el estrato de 40-60 cm es menor que en los otros dos estratos (aproximadamente un 50 %) y el que presenta además más variación.

La determinación de *contenido de agua en el suelo* en cada punto de muestreo se realizó al estado R5 del cultivo. No se registraron precipitaciones antes o después de ese período. Los valores obtenidos se compararon con los valores de CAA estimados por las ecuaciones anteriores (Cuadro 3).

Cuadro 3: Medición de agua total (por gravimetría) en R5 para las distintas profundidades

	Agua total gravimétrica			
Profundidad	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	Unidades
Humedad %	19	21	21	%m-m
DAP	1,17	1,27	1,35	g/cm3
Agua medida	**44**	**53**	**56**	mm
PMP mm (*)	47	54	59	mm
Dif: agua real	-3	-1	-3	mm

(*) Punto de marchitez permanente (en mm), de las ecuaciones de Silva et al. (1998)

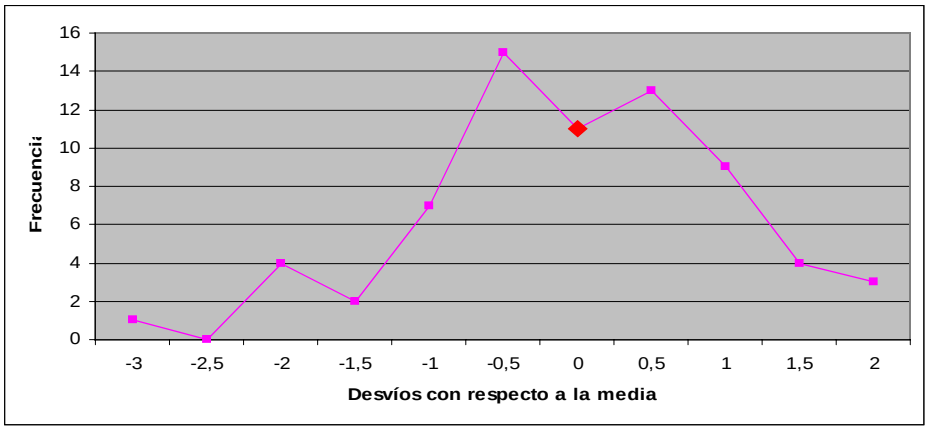
Como conclusión, cuando se evaluó el contenido de agua del suelo en este estado (R5), el perfil de suelo hasta la profundidad de 60 cm se encontraba en marchitez permanente lo que denota la alta deficiencia hídrica durante el período crítico del cultivo. Las precipitaciones posteriores (170 mm) a esta fecha ocurrieron recién dos semanas después de este muestreo donde el cultivo ya estaría en madurez fisiológica, por lo que en términos generales, el maíz cumplió su fase reproductiva con importantes deficiencias hídricas (Ver Anexos).

Dentro de las variables relacionadas con *los atributos topográficos* se observaron altos CV. Se destaca entre ellas, el rango de elevación (0 – 11 m) observado. Los CV fueron todos ellos altos, elevación 38,6%, pendiente 29,8% índice del poder del agua 136%, largo/gradiente de pendiente 96%, índice compuesto topográfico30%. La pendiente promedio presentó valores de 1,8 %.

El rango de variación en el rendimiento final fue alto (3255 – 6996 kg ha^{-1}). Cabe considerar aquí dos aspectos: a) la pérdida al momento de la cosecha de algunos puntos de muestreo, especialmente los situados en la ladera baja del área experimental, que visualmente presentaban un potencial de rendimiento sensiblemente menor al resto de la chacra y b) la imposibilidad de contar con un mapa de rendimiento detallado para captar en mayor medida la variabilidad de rendimiento de la chacra. La distribución de la frecuencia de rendimiento observada se asemeja a una campana de Gauss, aunque con

cierta tendencia a una mayor dispersión sobre la zona de menor rendimiento con respecto a la media (Figura 6). El tamaño de clase corresponde a ½ de desvío con respecto a la media (media 5659kg y con un desvío de 824 kg) considerando los puntos A y B.

Figura 6: Frecuencia de la distribución de los rendimientos promedio de maíz, de las celdas para los puntos A y B de la grilla en estudio.



En el Cuadro 4 se presenta, a manera de comparación con este trabajo, un resumen de la variabilidad típica encontrada en una serie de propiedades del suelo relacionadas con la variabilidad productiva en diferentes sistemas agrícolas.

Cuadro 4: Variabilidad de Distintos Factores.

Variable	CV (%)	Categorización
Rendimiento	8-29 [15]	Bajo- Moderado
Materia orgánica	21-41 [9,9]	Moderado- Alto
% Arcilla	16-53 [5,1]	Moderado- Alto
% Arena	3-37 [10,6]	Bajo- Moderado
PH	2-15 [10,1]	Muy Bajo
Nitrógeno	30-60 [10,6] [51,8]	Moderado-Alto
Fósforo	40-160 [15,9]	Alto
Potasio	40-160	Alto

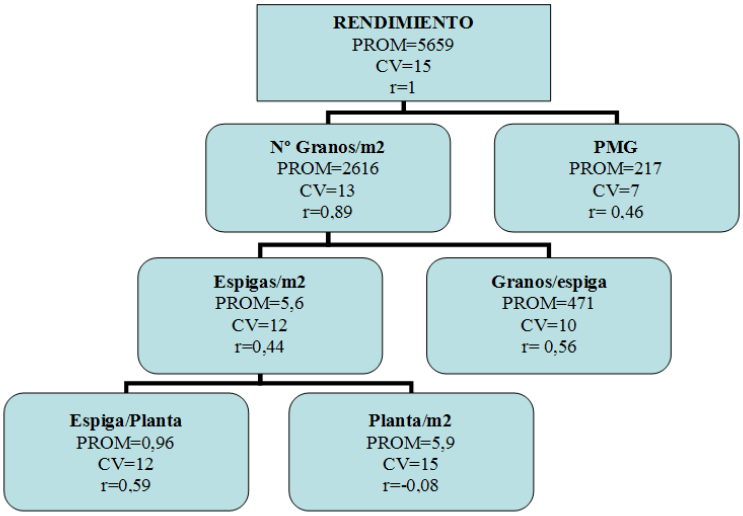
Fuente: adaptado de MC Bratney y Pringue, Mulla y Mc Bratney, citados por Roel y Terra (2006). Nota; valores entre [ ] corresponden a los CV de este trabajo.

Aunque el CV es un indicador de la variabilidad presente de una propiedad respecto a la media de la población muestreada, éste indicador presenta limitantes ya que el mismo no nos brinda ninguna información de la estructura espacial de esta variabilidad (Roel y Terra, 2006).

4.3. CORRELACIONES ENTRE LAS VARIABLES

En la figura 7 se presenta un diagrama de árbol con el rendimiento y sus componentes así como el grado de correlación entre estas variables.

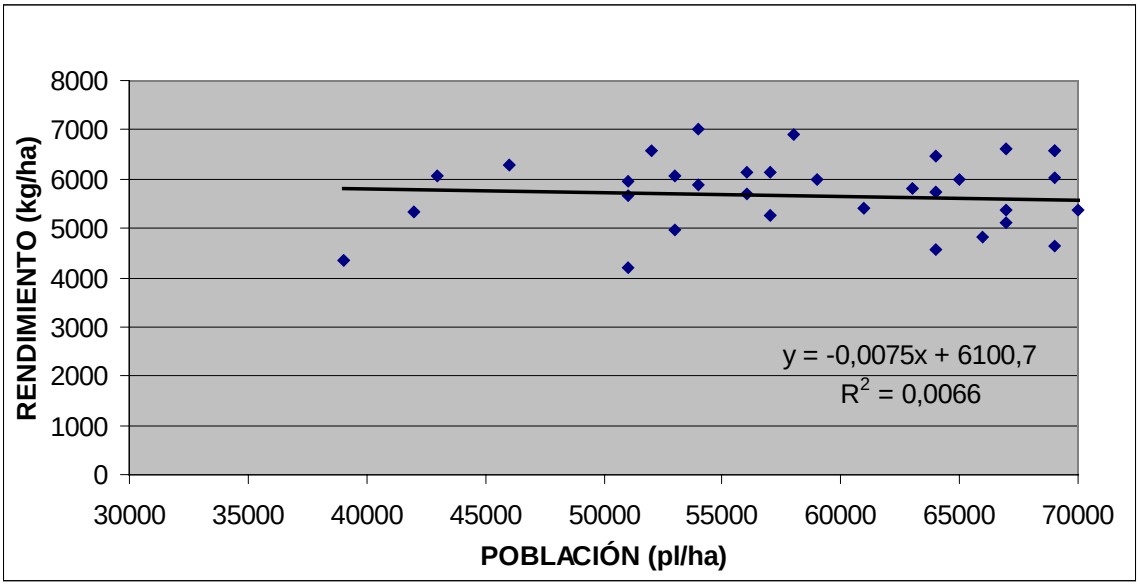
Figura 7: Rendimiento y sus componentes; promedio, CV y correlación con rendimiento.



El rendimiento promedio de la chacra fue de 5659 kg ha^{-1} con una variación del 15 %. Este rendimiento promedio obtenido puede ser considerado bajo teniendo en cuenta el potencial productivo de la chacra y el correcto manejo agronómico que realiza el productor. Sin duda, el pronunciado déficit hídrico durante el período crítico del cultivo, afectó el potencial de rendimiento del mismo y generó una importante variabilidad en el rendimiento. El rendimiento presentó una alta correlación con el número de granos/m^2 (r = 0.89) mientras que en caso del PMG la correlación fue menor (r = 0.46), y una variación de un 7 % siendo la variable más estable. La población, expresada a través del

número de plantas/m^2 no se correlacionó con el rendimiento final. Esta variable presentó un promedio de 59142 pl/ha, con un alto CV (15,2%). Prácticamente no existieron grandes diferencias en rendimiento entre lugares con poblaciones en el rango de 40.000 a 70.000 pl/ha (Figura 9). Estos datos coinciden con los reportados por Andrade et al. (2001) para las condiciones de Balcarce. Estos autores encontraron que bajo déficit hídricos moderados (de alrededor de 150 mm) durante la etapa reproductiva no existió respuesta en rendimiento a un rango de población similar a la obtenida en este trabajo. Es de recordar que en el período posterior a la siembra no se registraron precipitaciones significativas y esto probablemente contribuyó a una reducción en el stand final de plantas en partes de la chacra, aún cuando el mecanismo de siembra utilizado fue el óptimo para el cultivo de maíz.

Figura 8: Población y rendimiento de maíz para los distintos puntos de muestreo

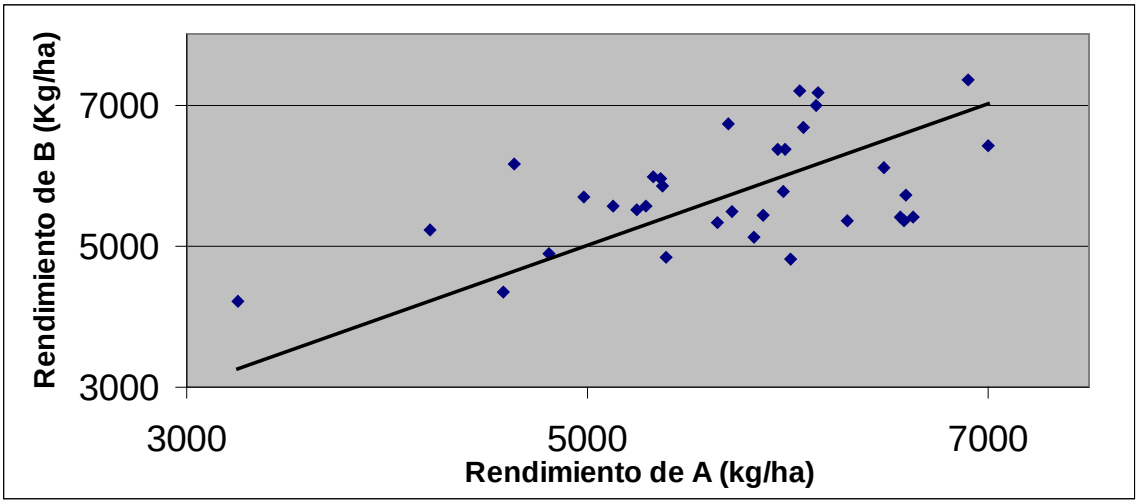


Habría que aclarar que elevación y población se correlacionan negativamente (r = -0,45) lo que nos estaría indicando que en lugares más bajos existirían zonas de mejor implantación, mientras que en lugares más elevados menor número de plantas. Si consideramos las plantas sin espiga y las plantas con espigas defectuosas que no aportan al rendimiento, estas presentaron una alta variabilidad (CV = 46 %) y eran producto de un stand de plantas poco uniforme con mayor importancia en la ladera baja. En estos casos la desuniformidad ejerce un efecto de competencia apareciendo plantas dominadas y dominantes. Las primeras en general no logran recuperarse al avanzar el ciclo y como consecuencia sufren un importante aborto de granos, provocando una caída en el rendimiento (Bragachini, 2002).

4.3.1. Correlaciones entre los puntos de muestreo A y B.

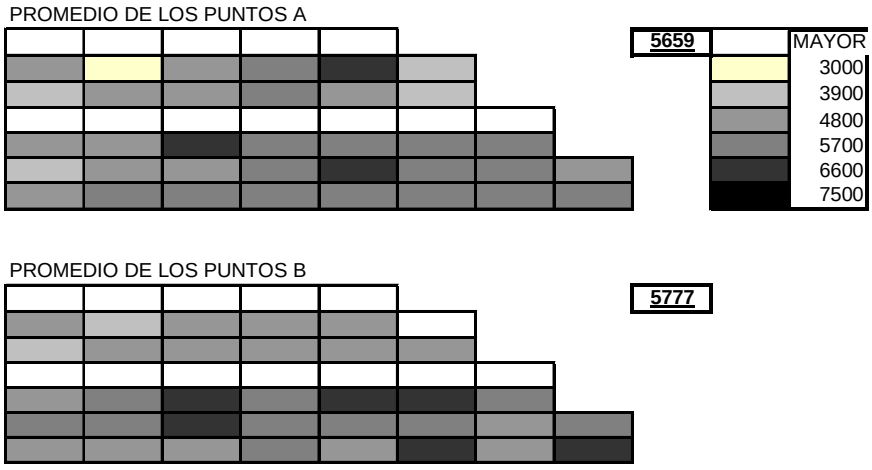
Cabe recordar que para cada celda de la grilla, se realizó un muestreo de cosecha en el centro de la misma (puntos A) y a unos 20 m (los puntos B). La relación entre los valores de rendimiento observados entre los puntos A y B se representa en la Figura 9. Los resultados muestran una moderada a baja repetibilidad en los rendimientos dentro de la misma celda. Aún cuando el tamaño de celda era adecuado para este tipo de estudios, existió una importante variabilidad de rendimiento dentro de celdas. Sin duda, para este tipo de estudios, sería deseable contar con un monitoreo continuo o mapa de rendimiento, de forma de captar mejor la variabilidad observada.

Figura 9: Rendimiento de los Puntos A y B



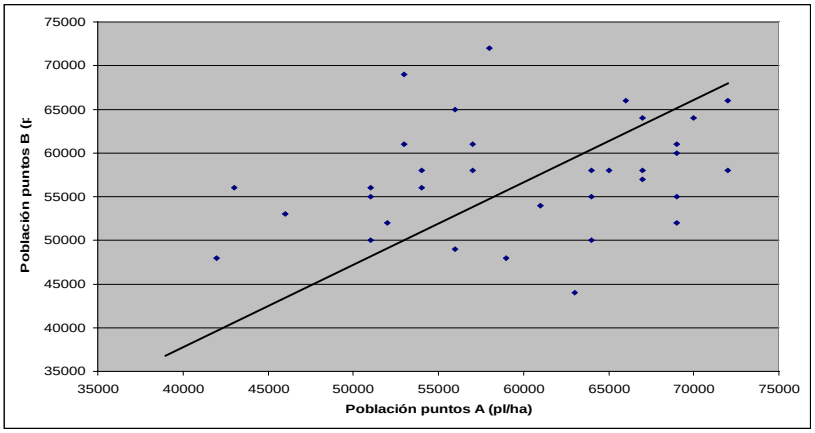
En la Figura 9 se representa la variabilidad de rendimiento obtenida para los puntos A y B en las celdas cosechadas. En general se observa una tendencia a mayores rendimientos en la parte alta de la chacra, de topografía plana y asociada a suelos Vertisoles, y menores rendimientos en los sitios de ladera media y baja, de mayor pendiente y situados sobre suelos con mayor diferenciación textural (Brunosoles Eútricos Típicos). Habría que señalar, que las tendencias observadas no son de límites tan claros.

Figura 10: Mapa de rendimiento para los puntos A y B



En la figura 11 se presenta la relación entre la población o plantas a cosecha para los puntos A y B. Se observa una gran dispersión en los datos, producto de la implantación desuniforme del cultivo. Los datos muestran tanto para población como para rendimiento la magnitud de la variación observable dentro de un área de chacra sometida a un manejo homogéneo de los insumos. Siendo esta una característica de muchas situaciones comerciales de producción.

Figura 11: Población de maíz en las parcelas de estudio para cada punto A y B.

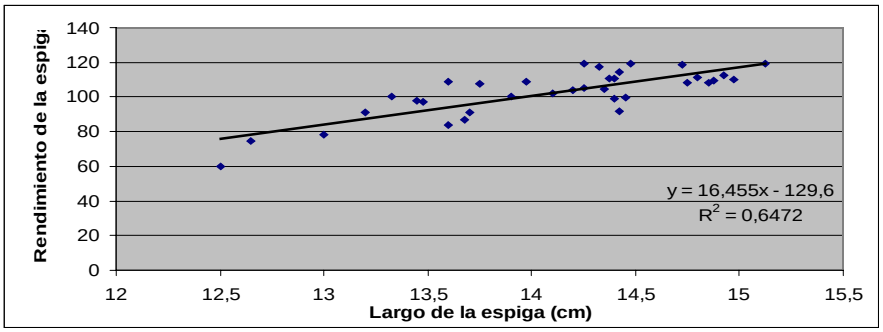


4.3.2. Relaciones entre rendimiento, sus componentes y altura de planta

La altura de planta presentó una correlación positiva (r = 0.4) con el rendimiento final y negativa (r = -0.5) con el número de plantas/m^2. Por su parte los componentes de rendimiento, granos/espiga y espigas/planta presentaron una correlación positiva con la altura de planta (r = 0.6 y 0.4 respectivamente). La población, expresada a través del número de plantas/m^2 presentó por su parte una correlación negativa con las variables número de espigas/planta, granos/esp y PMG (r = -0.7; -0.6 y -0.7 respectivamente) y positiva con espigas/m^2 (r = 0.7).

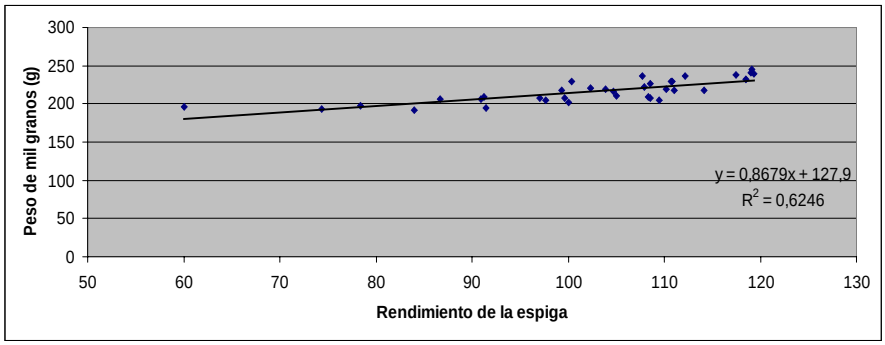
4.3.3. Otras variables medidas de importancia

Figura 12: Relación entre largo de espiga y rendimiento de espiga



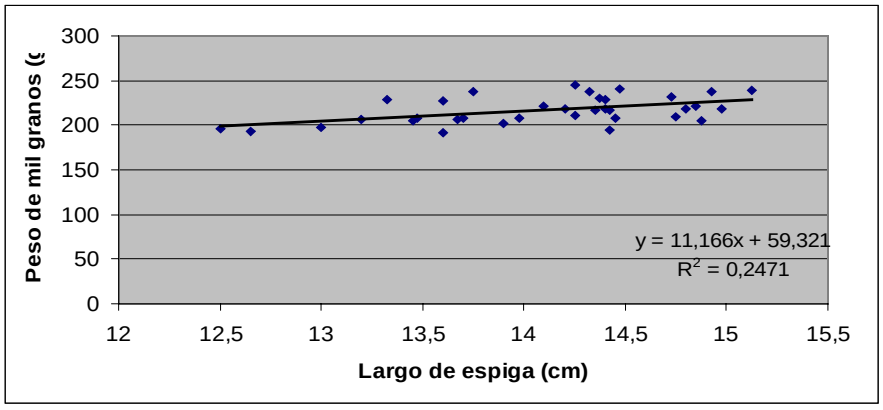
La correlación entre largo de espiga y rendimiento de la espiga es 0,80.

Figura 13: Rendimiento de espiga y peso de mil granos.



La correlación entre rendimiento de espiga y PMG es de 0,79

Figura 14: Largo de espiga y peso de mil semillas



La correlación entre largo de espiga y PMG es 0,50

4.3.4. Relaciones entre rendimiento y componentes, con propiedades químicas, hídricas y topográficas

De las propiedades químicas relevadas en el horizonte superficial (0 – 20 cm) el pH fue la única variable que presentó una correlación significativa pero moderada con rendimiento (r = 0.37). Es muy probable que esto no esté explicando una relación causa – efecto ya que el rango de pH observado en la chacra puede considerarse no limitante para el cultivo de maíz. Sin embargo, las celdas con valor de de pH más altos estaban ubicadas en la parte alta del área experimental, de topografía casi plana y de acuerdo al relevamiento detallado de suelos asociadas a Vertisoles profundos. Es probable entonces que otros factores estén incidiendo en la relación positiva entre pH y rendimiento. El resto de las propiedades químicas evaluadas en superficie no presentó correlaciones significativas con el rendimiento. Este comportamiento puede ser esperable para las variables determinadas. Así, la concentración de $N\text{-}NO_3^-$ en el suelo, que es un indicador aceptado y utilizado para decidir la fertilización nitrogenada del cultivo de maíz (Perdomo y Cardellino, 2006), presentaba al momento del muestreo (V4) valores en el rango probable de respuesta (media = 17 ppm). Sin embargo, no es esperable una relación entre disponibilidad de N y rendimiento absoluto en este trabajo pues: a) luego del muestreo se aplicó una cantidad suficiente de N para satisfacer los requerimientos del cultivo y b) el potencial de rendimiento del cultivo se vio limitado por otros factores como el stress hídrico. Tampoco se detectaron correlaciones significativas entre

disponibilidad de P y rendimiento. La falta de relación entre el Corg de 0-20 cm y el rendimiento puede estar explicada por los altos tenores de materia orgánica que presenta el área experimental. Similares resultados han sido reportados para chacras del cinturón maicero americano (Kravchenko y Bullock, 2000). Estos autores sugieren que el contenido de materia orgánica puede incidir en el rendimiento cuando se presentan contenidos menores a 30 g kg^{-1}.

Se realizó un análisis mecánico para la determinación de las diferentes fracciones granulométricas (arcilla, limo y arena) para las profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm. Paralelamente en estas muestras se determinó el contenido de carbono orgánico. Al igual que en superficie (0-20 cm), los contenidos de Corg en profundidad no presentaron correlaciones significativas con el rendimiento, debido muy probablemente a los altos tenores observados en todos los horizontes de suelo muestreados. Las fracciones granulométricas más relacionadas con el rendimiento fueron el % de arena de 0-20 y 20-40 cm. Estas tuvieron una correlación negativa con el rendimiento (r = -0.38 y -0.34 respectivamente). Esto resulta lógico en la medida que esta fracción presenta la menor capacidad de retención de agua. El % de limo en las profundidades 20-40 y 40-60 cm tuvo por su parte una correlación positiva con rendimiento (r = 0.40 y 0.41, respectivamente). Cabe recordar, que el limo presenta como fracción granulométrica una mayor disponibilidad de agua, tomada como la diferencia entre el valor de capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. El % de arcilla no tuvo correlaciones significativas con el rendimiento pero si existió una relación negativa entre el % de arcilla

en el horizonte B/ % de arcilla en el horizonte A o relación Arcilla B/A con la variable rendimiento (r = -0.36). Este cociente mide el grado de diferenciación textural de los dos horizontes. Nuevamente aquí se ve una asociación entre esta variable con el tipo de suelo y la posición topográfica. Los suelos menos diferenciados, Vertisoles, se encontraban además en la parte alta y plana de la chacra. Mientras tanto, el grado de diferenciación textural aumentaba en las laderas media y baja, de mayor pendiente, donde predominaban Brunosoles Eútricos, con cierto grado de erosión. Sin duda la interrelación entre estas variables resulta en una distribución de agua diferencial dentro de la chacra, y puede haber afectado la captación de agua y finalmente los rendimientos. "Esta distribución de tipos de suelos en estos ambientes edáficos es bastante común en suelos agrícolas del Uruguay, lo que constituye un elemento importante a los efectos de manejar o delimitar zonas de comportamiento hídrico diferencial dentro de chacras [2]". Cabe considerar que el relevamiento detallado de suelos (ver anexo) permitió además determinar que en las áreas de Vertisoles, la profundidad efectiva de suelo era mayor que en las áreas de ladera media y baja. Es de destacar, a los efectos de establecer un programa de manejo sitio-específico, la relevancia de variables intrínsecas del suelo como la textura, perfil de suelo, frente a las variables de fertilidad clásica, de mayor variación en el tiempo (disponibilidad de nutrientes).

El contenido de *agua en el suelo* no presentó una correlación significativa con el rendimiento. Si bien la medición se realizó en una sola fecha (al estado R5), no se produjeron precipitaciones previas a este estado fenológico, y los resultados mostraron

que los perfiles de suelo evaluados se encontraban en el PMP. Es probable que hayan [2] agua a mayor profundidad de la evaluada (0-60 cm), teniendo en cuenta las variaciones en profundidad de suelo observadas (Anexo). Esto podría haber ayudado a explicar de mejor forma zonas de alto y bajo rendimiento. De todas formas, es indudable que el cultivo fue afectado por una deficiencia hídrica moderada a alta que afectó el potencial de rendimiento del cultivo.

[2] Molfino, J. 2006. Com. personal.

Con respecto al *rendimiento y la topografía* es de destacar la relación observada entre las variables elevación y pendiente con el rendimiento final. La elevación se correlacionó en forma positiva con el rendimiento (r = 0.65) y la pendiente en forma negativa (r = -0.45). La relación positiva entre elevación y rendimiento puede estar explicada por: a) la parte alta del área experimental o la ladera alta que estaba asociada a suelos Vertisoles profundos (> a 1 m de perfil efectivo de suelo); b) presentaba una topografía casi plana por lo que es probable que esto haya incidido en una mejor captación de las precipitaciones ocurridas. A medida que se avanzaba en ladera (media y baja), aumentaba la diferenciación textural, se reducía la profundidad del suelo y por otro lado la pendiente se hacía más abrupta. Esto puede haber reducido la precipitación efectiva en los diferentes eventos ocurridos en la estación de crecimiento, y puede explicar la correlación negativa de la pendiente con el rendimiento. Cabe recordar que muchos trabajos han detectado en general mayores rendimientos en el bajo en años secos (Kravchenko y Bullock 2000, Kaspar et al. 2003) pero aquí el bajo propiamente dicho no estaba dentro del área experimental.

En cuanto a los componentes de rendimiento y la asociación con otras variables cabe resaltar la correlación significativa entre la población, expresada como plantas/m^2 y las variables elevación (r = -0.45) y pendiente (r = 0.55) lo cual representa un comportamiento inverso al del rendimiento. Habría que aclara que al momento de la siembra se observó una cobertura mayor de rastrojos en el alto en comparación con la ladera. De todas formas dentro del rango de población observado no hubo una asociación de esta variable con el rendimiento final. Por su parte las asociaciones más relevantes entre el número de espigas/planta y el número de granos/espiga mostraron la misma tendencia que el rendimiento final. Estas variables presentaron una asociación positiva con la elevación (r = 0.57 para espigas/planta y granos/espiga) y negativa con la pendiente (r = - 0.52, para las dos variables). El número de espigas/planta se correlacionó además negativamente con el contenido de arena en todos los horizontes de suelo, y positivamente con el contenido de arcilla.

4.3.5. Relación entre algunas características químicas, texturales hídricas y topográficas

El P disponible se correlacionó en forma positiva con el contenido de arcilla (r = 0.37). El pH se correlacionó con varias características pero la más relevante fue la

asociación negativa (r = - 0.47) con el grado de diferenciación textural (arcilla B/arcilla A). Esto está asociado a la presencia de concreciones de $CaCo_3$ en los suelos Vertisoles de menor diferenciación textural. Por otra parte el pH presentó correlaciones significativas con variables topográficas como elevación (r = 0.63), pendiente (r = -0.37), muy probablemente asociado a los suelos dominantes en cada situación topográfica.

La concentración de nitratos en el suelo no tuvo asociación con parámetros como el Corg o el potencial de mineralización de N (PMN). El PMN estuvo asociado con algunas características topográficas pero estas correlaciones aunque significativas fueron débiles. Shahandeh et al. (2005) reportó que el potencial de mineralización de nitrógeno mostró correlación significativa con el contenido de arcilla de los suelos. Esto no fue observado en este trabajo, probablemente debido a que el rango de variación de esta fracción granulométrica fue muy bajo. Quizás por esta misma razón, el contenido de arcilla no se correlacionó con el Corg. Baddock y Nelson, citados por Kaspar et al. (2003), reportaron que el carbono orgánico está correlacionado con contenido de arcilla por la capacidad de la materia orgánica de adherirse a las texturas más finas.

En el caso de las fracciones granulométricas el % de Arena en superficie se correlacionó en forma negativa con la elevación (r = -0.46) y positiva con la pendiente (r = 0.44). Esto probablemente esté relacionado con la presencia de Vertisoles de textura más arcillosa en la parte alta de la chacra. La arcilla en superficie, por su parte, se asoció positivamente con la elevación (r = 0.44).

En cuanto a la *pendiente* el limo a 40 tuvo una relación de -0,42; con arcilla 40 0,30 limo a 60 -0,43; arcilla a 60 0,31; y arcilla del B/A 0,40. Para Malo et al., Pachepsky et al., citado Kaspar et al. (2003) la pendiente está correlacionada negativamente con limo, arcilla y materia orgánica por el proceso de erosión y sedimentación especialmente en zonas donde la capa superficial de suelo contiene más limo, arcilla y materia orgánica que las otras capas de suelos. En este trabajo no se hallaron ninguna de esas correlaciones.

En relación a las propiedades de suelo, la clase de erosión y, en grado menor la productividad han sido relacionadas con la posición topográfica (Walter, Fuley, Daniels, Stone, Kreznor, Carter, Ciolkossz, citados por Kaspar et. al., 2003). Por ejemplo el contenido de materia orgánica y el espesor del horizonte A, el espesor del horizonte B y el grado de desarrollo, ph, profundidad del carbonato, y capacidad de almacenaje de agua, han sido todos correlacionado con posición topográfica (Kreznor et al., citado por Kaspar et al., 2003).

Se hizo una análisis de correlación con las unidades de suelo (10.1 y 10.15) y rendimiento y esta no fue significativa, "La parcela en estudio se ubica en el contacto de los Grupos 10.1 y 10.15. Recordar que los límites de los Grupos Coneat no son precisos, resultan del análisis de fotos aéreas con verificaciones de campo pero en ningún caso con muestreos tan detallados como éste. Por otro lado, los suelos de la Unidad Risso tienen

aproximadamente 25 % de arena, en tanto que los vertisoles de Cuchilla Corralito, del orden de 30 % en el horizonte A. Esto, además de la incidencia de los materiales generadores, podría explicar una diferencia en la capacidad de retención de agua entre los dos tipos de suelos (> 30.4 % de arena y < 30.4)...[2]". Ni la textura ni contenido de humedad, ni rendimiento ni otros factores se correlacionaron con los distintos grupos Coneat en forma significativa. Quizá es una superficie muy chica, con un "ruido" bastante grande de otros factores (y tampoco hay una definición muy precisa de los grupos), por lo que sería muy ambicioso que este factor pudiese generar diferencias claras en el rendimiento u otras variables en estudio.

Figura 15: Grilla de las parcelas y unidades de suelo en toda la chacra de maíz

4.4. TECNICAS DE ESTADISTICA MULTIVARIADA

4.4.1. Cluster análisis o análisis de grupos.

Se realizó un análisis de clusters para evaluar si existían zonas estadísticamente distintas dentro de la región de estudio, en el rendimiento y sus componentes. Este análisis se realizó con el procedimiento FASTCLUS de SAS (SAS Institution versión 2000), utilizando la distancia euclideana entre puntos, y el algoritmo k means como modelo de unir los puntos. Esta técnica agrupa las observaciones en k clusters y el número potencial de clusters debe ser definido previamente. En base a características que anteriormente fueron destacadas como importantes y relacionadas a rendimiento y sus componentes. Para ello se seleccionó las variables: potencial de mineralización de Nitrógeno, carbono orgánico a 20, capacidad de almacenaje de agua total, elevación, pendiente, índice del poder del agua, largo/gradiente de la pendiente, e índice compuesto topográfico, por considerase de importancia en determinar tanto el rendimiento como sus compoentes. Se fijaron 5 posibles clases (clusters) aunque se probó también con menos clases (4 y 3).

El resultado de este análisis, para rendimiento fue que existían 5 zonas, que resultaban no ser significativamente diferentes cuando se hacía un análisis DMS entre ellas ($P>0,05$). Para los componentes del rendimiento, los resultados fueron aproximadamente los mismos que con rendimiento. En esta variable se cuantificaron diferencias significativas entre algunos grupos, que no fueron relevantes para definir

causas biologicas de la variacion, salvo en algunos casos donde se diferenciaba algún cluster de otro en forma significativa.

4.4.2. Componentes principales y análisis de factores

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) incluyendo las variables relevadas, exceptuando al rendimiento. Los 5 primeros componentes principales (CP) explicaron un 76 % de la variación de los datos (Cuadro 5)

Cuadro 5: Eigenvalues de la matriz de correlación, Princomp procedure.

	Eigen value	Difference	Proportion	Cumulative
1	8,5	3,29	0,30	0,30
2	5,2	2,06	0,19	0,49
3	3,1	0,57	0,11	0,60
4	2,6	0,83	0,09	0,69
5	1,7	0,12	0,06	0,76
6	1,6	0,57	0,06	0,81
7	1,1	0,17	0,04	0,85

Aunque considerando los primeros 2 componentes este análisis capta casi el 50% de la variación.

El Componente principal 1 (CP1) representa el contraste entre variables que definen la capacidad de almacenaje de agua del suelo (Corg 0-20, 20-40 cm, Agua disponible total) y principalmente la ubicación topográfica reflejada por la elevación (de signo negativo) y el pH muy asociado al tipo de suelo en función de la posición topográfica. De todas formas cabe acotar aquí que la profundidad considerada es de solamente 60 cm de suelo. Esto estaría subestimando la capacidad de almacenaje

potencial del suelo en la parte alta de la chacra, ya que aquí la profundidad efectiva de suelo era en general mayor a 1 m (ver anexos).

El segundo componente principal (CP2) está fuertemente asociado a propiedades de los horizontes de suelo sub-superficiales como la arcilla (40-60 cm) , y el grado de diferenciación textural o Arcilla B/A (con signo positivo), en contraste con la elevación, el Corg de 40 – 60 cm y la CAA total y a la profundidad de 40 – 60 cm. Esto estaría indicando que los suelos más diferenciados, ubicados en las laderas media y baja, en donde el % de arcilla en profundidad alcanza tenores muy altos afecta negativamente la capacidad de almacenaje de agua. Aquí también aparecen (con signo positivo) atributos primarios y secundarios de terreno asociados fuertemente a posiciones topográficas con mayor pendiente.

El tercer componente principal (CP 3) representa básicamente el contraste entre fracciones granulométricas (arena vs. arcilla).

El resto de los componentes principales parece más difícil de interpretar y no se discute con más profundidad.

El análisis de factores (AF) tomó las mismas variables utilizadas por el ACP. Con los 5 primeros factores extraídos se puede explicar el 74% de la variación de los datos

(Cuadro 6). Aunque si se consideran aquellos factores con eigenvalues > a 1 se agregan 2 factores más y la varianza acumulada hubiera sido del 84%.

Cuadro 6: Eigenvalues de la matriz de correlación, Factor procedure.

	Eigenvalue	Difference	Proportion	Cumulative
1	7,0	2,5	0,28	0,28
2	4,5	1,4	0,18	0,46
3	3,1	0,9	0,12	0,58
4	2,2	0,5	0,09	0,67
5	1,7	0,1	0,07	0,74

Luego de una transformación ortogonal varimax, los factores identificados fueron rotados para alcanzar una estructura más simple y para ayudar en la interpretación de los datos. Las variables con valores más altas que +-0,5 dentro de cada factor se elegían para resaltar cada factor (Cuadro 7).

Cuadro 7: Factores del FA y relación lineal de las variables con los 5 factores más importantes determinados por el análisis

	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5
Corg V4	0,86	0,04	0,05	-0,13	0,03
Fósforo	0,01	0,08	-0,01	-0,31	-0,45
pH	-0,67	-0,32	-0,29	0,10	-0,37
NNO3	-0,22	0,25	-0,25	-0,02	0,19
PMN	0,32	-0,51	0,03	-0,03	-0,16
Carb org_20	0,92	0,05	0,03	0,18	0,22
Arena20	0,07	0,03	-0,00	0,74	0,46
Arcilla 20	0,00	-0,29	-0,27	-0,59	-0,44
Dens.AP_20	-0,94	-0,06	-0,03	-0,06	-0,15
Carb org_40	0,66	0,11	0,50	0,32	0,12
Arena_40	0,11	0,03	-0,1	0,78	0,19
Arcilla_40	0,11	-0,01	-0,20	-0,85	0,09
Dens.AP_40	-0,64	-0,11	-0,52	-0,24	-0,08
Carb org_60	0,08	-0,04	0,96	0,02	-0,01
Arena_60	0,29	-0,08	0,05	0,69	-0,13
Arcilla_60	0,24	0,31	-0,39	-0,58	0,46
Dens.AP_60	-0,03	0,02	-0,97	0,02	-0,00
CAA_TOT	0,44	-0,02	0,82	0,29	0,03
Arcilla B/A	0,16	0,50	-0,06	-0,00	0,74
Prof del Bt	0,10	0,21	-0,19	0,21	0,50
Elevación	-0,21	-0,55	-0,07	-0,08	-0,68
Pendiente	0,22	-0,09	0,13	-0,12	0,78
Poder del ag.	0,11	0,95	0,01	0,00	0,11
Largo/gr pend	0,18	0,88	0,03	-0,04	0,21
I. Comp topo	0,18	0,93	-0,08	0,01	-0,16

Los valores expresados en la tabla (loadings) indican la correlación entre la variable y un determinado factor. Así un valor alto para determinada variable sugiere una alta asociación entre esa variable y el factor. Eso determina que variables con valores positivos o negativos altos están probablemente describiendo un factor común que las hace variar en conjunto dentro del campo.

Así por ejemplo, el primer factor puede ser denominado como un factor relacionado con el *C orgánico o la materia orgánica*, pues presenta valores altos para esta característica y muestra una correlación negativa con el pH.

El segundo factor puede denominarse como factor de *topografía* ya que incluye altos valores en los atributos primarios y secundarios de terreno derivados de los datos de elevación. El índice del poder del agua (Stream Power) por ejemplo, mide el poder erosivo del escurrimiento, mientras que el CTI tiene relación con la distribución de agua en la chacra. Por su parte la elevación se correlacionó negativamente con este factor, muy probablemente porque en la parte alta del área experimental la topografía era casi plana.

El tercer factor extraído está relacionado o puede denominarse como el relacionado con el *agua disponible* y sobre todo en profundidad.

El cuarto factor está claramente relacionado a la *textura* ya que representa las correlaciones entre las fracciones arena y arcilla a diferentes profundidades, mientras que el quinto factor relaciona a variables topográficos con el grado de diferenciación textural y probablemente pueda ser entendido como un factor combinado entre *la topografía y el tipo de suelo*. En ese sentido presenta altos valores positivos para las variables pendiente y relación arcilla B/A o grado de diferenciación textural y negativos para elevación. Cabe recordar que los suelos ubicados en las zonas de mayor pendiente eran Brunosoles Eútricos con fuerte diferenciación textural y que esta variable aumentaba a medida que se pasaba de la parte alta de la ladera (plana) hasta la ladera baja.

4.4.3. Modelos de regresión con las variables originales

En primer lugar se presentan los modelos de regresión múltiple para el rendimiento y los componentes de rendimiento utilizando las todas las variables independientes.

Eq 8: Plxm2= 5,27* + 1,2(Slope) + 0,46(PH) – 0,09 (ARC_40)
[R^2= 0,45]

Eq 9: EspFerPl= 0,14* +0,02(ELEVA) –0,025(NNO3) +0,023(ARC_60) –0,09 (CORGV4) +0,018(P) [R^2= 0,76]

Eq 10: Espxm2 = 0,84* + 0,578(Slope) + 0,60(PH)
[R^2= 0,28]

Eq 11: GranxEsp = 80,4* +11,4(ELEVA) +50,1(CORGV4) +6,11(AD_40) – 3,44(ARENA_40) [R^2= 0,62]

Eq 12: Granxm2 = 3053 + 45,5(ELEVA) – 29,0(ARENA_40) [R^2= 0,23]

Eq 13: PesoMilG = 187,5 + 3,76(ELEVA) [R^2= 0,41]

Eq 14: Rendimiento = 4023+210(ELEVA) [R^2=0,42]

OTRAS VARIABLES DEPENDIENTES:

Eq 15: ALTURA = 0,357* + 0,029(ELEVA) + 0,017(ARC) + 0,017(AD_20) [R^2= 0,58]

Para casi todas las ecuaciones el coeficiente de determinación es aceptable, (excepto en la ecuación 10 y 12). Un R^2 de 50% se consideró como el limite para decir que la relacion es buena desde el punto de vista estadístico. Aunque en términos biológicos relaciones con menor R^2 entre variables pueden ser de consideración para enteder relación entre variables. Por lo que en términos generales las variables evaluadas permiten definir modelos aceptables para predecir el rendimiento y sus componentes. En cuanto a la metodología que se empleó Moore et al. (1993) resaltó, que la mejor combinación de las variables de terreno que exploraron la variación de atributos medidos fue usando regresión lineal “Stepwise”.

La elevación mostró una relación positiva con el rendimiento. Nuevamente aquí se debe realizar la consideración que la parte alta del área experimental presentaba una topografía casi plana, lo que facilitaba la captación del escurrimiento, y además estaba asociada a suelos Vertisoles profundos (> a 1 m de profundidad efectiva). La consideración a realizar aquí es que en esta parte de la chacra existía una microvariación importante debido a la presencia de la fase superficial y profunda de los Vertisoles en forma sistemática y en pocos metros. Quizás la pregunta a realizar aquí es: ¿si ésta micro-variación podría haber sido captado con un mapa continuo de rendimiento?. Si esto fuera así, la segunda pregunta sería: ¿cuál es el significado agronómico de esta variación? o dicho de otra forma ¿sería posible llegar a manejar esta variación?.

4.4.4. Modelos de regresión con los Factores del "factor analisis"

A continuación se presentan los modelos de regresión ajustados para el rendimiento y sus componentes utilizando como variables independientes los valores de los factores extraídos para cada celda.

Eq 16: Plxm2 = 5,94 +0,402(Factor5)
[R^2= 0,21]

Eq 17: EspFerPl = 0,951 -0,058(Factor5) -0,0474(Factor4) -0,0240(Factor3)
[R^2= 0,49]

Eq 18: Espxm2 No variable met the 0.1000 significance level

Eq 19: GranxEsp = 469,9 -21,9(Factor5) [R^2= 0,26]

Eq 20:Granxm2 = 2609 -101,3(Factor5) [R^2= 0,09]

Eq 21:PesoMilG = 216,1 -7,666(Factor5) [R^2= 0,28]

Eq 20: Rendimiento = 5609 -414,8(Factor5) -226,3(Factor2) [R^2= 0,31]

OTRAS VARIABLES DEPENDIENTES:

ALTURA = 2,064 - 0,0478(Factor5) [R^2= 0,26]

En general el ajuste de los modelos utilizando esta metodología fue más pobre que utilizando todo el set (o conjunto) de variables originales. Es de destacar, sin embargo que para el caso del rendimiento un 31 % de la variación del mismo estuvo explicado por un modelo que incluía al quinto factor o factor de *topografía y tipo de suelo* que incluía variables como elevación, fracciones granulométricas y el grado de diferenciación textural. Si bien el ajuste es peor en este caso utilizando los factores como variables independientes, el grado de conocimiento sobre la correlación de estas variables ayuda a comprender mejor la relación final con el rendimiento.

Cabe destacar que el relevamiento detallado de suelos (Anexo) resultó de gran utilidad para la interpretación final de datos. Sin embargo, no se adjudicó a cada celda, la profundidad efectiva de suelo, ya que no se delinearon los polígonos correspondientes a

cada tipo de suelo. Esto es, porque el relevamiento detallado no se realizó en todas las celdas, sino que estos puntos se eligieron basados en los rendimientos obtenidos (altos, medio y bajos), y en la topografía del área experimental.

Para continuar avanzando en el conocimiento de la variabilidad de los ambientes productivos y las relaciones causa – efecto que determinan la variabilidad de los rendimientos es imprescindible incorporar tecnologías modernas que reduzcan los costos y tiempos de muestreo y a la vez capturen la mayor variabilidad posible. En ese sentido, el uso de mapas de rendimiento, mapas detallados de suelo, el uso de sensores para la determinación de conductividad eléctrica y la percepción remota aparecen como promisorios para avanzar en el concepto de delineación de zonas homogéneas o de respuesta vegetal similar dentro de chacras.

4.5. LIMITANTES

Debido a problemas experimentales se perdieron 2 hileras, correspondientes a 12 estaciones de muestreo (previo a la cosecha). La hilera que se encontraba en el área más baja del campo y otra hilera a media ladera.

Por otro lado no se pudo acceder a generar un mapa de rendimiento del área lo que hubiera generado probablemente mayor robustez en los datos.

5. CONCLUSIONES

- Se determinó una variabilidad de rendimiento importante, con un rango entre 3200 y 7300 kg ha^{-1}, con un promedio de 5700 kg ha^{-1} y un CV de 15%.

- De los componentes de rendimientos, el componente que mejor se asoció con el rendimiento fue el número de granos/m^2 (r=0,89)

- La población (pl/m2) fue el componente con mayor CV=15%, y no tuvo correlación con rendimiento.

- Dentro de las propiedades que mejor explicaron la variación de rendimiento se encontraron variables topográficas y texturales, asociadas al tipo de suelo dominante.

- La elevación y la pendiente fueron los factores mejor correlacionados con rendimiento (0,65 y -0,48 respectivamente).

- Las propiedades químicas, no tuvieron mucha relevancia en explicar el rendimiento y se correlacionaron poco con los componentes de rendimiento.

- Propiedades texturales, resultaron importantes en definir el rendimiento. Arena a 20 y 40 tuvo una correlación media y negativa, el limo a 40 y 60 positiva y fuerte, la relación Arcilla B/A fuerte y negativa.

- La variación de rendimiento fue explicada fundamentalmente por variables intrínsecas de carácter permanente. Lo que sería de gran importancia en lo que respecta el manejo sitio específico, al no variar significativamente con los años e implicaría zonas mejor delimitadas espacial y temporalmente.

6. RESUMEN

El objetivo de esta tesis fue de realizar un estudio preliminar de los principales factores que explican la variabilidad de rendimiento observables en un cultivo de maíz en una chacra comercial típica en Uruguay. Este resulta un insumo básico para avanzar en el concepto de manejo "sitio específico". En este sentido es prioritario comenzar a dilucidar, variables, herramientas y metodologías de trabajo que puedan hacer que esta tecnología pueda llegar a ser utilizada. Se eligió una chacra con manejos agronómicos de punta y en una zona de alto potencial agrícola. Posteriormente se buscó una zona con cierta heterogeneidad, en cuanto a pendiente, topografía y tipo de suelo. El cultivo de maíz sufrió un moderado déficit hídrico durante el período alrededor de floración lo que redujo su potencial de rendimiento. Se determinó que existía una variabilidad de rendimiento considerable, con un promedio de 5700 kg/ha y un CV de 15%. De los componentes de rendimiento, el componente que mejor explicó el rendimiento fue el número de granos/m^2 (r= 0,89). La población (pl/m2) fue el componente con mayor CV=15%, y no tuvo correlación con rendimiento. Muchos son los factores que contribuyen a generar esta variabilidad de rendimiento. En este estudio se hizo énfasis en las propiedades químicas, físicas, hídricas y topográficas. Dentro de las propiedades que mayor impacto tuvieron en determinar estas variaciones se destacaron la topografía y la textura asociada al tipo de suelo. La elevación fue el factor que se relacionó mejor con el rendimiento (r=0,65) y componentes del rendimiento. La pendiente tuvo una asociación muy importante (r=-0,45) pero otros atributos del terreno una asociación media a baja. En cuanto a las

propiedades de textura, arena a 20 y 40 tuvo una correlación media y negativa, el limo a 40 y 60 positiva y fuerte, la relación Arcilla B/A fuerte y negativa. Los modelos de regresión múltiple determinaron que la elevación contribuyó a explicar una moderada parte de la variación en rendimiento (R^2= 0,42). El uso de técnicas multivariadas asociadas a modelos de regresión múltiple no mejoró la explicación de las variaciones de rendimiento pero permitió establecer con más claridad la relación entre las variables medidas en el campo.

Palabras clave: Variabilidad, rendimiento, maíz, manejos sitio específico

7. SUMMARY

The objective of the thesis was to evaluate the variability of a corn grain yield in a commercial field, and identify the factors that are related with this variability. This work will help to start dealing with fields in a "site specific" way. Therefore is priority to comprehend, variables, tools and work methodologies that can make this technology useful in next years. The study was situated in a 11 ha corn field applying appropriate agronomic practices, soils were mollisols and vertisols. The field had considerable soil and topographic variability. Precipitation during the study were 20% below the long term average (103 mm), particularly marked during the corn reproductive stages. The yield variability was important and significant, with an average of 5700 kg/ha and a coefficient of variation of 15 %. Many causes contributed to generate this yield variability. In this study it was emphasize chemist, physics, water and topography properties. Topographic and soil textural fractions, were particularly important in determining the relation with factors and yield (and yield components). The elevation was the variable with more relation with yield and yield components, and slope had a very important association too. In respect to textural properties and yield, sand 20 and 40 cm had a correlation medium and negative, loam 40 and 60 strong and positive, and clay B/A strong and negative. PH was the only chemist property that had an association with yield. Measure of water content wasn't significative, but methods and moments wasn't the most adequate. In consideration with yield components, the most relevant explaining yield was kernels/m^2. Population (pl/m^2) was the component with greatest CV=15%, and with no correlation

with yield. In respect to population, it is important to determine why is so big the variation (range from 39 to 70 thousand pl/ha), when the condition of planting were good and the machinery used was modern and accurate.

Key words: Variability, yield, corn, site specific management.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. AUNCHAIN, M.; KLAASSEN, M. 1990. Causas de variabilidad de rendimiento en trigo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 165 p.

2. BRAGACHINI, M.; VON MARTINI, A.; MENDEZ, A.; PACIONI, F.; ALFARO, M. 2002. Siembra de maíz, eficiencia de implantación y su efecto sobre la producción de grano. In: Taller Internacional de Agricultura de Precisión del Cono Sur de América (3er., 2002, Carlos Paz, Córdoba). Trabajos presentados. s.l., PROCISUR. s.p.

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

4. COLVIN, T.S.; JAYNES, D.B.; KARLEN, D.L.; LAIRD, D.A.; AMBUEL, J.R. 1997. Yield variability within a central Iowa field. Transactions of the ASEAE. 40(4): 883-889.

5. FERNANDEZ, C.J. 1979. Estimaciones de densidad aparente, retención de agua disponible en el suelo a partir de la composición granulométrica porcentaje de M.O. In: Reunión de la Facultad de Agronomía (2a., Montevideo, 1979). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 1-17.

6. GARCÍA FERNANDO, O. 2002. Beneficios potenciales del uso de las herramientas de agricultura de precisión en el diagnóstico y aplicación de fertilizantes. In: Taller Internacional de Agricultura de Precisión del Cono Sur de América (3er., 2002, Carlos Paz, Córdoba). Trabajos presentados. s.l., PROCISUR. s.p.

7. JIANG, P.;THELEN, K. D. 2004. Effect of soil and topographic properties on crop yield in a north- central corn-soybean cropping system. Agronomy Journal. 96: 252-258.

8. KASPAR, T.C.; PULIDO, D.J.; FENTON, T.E.; COLVIN, T.S.; KARLEN, D.L.; JAYNES, D.B.; MEEK, D. W. 2004. Relationship of corn and soybean yield to soil and terrain

properties. Agronomy Journal. 96: 700-709.

9. KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D.G.; CHARLES, W.B. 2000. Spatial variability, joint multifractal analysis of crop yield and terrain slope. Agronomy Journal. 92: 1279-1290.

10. _____.; THELEN, K.D.; BULLOCK, D.G.; MILLER, N.R. 2003. Relationship among crop grain yield, topography, and soil electrical conductivity studied with cross- correlograms. Agronomy Jounal. 95: 395-402.

11. MALLARINO, A.P.; OYARZABAL, E.S.; HINZ, P.N. 1999. Interpreting within-field relationships between crop yields and soil and plant variables using factor analysis. Precision Agriculture. 1(1):15-25.

12. MOORE, I.D.; GESSLER, P.E.; NIELSEN, G.A.; PETERSON, G.A. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. Soil Science Society of American Journal. 57: 443-452.

13. ORTEGA, R.; FLORES, L. 2000. Agricultura de precisión; introducción al manejo sitio –específico. (en línea). Quilampu, Argentina, s.e. Consultado ene. 2005. Disponible en http://www.ppi-ppic.org/ppiweb/iaarg.nsf.

14. ROEL, A.; TERRA, J. 2006. Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento. In: Bongiovanni, R.; Montovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR. s.p.

15. SADLER, E.J.; BAUER, P.J.; BUSSCHER, W.J. 2000. Site-specific analysis of a droughted corn crop; I. growth and grain yield. Agronomy Journal. 92: 395-402.

16. SAWCHIK, J. 2003. Efficacy of multivariate analysis and zone soil sampling to study relationships between site variables affecting crop yield and yield response to phosphorus and potassium fertilization. Tesis de PhD. Ames, Estados Unidos. Iowa State University. 171 p.

17. SHAHANDEH, H.; WRIGHT, A. L.; HONS, F. M. 2005. Spatial and temporal variation of soil nitrogen parameters related to soil texture and corn yield. Agronomy Journal. 97: 772-782.

18. SILVA, A; PONCE DE LEON, J.; GARCÍA, F.; DURAN, A. 1988. Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía.

Boletín de Investigación no. 10. 20 p.

19. TERRA, J.; SHAW, J.N.; REVEES, D.W.; RAPER, L.R.; VAN SANTEN, E.; SCHWAB, E.B.; MASK, P.L. 2004. Soil carbon relationships with terrain attributes, electrical conductivity and a soil survey in a coastal plain landscape. Soil Science Society of American Journal. 69: 819-831.

20. _____.; _____.; _____.; _____.; _____.; _____.; _____. 2006. Soil management and landscape variability affects field-scale cotton productivity. Soil Science Society of American Journal. 70: 98-107.

21. THOMSON, J.A,; BELL, J.C.; BUTLER, C.A. 1997. Quantitative soil landscape modeling for estimating the areal extent of hydromorphic. Soil Science Society of American Journal. 61: 971-980.

9. ANEXOS

GRILLA DE MUESTREO

NUMERACIÓN

1	2	3	4	5			
6	7	8	9	10	11		
12	13	14	15	16	17		
18	19	20	21	22	23	24	
25	26	27	28	29	30	31	
32	33	34	35	36	37	38	39
40	41	42	43	44	45	46	47

ANALISIS QUIMICO DE PH Y % RESPECTO A LA MEDIA

V4 PH

5	6	5	5	5			
5	6	6	6	6	5		
6	6	6	6	6	6		
6	6	6	6	6	5	5	
6	6	7	7	7	6	6	
7	6	7	7	6	6	6	6
6	7	7	7	7	7	6	7

MEDIA	**6,1**
CV	**10**

% CON RESPECTO A LA MEDIA

88	92	90	90	90			
89	99	91	92	91	90		
93	92	92	**101**	94	91		
92	98	105	97	95	90	91	
96	**100**	**115**	**117**	**117**	96	93	
114	**103**	**108**	**107**	**103**	99	**102**	95
104	**117**	**122**	**122**	**114**	**112**	97	**114**

ANALISIS QUIMICO DE CORG 0-20 Y % RESPECTO A LA MEDIA

V4 C org %

3,3	3,4	3,4	3,4	3,7			
3,0	3,2	3,3	3,3	3,5	3,7		
3,4	3,8	3,3	3,4	3,0	3,5		
3,8	3,3	3,0	3,4	3,3	3,9	4,1	
3,2	3,3	2,9	3,0	2,8	3,5	3,9	
2,9	2,9	3,4	2,9	3,5	3,4	3,5	3,7
2,8	3,1	2,9	3,0	3,1	2,9	2,9	3,1

MEDIA	**3,3**
CV	**10**

CORG 0-20 V4

100	**103**	**104**	**104**	**113**			
92	96	**100**	**101**	**107**	**111**		
103	**117**	**100**	**102**	93	**107**		
115	99	91	**102**	**101**	**119**	**124**	
98	99	89	92	84	**105**	**118**	
89	88	**103**	87	**106**	**103**	**107**	**112**
84	94	89	91	93	87	88	94

ANALISIS QUIMICO DE N-NO3 Y % RESPECTO A LA MEDIA

N-NO_3 µg N/g **V4**

21	16	14	17	16			
17	20	17	16	17	19		
19	18	17	18	18	19		
17	15	17	15	16	16	17	
18	17	16	17	16	17	15	
17	17	19	22	16	15	18	15
16	21	18	16	14	14	15	20

MEDIA	**17**
CV	**10**

V4% CON RESPECTO A LA MEDIA

124	92	81	**102**	95			
98	**117**	**100**	96	**101**	**108**		
110	**104**	**101**	**106**	**107**	**112**		
98	89	**101**	90	94	91	98	
103	99	96	**101**	96	99	87	
98	**101**	**109**	**127**	95	88	**107**	89
94	**120**	**107**	95	84	81	88	**117**

ANALISIS QUIMICO DE P-BRAY Y % RESPECTO A LA MEDIA

Bray I µg P/g **V4**

13	8	11	11	10			
10	10	10	11	10	12		
10	14	10	12	13	9		
11	10	11	12	9	9	10	
11	13	12	12	11	14	14	
10	11	8	15	11	10	16	12
10	11	8	11	12	12	13	10

MEDIA	**11**
CV	**16**

V4% CON RESPECTO A LA MEDIA

115	72	95	99	87			
91	87	89	**103**	89	**111**		
94	**122**	93	**109**	**119**	84		
101	89	96	**105**	80	78	93	
96	**119**	**109**	**109**	96	**127**	**123**	
93	97	76	**137**	**100**	92	**140**	**111**
87	**100**	68	99	**108**	**109**	**113**	86

ANALISIS QUIMICO DE PMN Y % RESPECTO A LA MEDIA

PMN mg/Kg **V4**

24	30	53	39	57			
43	112	45	116	114	52		
51	114	40	69	67	60		
108	103	81	81	185	185	112	
55	82	88	52	86	206	74	
146	78	76	67	171	74	171	77
164	62	45	82	86	80	41	52

MEDIA	**86**
CV	**52**

V4% CON RESPECTO A LA MEDIA

28	35	61	45	66			
50	**130**	52	**134**	**132**	60		
59	**132**	46	80	78	70		
125	**119**	94	94	**214**	**214**	**130**	
64	95	**102**	60	**100**	**239**	86	
169	90	88	78	**198**	86	**198**	89
190	72	52	95	**100**	93	48	60

ANALISIS QUIMICO DE CORG, EN DISTINTAS PROFUNIDADES

C org % **V4**

3,27	**3,38**	**3,43**	**3,41**	**3,73**			
3,02	3,15	3,27	**3,31**	**3,52**	**3,66**		
3,38	**3,84**	**3,29**	**3,36**	3,04	**3,52**		
3,77	3,25	2,99	**3,36**	**3,31**	**3,90**	**4,06**	
3,23	3,25	2,91	3,02	2,77	**3,46**	**3,88**	
2,91	2,88	**3,37**	2,86	**3,48**	**3,39**	**3,53**	**3,67**
2,77	3,09	2,91	2,98	3,05	2,86	2,88	3,09

MEDIA	**3,3**
CV	**10**

% CON RESPECTO A LA MEDIA

100	**103**	**104**	**104**	**113**			
92	96	**100**	**101**	**107**	**111**		
103	**117**	**100**	**102**	93	**107**		
115	99	91	**102**	**101**	**119**	**124**	
98	99	89	92	84	**105**	**118**	
89	88	**103**	87	**106**	**103**	**107**	**112**
84	94	89	91	93	87	88	94

Corg 0-20 R5

3,38	**3,60**	**3,44**	**3,69**	**3,80**			
3,64	**3,38**	3,02	**3,58**	**3,69**	**3,64**		
3,56	**3,67**	2,86	**3,56**	2,98	**3,76**		
3,73	**3,40**	3,10	3,28	**3,74**	**3,94**	**3,71**	
3,58	2,99	2,60	3,10	3,12	**3,65**	**3,78**	
2,85	3,03	3,31	2,73	**3,38**	**3,51**	3,29	**3,62**
3,00	3,00	3,22	3,00	2,64	2,93	**3,56**	2,82

MEDIA	**3,34**
CV	**11**

% CON RESPECTO A LA MEDIA

101	**108**	**103**	**111**	**114**			
109	**101**	91	**107**	**111**	**109**		
107	**110**	86	**107**	89	**113**		
112	**102**	93	98	**112**	**118**	**111**	
107	90	78	93	93	**109**	**113**	
85	91	99	82	**101**	**105**	99	**108**
90	90	96	90	79	88	**107**	84

Corg 20-40 R5

2,42	**2,47**	**2,49**	**2,49**	**3,11**			
2,82	1,69	**2,29**	2,18	**2,40**	**2,38**		
2,24	**2,51**	**2,34**	**2,56**	2,16	**2,71**		
2,71	2,13	2,04	**2,47**	**2,97**	**2,94**	**2,99**	
2,20	**2,81**	0,99	**2,54**	**2,69**	1,90	**2,74**	
1,63	1,56	2,02	1,73	1,91	2,02	2,24	**2,49**
2,58	2,18	2,00	2,11	1,49	1,51	**2,67**	1,42

MEDIA	**2,28**
CV	**20**

% CON RESPECTO A LA MEDIA

106	**108**	**109**	**109**	**137**			
124	74	**101**	96	**105**	**105**		
98	**110**	**103**	**113**	95	**119**		
119	94	90	**109**	**131**	**129**	**131**	
97	**124**	44	**112**	**118**	84	**120**	
72	69	89	76	84	89	98	**109**
113	96	88	93	65	66	**117**	62

C org 40-60 R5

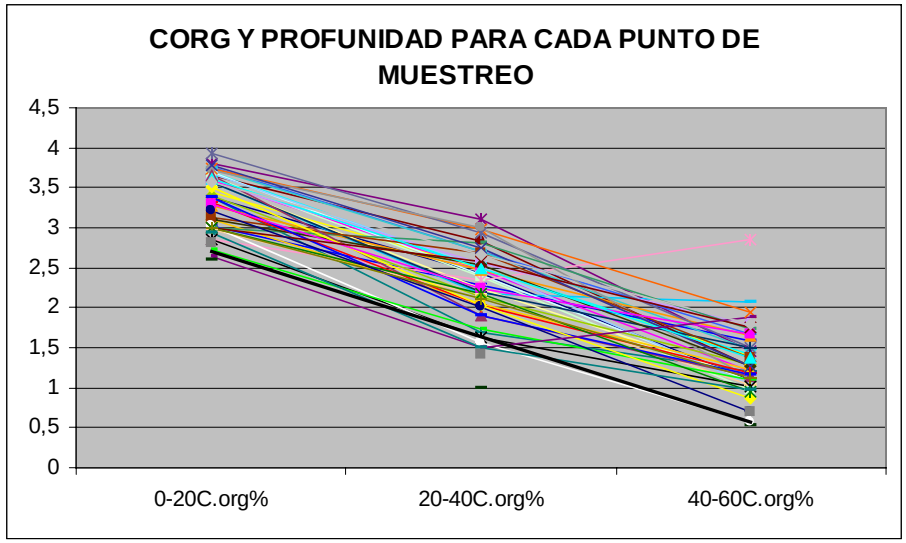
1,09	1,20	**1,40**	**1,42**	**1,47**			
1,27	1,20	**1,58**	**2,07**	1,07	0,98		
1,13	1,04	**2,85**	**1,80**	1,04	**1,67**		
1,47	1,29	1,22	**1,65**	**1,95**	**1,49**	1,13	
1,49	**1,74**	0,52	1,27	**1,38**	1,15	1,27	
1,02	0,57	1,18	1,09	1,16	0,87	**1,67**	**1,38**
1,76	0,96	0,69	1,13	**1,89**	0,98	**1,80**	0,69

MEDIA	**1,32**
CV	**32**

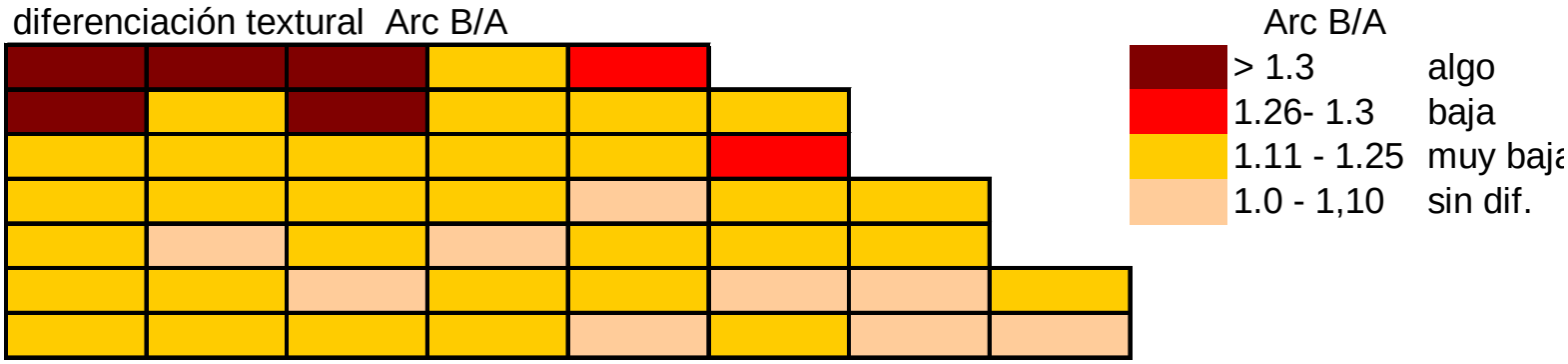
% CON RESPECTO A LA MEDIA

82	91	**106**	**108**	**111**			
96	91	**120**	**157**	81	74		
85	79	**216**	**136**	79	**126**		
111	98	92	**125**	**148**	**113**	85	
113	**132**	39	96	**104**	87	96	
77	43	89	82	88	66	**126**	**104**
133	73	52	85	**143**	74	**136**	52

CORG% Y PROFUNIDAD

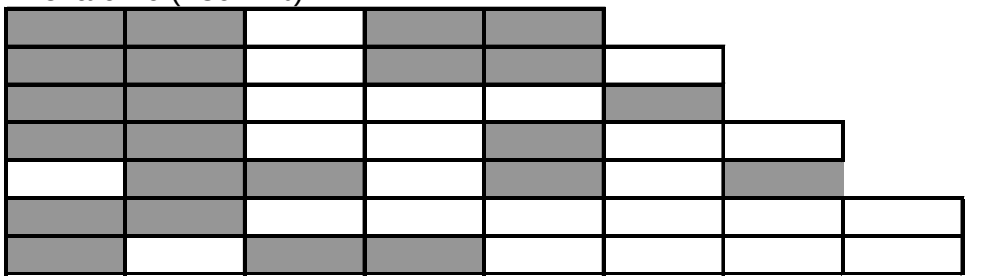


ANALISIS DE TEXTURA, ARCILLA B/A



ARENA 0-20, MAYOR A 30,4%

Arena 0-20 (>30.4 %)



PROFUNDIDAD ESTIMADA DEL ESTRATO QUE SE ENCONTRARIA EL HORIZONTE BT

profundidad del BT

3	**3**	**3**	**3**	**3**			
3	**3**	**3**	2	**3**	**3**		
2	**3**	2	2	2	**3**		
2	2	2	**3**	**3**	**3**	2	
3	2	2	2	**3**	2	2	
2	**3**	2	**3**	**3**	2	2	**3**
2	**3**	**3**	**3**	2	2	2	2

ESTIMACION DEL POSIBLE MATERIAL GENERADOR

Mat. Gen posible

Sed/Cret.	Sed/Cret.	**Sed LAc**	Sed/Cret.	Sed/Cret.			
Sed/Cret.	Sed/Cret.	**Sed LAc**	Sed/Cret.	Sed/Cret.	**Sed LAc**		
Sed/Cret.	Sed/Cret.	**Sed LAc**	**Sed LAc**	**Sed LAc**	Sed/Cret.		
Sed/Cret.	Sed/Cret.	**Sed LAc**	**Sed LAc**	Sed/Cret.	**Sed LAc**	**Sed LAc**	
Sed LAc	Sed/Cret.	Sed/Cret.	**Sed LAc**	Sed/Cret.	**Sed LAc**	Sed/Cret.	
Sed/Cret.	Sed/Cret.	**Sed LAc**	**Sed LAc**	**Sed LAc**	**Sed LAc**	**Sed LAc**	**Sed LAc**
Sed/Cret.	**Sed LAc**	Sed/Cret.	Sed/Cret.	**Sed LAc**	**Sed LAc**	**Sed LAc**	**Sed LAc**

CAPACIDAD DE ALMACENAJE DEL PERFIL Y % RESPECTO A LA MEDIA

CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA

94	94	93	98	101			
95	83	94	100	91	93		
86	92	108	100	84	107		
98	93	83	99	111	102	100	
93	100	70	96	97	87	99	
80	80	91	83	90	87	94	95
103	88	88	92	87	80	104	79

MEDIA	**93**
CV	**9**

% CON RESPECTO A LA MEDIA

102	**101**	**101**	**105**	**109**			
102	90	**101**	**108**	98	**100**		
92	99	**116**	**108**	90	**116**		
106	**100**	90	**107**	**120**	**110**	**108**	
101	**108**	76	**103**	**104**	94	**107**	
86	86	98	89	97	94	**101**	**103**
111	95	95	**100**	94	86	**112**	85

MEDICION DEL AGUA TOTAL (POR GRAVIMETRÍA) EN LOS 40-60 CM

AD 40-60

19	20	21	**22**	**22**			
18	19	**23**	**29**	18	19		
18	19	**37**	**27**	19	**24**		
23	**24**	19	**26**	**30**	**23**	21	
22	**27**	15	**23**	**23**	20	**22**	
19	16	**22**	20	21	19	**25**	**23**
30	19	17	**23**	**28**	19	**28**	18

MEDIA	**22**
DESV	**4**

ELEVACIÓN DEL TERRENO EN BASE AL PUNTO MÁS BAJO DE LA CHACRA

ELEVACIÓN REAL MEDIDA CON TEODOLITO

0	2	3	5	5			
1	4	5	6	**7**	6		
3	5	6	**7**	**8**	**7**		
4	6	**7**	**8**	**9**	**8**	**8**	
5	**7**	**8**	**9**	**10**	**9**	**9**	
10	**8**	**9**	**10**	**11**	**10**	**10**	**10**
9	**9**	**10**	**11**	**11**	**11**	**11**	**11**

7

ALTURA DE PLANTA EN R5

ALTURA (m) R5

1,97	2,07	1,92	2,05	2,20			
1,85	2,04	1,96	2,11	2,09	2,17		
1,97	1,95	2,08	2,07	2,19	2,19		
2,01	2,07	2,14	2,16	2,13	2,25	2,18	
1,93	1,91	2,12	2,10	2,10	2,15	2,25	
1,94	1,92	2,14	2,13	2,18	2,12	2,15	2,13
1,94	2,00	2,00	2,03	2,13	2,11	2,15	2,09

MEDIA	**2,07**
CV	**5**

% CON RESPECTO A LA MEDIA

95	**100**	93	99	**106**			
89	98	94	**102**	**101**	**104**		
95	94	**100**	**100**	**105**	**105**		
97	**100**	**103**	**104**	**103**	**109**	**105**	
93	92	**102**	**101**	**101**	**103**	**108**	
93	93	**103**	**103**	**105**	**102**	**103**	**103**
94	97	96	98	**103**	**102**	**104**	**101**

RENDIMIENTO DE LOS PUNTOS A Y B

PROMEDIO DE LOS PUNTOS A

4806	3255	5243	**6011**	**6620**	4347		
4580	5394	5125	**5826**	5644	4217		
5287	5362	**6899**	**5987**	**6145**	**6060**	**6585**	
4638	5376	**5697**	**6478**	**6996**	**5949**	**6293**	5332
4980	**5723**	**6581**	**5977**	**5877**	**6077**	**6561**	**6139**

MEDIA	**5659**
CV	**15**

PROMEDIO DE LOS PUNTOS A

85	58	93	**106**	**117**	77		
81	95	91	**103**	**100**	75		
93	95	**122**	**106**	**109**	**107**	**116**	
82	95	**101**	**114**	**124**	**105**	**111**	94
88	**101**	**116**	**106**	**104**	**107**	**116**	**108**

PROMEDIO DE LOS PUNTOS B

4894	4209	5517	4819	5401	4336		
4842	5577	5124	5338	5222			
5574	**5962**	**7340**	**6376**	**7170**	**7186**	5720	
6156	**5837**	**6737**	**6116**	**6418**	**6362**	5366	**5970**
5697	5485	5369	5773	5441	**6674**	5419	**6985**

MEDIA	**5777**
CV	**13**

PROMEDIO DE LOS PUNTOS B

85	73	96	83	93	75		
84	97	89	92	90			
96	**103**	**127**	**110**	**124**	**124**	99	
107	**101**	**117**	**106**	**111**	**110**	93	**103**
99	95	93	**100**	94	**116**	94	**121**

POBLACIÓN A COSECHA

66000	72000	57000	69000	67000	39000		
64000	61000	67000	63000	51000	51000		
72000	70000	58000	65000	56000	53000	69000	
69000	67000	56000	64000	54000	51000	46000	42000
53000	64000	69000	59000	54000	43000	52000	57000

MEDIA	**59143**
CV	**15**

112	**122**	96	**117**	**113**	66		
108	**103**	**113**	**107**	86	86		
122	**118**	98	**110**	95	90	**117**	
117	**113**	95	**108**	91	86	78	71
90	**108**	**117**	**100**	91	73	88	96

Descripición de la métodología utilizada en SAS (inst. 2000)

```
  title;
      footnote;
*** Descriptive Statistics ***;
PROC MEANS data=_PROJ_.FINAL3 MEAN STD MIN MAX CV SKEWNESS KURTOSIS;
   var PH NNO3 PMN P CORGV4
       CORG_20 ARENA20 LIMO20 ARC20 DAP_20 AD_20
       CORG_40 ARENA_40 LIMO_40 ARC_40  DAP_40 AD_40
       CORG_60 ARENA_60 LIMO_60 ARC_60  DAP_60 AD_60
       AD_TOT ARCBA PROFBT
       ELEVA SLOPE STRPOW SL_LE CTI
       AGUA_20 AGUA_40 AGUA_60 AGUA_TOT
       ALT_R1 POBV4
       Plxm2 EspFerPl Espxm2 GranxEsp Granxm2 PesoMilG YIELD;
      attrib _all_ label='';
run;
*** Correlations r ***;
PROC CORR data=_PROJ_.FINAL3 pearson;
   var YIELD Plxm2 EspFerPl Espxm2 GranxEsp Granxm2 PesoMilG
      POBV4 ALT_R1 AGUA_20 AGUA_40 AGUA_60 AGUA_TOT CORGV4 P
      PH NNO3 PMN CORG_20 ARENA20 LIMO20 ARC20 CORG_40 ARENA_40 LIMO_40 ARC_40
      CORG_60 ARENA_60 LIMO_60 ARC_60 DAP_20 DAP_40 DAP_60 AD_20 AD_40 AD_60
      AD_TOT ARCBA PROFBT ELEVA SLOPE STRPOW SL_LE CTI;
run;
*** Linear Regression r2 ***;
*** Regression X-Y ***;
PROC REG data=_PROJ_.FINAL3;
   model YIELD Plxm2 EspFerPl Espxm2 GranxEsp Granxm2 PesoMilG POBV4 ALT_R1 =
      CORGV4 P PH NNO3 PMN
      CORG_20 ARENA20 ARC20 DAP_20 AD_20
      CORG_40 ARENA_40 ARC_40 DAP_40 AD_40
      CORG_60 ARENA_60 ARC_60 DAP_60 AD_60
      AD_TOT ARCBA PROFBT
      ELEVA SLOPE STRPOW SL_LE CTI / selection=stepwise sle=0.1 sls=0.1;
options pageno=1;
*** Regression Y-Yield ***;
PROC REG data=_PROJ_.FINAL3;
   model YIELD =  Plxm2 EspFerPl Espxm2 GranxEsp Granxm2 PesoMilG /
      selection=stepwise sle=0.1 sls=0.1;
```

```
run;
*** Regression Yield-Arbol Componentes***;
run;
*** Principal Components Analysis *** ;
options pageno=1;
PROC PRINCOMP data=_PROJ_.FINAL3;
   var CORGV4 P PH NNO3 PMN
      CORG_20 ARENA20 ARC20 DAP_20 AD_20
      CORG_40 ARENA_40 ARC_40 DAP_40 AD_40
      CORG_60 ARENA_60 ARC_60 DAP_60 AD_60
      AD_TOT ARCBA PROFBT
      ELEVA SLOPE STRPOW SL_LE CTI;
run;
*** FACTOR ANALYSIS ***;
PROC FACTOR data=_PROJ_.FINAL3 METHOD=prin NFACT=5 RES ROTATE=VARIMAX OUT=FAC;
VAR   CORGV4 P PH NNO3 PMN
      CORG_20 ARENA20 ARC20 DAP_20
      CORG_40 ARENA_40 ARC_40 DAP_40
      CORG_60 ARENA_60 ARC_60 DAP_60
      AD_TOT ARCBA PROFBT
      ELEVA SLOPE STRPOW SL_LE CTI;
RUN;
PROC SORT DATA=FAC;
by waypoint;
run;
PROC PRINT DATA = FAC;
VAR waypoint FACTOR1-FACTOR5;
RUN;
PROC REG DATA = FAC;
MODEL YIELD Plxm2 EspFerPl Espxm2 GranxEsp Granxm2 PesoMilG POBV4 ALT_R1 =
      FACTOR1-FACTOR5/Selection= stepwise sle=0.10 sls=0.10;
run;
***Este es otro metodo (ML)***;
/*
PROC FACTOR data=_PROJ_.FINAL3 METHOD=ML HEY NFACT= 5 RES ROTATE=VARIMAX OUT=FAC1;
VAR CORGV4      P      pH      NNO3      PMN
    CORG_20 ARENA20 ARC20
    CORG_40 ARENA_40 ARC_40
    CORG_60 ARENA_60 ARC_60
    DAP_20  DAP_40  DAP_60
    AD_TOT ArcBA ProfBt
    ELEVA SLOPE STRPOW SL_LE CTI
;
TITLE3 'ML METHOD, NFACTOR=5';
PROC SORT DATA=FAC1;
by waypoint;
run;
PROC PRINT DATA = FAC1;
VAR waypoint FACTOR1-FACTOR5;
RUN;
```

```
PROC REG DATA = FAC1 ;
MODEL YIELD= FACTOR1-FACTOR5/Selection= stepwise sle=0.10 sls=0.10;
run;*/

*** CLUSTER ANALYSIS ***;
PROC FASTCLUS DATA =_PROJ_.FINAL3  MAXCLUSTERS=5 MAXITER=100 least=2 converge=0.001 distance radius = 0.001 OUT=CLUS_OUT;
VAR PMN CORG_20 AD_TOT ELEVA SLOPE STRPOW SL_LE CTI;
RUN;
PROC PRINT DATA = CLUS_OUT ;
VAR waypoint Cluster YIELD;
RUN;
PROC MIXED DATA = CLUS_OUT;
class cluster;
MODEL Yield = cluster;
LSmeans cluster/pdiff;
run;
PROC MIXED DATA = CLUS_OUT;
class cluster;
MODEL Plxm2  = cluster;
LSmeans cluster/pdiff;
run;
PROC MIXED DATA = CLUS_OUT;
class cluster;
MODEL EspFerPl  = cluster;
LSmeans cluster/pdiff;
run;
PROC MIXED DATA = CLUS_OUT;
class cluster;
MODEL Espxm2  = cluster;
LSmeans cluster/pdiff;
run;
PROC MIXED DATA = CLUS_OUT;
class cluster;
MODEL GranxEsp = cluster;
LSmeans cluster/pdiff;
run;
PROC MIXED DATA = CLUS_OUT;
class cluster;
MODEL Granxm2 = cluster;
LSmeans cluster/pdiff;
run;
PROC MIXED DATA = CLUS_OUT;
class cluster;
MODEL PesoMilG = cluster;
LSmeans cluster/pdiff;
run;
```

STEPWISE SELECTION, REGRESIONES LINEALES.

Dependent Variable: YIELD/ YIELD = 4023 + 210(ELEVA)

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	4023.20893	357.99795	49763243	126.29	<.0001
ELEVA	210.62949	43.16819	9380698	23.81	<.0001

All variables left in the model are significant at the 0.1000 level.

No other variable met the 0.1000 significance level for entry into the model.

Summary of Stepwise Selection

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	ELEVA		ELEVA	1	0.4266	0.4266	2.0484	23.81	<.0001

Dependent Variable: Plxm2 Plxm2= 5,27* + 1,2(Slope) + 0,46(PH) – 0,09 (ARC_40)

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	5.27125	3.40975	1.15235	2.39	0.1326
pH	0.46458	0.24048	1.79956	3.73	0.0629
ARC_40	-0.09199	0.05312	1.44631	3.00	0.0936
Slope	1.20813	0.25384	10.92250	22.65	<.0001

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F	
1	Slope		Slope	1	0.2745	0.2745	47.0572	12.10	0.0015	
2	pH		pH	2	0.1215	0.3960	36.1504	6.24	0.0180	
3	ARC_40		ARC_40	3	0.0549	0.4509	32.3193	3.00	0.0936	*no

*no significativo

Dependent Variable: EspFerPl EspFerPl= 0,14* +0,027(ELEVA) –0,025(NNO3) +0,023(ARC_60) –0,09(CORGV4) +0,018(P)

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	0.14302	0.24341	0.00128	0.35	0.5615
CORGV4	-0.08810	0.03822	0.01968	5.31	0.0288
P	0.01792	0.00626	0.03034	8.19	0.0079
NNO3	-0.02569	0.00644	0.05902	15.93	0.0004
ARC_60	0.02288	0.00430	0.10473	28.27	<.0001
ELEVA	0.02666	0.00497	0.10657	28.77	<.0001

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	ELEVA		ELEVA	1	0.3265	0.3265	133.122	15.52	0.0004
2	ARC_40		ARC_40	2	0.2090	0.5355	84.5031	13.95	0.0008
3	NNO3		NNO3	3	0.0740	0.6095	68.5803	5.68	0.0236
4	ARC_60		ARC_60	4	0.0829	0.6924	50.5052	7.81	0.0091
5	CORGV4		CORGV4	5	0.0404	0.7328	42.7267	4.23	0.0491
6	P		P	6	0.0389	0.7717	35.3031	4.60	0.0411
7		ARC_40	ARC_40	5	0.0167	0.7550	37.3383	1.97	0.1718

*no significativo

Dependent Variable: Espxm2 Espxm2 = 0,84* + 0,578(Slope) + 0,60(PH)

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	0.84144	1.45817	0.11754	0.33	0.5681
pH	0.60227	0.19611	3.32910	9.43	0.0044
Slope	0.57849	0.21666	2.51638	7.13	0.0120

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	AD_20		AD_20	1	0.1000	0.1000	72.5812	3.56	0.0684
2	Slope		Slope	2	0.0883	0.1883	64.5195	3.37	0.0759
3	pH		pH	3	0.0921	0.2804	56.0260	3.84	0.0595
4		AD_20	AD_20	2	0.0206	0.2598	56.3726	0.86	0.3616

*no significativo

Dependent Variable: GranxEsp **GranxEsp = 80,4* +11,4(ELEVA) +50,1(CORGV4) +6,11(AD_40) −3,44(ARENA_40)**

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	80.40112	112.30615	425.70579	0.51	0.4798
CORGV4	50.09598	17.81000	6571.58998	7.91	0.0087
ARENA_40	-3.44512	1.56573	4021.31707	4.84	0.0359
AD_40	6.11319	2.67276	4345.19195	5.23	0.0297
ELEVA	11.45527	2.10934	24497	29.49	<.0001

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	ELEVA		ELEVA	1	0.3218	0.3218	6.2717	15.19	0.0005
2	CORGV4		CORGV4	2	0.1898	0.5116	-1.8784	12.05	0.0015
3	AD_40		AD_40	3	0.0490	0.5606	-2.5003	3.35	0.0773
4	ARENA_40		ARENA_40	4	0.0629	0.6235	-3.8622	4.84	0.0359

Dependent Variable: Granxm2 **Granxm2 = 3053 + 45,5(ELEVA) − 29,0(ARENA_40)**

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	3052.66421	515.17736	3355350	35.11	<.0001
ARENA_40	-29.05238	16.49961	296285	3.10	0.0881
ELEVA	45.48397	21.75195	417843	4.37	0.0448

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	ELEVA		ELEVA	1	0.1571	0.1571	62.9135	5.96	0.0203
2	ARENA_40		ARENA_40	2	0.0766	0.2337	56.4659	3.10	0.0881

Dependent Variable: PesoMilG **PesoMilG = 187,5 + 3,76(ELEVA)**

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	187.53268	6.54364	108123	821.32	<.0001
ELEVA	3.75505	0.78905	2981.45214	22.65	<.0001

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F

1	ELEVA	ELEVA	1	0.4144	0.4144	-7.5142	22.65	<.0001

Dependent Variable: ALT_R1 **ALT_R1 = 0,357* + 0,029(ELEVA) + 0,017(ARC) + 0,017(AD_20)**

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	0.35736	0.35202	0.00445	1.03	0.3181
AD_20	0.01665	0.00521	0.04416	10.23	0.0032
ARC_40	0.01728	0.00480	0.05595	12.96	0.0011
ELEVA	0.02952	0.00500	0.15072	34.92	<.0001

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	ELEVA		ELEVA	1	0.2936	0.2936	54.3150	13.30	0.0009
2	CORGV4		CORGV4	2	0.1809	0.4745	34.7251	10.67	0.0027
3	ARC_40		ARC_40	3	0.0589	0.5333	29.6963	3.79	0.0611
4	AD_20		AD_20	4	0.0477	0.5810	26.0035	3.30	0.0796
5		CORGV4	CORGV4	3	0.0077	0.5733	24.9271	0.54	0.4701

*no significativo

Dependent Variable: YIELD **YIELD = -5398 + 2,19(Granxm2) + 26,5(PesoMilG) – 0,883(GranxEsp)**

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	-5397.69476	147.93906	3631607	1331.22	<.0001
GranxEsp	-0.88310	0.24991	34063	12.49	0.0013
Granxm2	2.19163	0.03027	14298765	5241.44	<.0001
PesoMilG	26.48704	0.67419	4210684	1543.49	<.0001

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	Granxm2		Granxm2	1	0.7834	0.7834	1657.75	119.35	<.0001
2	PesoMilG		PesoMilG	2	0.2115	0.9949	11.1032	1315.52	<.0001
3	GranxEsp		GranxEsp	3	0.0015	0.9963	1.5882	12.49	0.0013

PC y FA

Dependent Variable: YIELD **YIELD = 5609 -414,8(Factor5) -226,3(Factor2)**

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	5609.84428	122.23901	1036633006	2106.11	<.0001
Factor2	-226.32127	131.33081	1461708	2.97	0.0948
Factor5	-414.80014	120.59425	5823280	11.83	0.0017

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	Factor5			1	0.2396	0.2396	4.0322	10.09	0.0033
2	Factor2			2	0.0665	0.3061	3.0570	2.97	0.0948

Dependent Variable: Plxm2 **Plxm2 = 5,94 +0,402(Factor5)**

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	5.94517	0.13971	1175.95404	1810.74	<.0001
Factor5	0.40295	0.13771	5.56077	8.56	0.0063

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	Factor5			1	0.2111	0.2111	0.6212	8.56	0.0063

Dependent Variable: EspFerPl **EspFerPl = 0,951 -0,058(Factor5) -0,0474(Factor4) -0,0240(Factor3)**

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	0.95123	0.01477	29.69044	4147.38	<.0001
Factor3	-0.02400	0.01317	0.02379	3.32	0.0783
Factor4	-0.04737	0.01467	0.07460	10.42	0.0030
Factor5	-0.05843	0.01446	0.11687	16.32	0.0003

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	Factor5			1	0.2662	0.2662	13.6536	11.61	0.0018
2	Factor4			2	0.1703	0.4365	5.5208	9.37	0.0045
3	Factor3			3	0.0562	0.4927	4.1779	3.32	0.0783

Dependent Variable: Espxm2 Espxm2

No variable met the 0.1000 significance level for entry into the model.

Dependent Variable: GranxEsp **GranxEsp = 469,9 -21,9(Factor5)**

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	469.93451	6.67729	7347446	4953.07	<.0001
Factor5	-21.95424	6.58137	16507	11.13	0.0022

Summary of Stepwise Selection

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	Factor5			1	0.2580	0.2580	2.5235	11.13	0.0022

Dependent Variable: Granxm2 **Granxm2 = 2609 -101,3(Factor5)**

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	2609.12208	57.45666	226490786	2062.09	<.0001
Factor5	-101.27468	56.63128	351262	3.20	0.0832

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	Factor5			1	0.0909	0.0909	1.4000	3.20	0.0832

Dependent Variable: PesoMilG **PesoMilG = 216,1 -7,666(Factor5)**

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	216.09322	2.20606	1553617	9595.03	<.0001
Factor5	-7.66605	2.17437	2012.66992	12.43	0.0013

Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	Factor5			1	0.2798	0.2798	1.7385	12.43	0.0013

Dependent Variable: ALT_R1 **ALT_R1 = 2,064 –0,0478(Factor5)**

Variable	Parameter Estimate	Standard Error	Type II SS	F Value	Pr > F
Intercept	2.06373	0.01454	141.69915	20139.5	<.0001
Factor5	-0.04781	0.01433	0.07828	11.13	0.0022

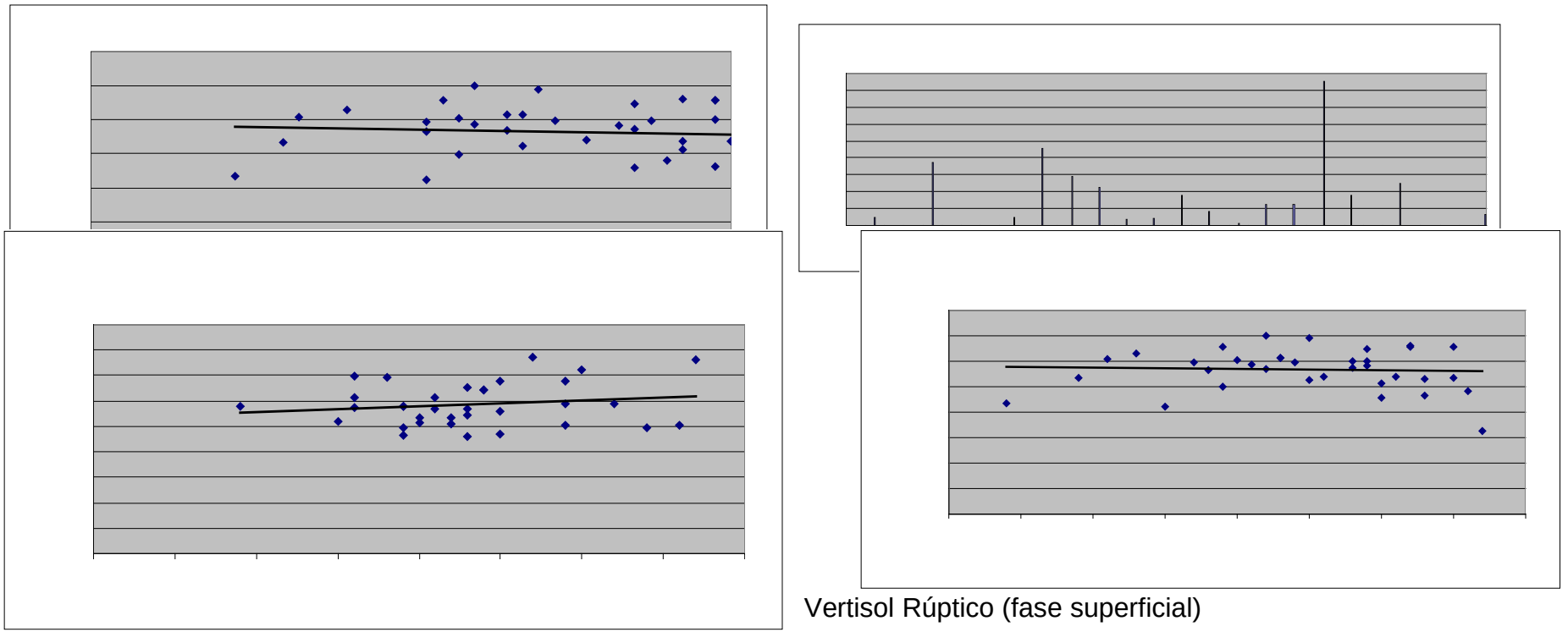
Step	Variable Entered	Variable Removed	Label	Number Vars In	Partial R2	Model R2	C(p)	F Value	Pr > F
1	Factor5			1	0.2580	0.2580	4.1933	11.13	0.0022

Ver que se ajusta la ecuaciones de FA o las de las varialbles originales!!!
Hacer arbol con los factore (y se correlacionan
*no significativo con (P< 0,1)

Variables asociada a los Componentes principales

		Prin1	Prin2	Prin3	Prin4	Prin5	Prin6	Prin7
CORGV4	CORGV4	0.206484	0.037290	0.297228	0.172832	0.089314	0.083024	-.002790
P	P	-.085313	-.024229	0.191816	-.118363	0.165395	0.278989	0.439273
pH	pH	-.266742	-.105140	-.176301	0.052938	0.122556	-.141711	0.027542
NNO3	NNO3	-.042229	0.161093	-.110062	-.059130	-.018642	-.037444	0.706458
PMN	PMN	0.000758	-.162277	0.171134	0.237193	-.077291	0.120111	-.146684
CORG_20	CORG_20	0.276837	0.049913	0.151375	0.269058	0.063589	0.068708	-.067726
ARENA20	ARENA20	0.152630	0.011330	-.383114	0.149629	-.196648	0.207995	-.026183
ARC20	ARC20	-.196047	-.017331	0.336603	0.061293	0.048471	0.182226	0.145571
DAP_20	DAP_20	-.261298	-.051921	-.220133	-.246665	-.099246	-.035012	0.083890
AD_20	AD_20	0.303035	0.047504	0.062621	0.181208	0.071845	-.080520	-.092659
CORG_40	CORG_40	0.298883	-.106461	0.043729	0.032618	0.110008	-.082756	0.199717
ARENA_40	ARENA_40	0.120605	-.016825	-.366185	0.190156	-.011633	0.256385	-.005544
ARC_40	ARC_40	-.096222	0.172350	0.400289	-.058599	-.238853	0.162279	-.099525
DAP_40	DAP_40	-.283718	0.112844	-.084303	-.005949	-.123607	0.120736	-.199953
AD_40	AD_40	0.291797	-.117136	0.036092	0.013853	0.125997	-.153077	0.232701
CORG_60	CORG_60	0.158138	-.276719	0.064896	-.325025	-.168955	0.017614	-.016337
ARENA_60	ARENA_60	0.122270	-.129766	-.218106	0.190778	0.094073	0.460903	0.102218
ARC_60	ARC_60	0.021967	0.345884	0.232737	0.013961	-.149820	-.126643	0.094429
DAP_60	DAP_60	-.147838	0.268405	-.070566	0.352888	0.173305	0.028338	0.037370
AD_60	AD_60	0.108557	-.353242	0.007287	-.280969	-.098325	-.004219	-.047102
AD_TOT	AD_TOT	0.269225	-.248317	0.038407	-.112987	0.000406	-.078518	0.006664
ArcBA	ArcBA	0.171572	0.289501	-.088769	-.067508	-.174638	-.256932	-.079583
ProfBt	ProfBt	0.109667	0.173884	-.150000	0.100486	0.003571	-.466575	0.070401
ELEVA	ELEVA	-.200259	-.249284	0.110659	0.142496	0.260833	-.166279	-.057919
Slope	Slope	0.136433	0.105738	0.032681	0.035694	-.586403	0.153888	0.144405
StrPow	StrPow	0.135407	0.266478	-.068753	-.325721	0.217251	0.151805	-.091014
Sl_Le	Sl_Le	0.153666	0.269518	-.033444	-.295394	0.114960	0.204598	-.121510

CTI	CTI	0.105856	0.237664	-.019180	-.269074	0.424779	0.133527	-.133399



Vertisol Rúptico (fase superficial)

Gira de Suelos – La Manera (29/12/06)

Punto de la Grilla: 26

(Fotos 1, 2, y 3)

0 – 25 cm AU_1 o A_p - FAcL – Plástico, pegajoso, bloques angulares fuertes.

25 y + C_k - AcL con concreciones de Carbonato de Calcio

Como variante del anterior y dentro de la misma celda encontramos un espesor de AU1 de 45 cm y luego C_k (sigue siendo fase superficial) a mayor profundidad que el anterior. La variabilidad en la celda se refleja por manchones o oleadas de plantas de soja con síntomas de clorosis férrica.

Punto de la Grilla: 27

(Foto 4)

Vertisol Rúptico (fase profunda)

0 – 30 cm	AU1 - AcL
30 – 115 cm	AU2 – Ac
115 y +	C_k Contenido de humedad alto.

De todos modos, se observa variabilidad dentro de la celda. Como ej., a 5-6 metros se encuentra una fase superficial (Foto 5)

Punto de la Grilla: 29 (2º máximo rendimiento)

(Fotos 6 y 7)

Vertisol Rúptico (fase profunda)

0 – 30 cm	AU1 – FacL – AcL (plástico, muy pegajoso)
30 – 75 cm	AU2 - Ac
75 – 110 cm	AU3 – Ac (con inyección o lengua de calcáreo)
110 y +	C_k - FAcL (con concreciones abundantes de $CaCO_3$)

En este caso también a unos 5 metros encontramos la fase superficial con un horizonte A de no + de 25 cm de profundidad. A partir de allí es horizonte C con concreciones de $CaCO_3$ = C_k

Comentario general: Estos puntos están ubicados en la ladera alta y plana, presentan una alta variabilidad en la respuesta del cultivo de soja al tipo de suelo, dentro de cada celda. Sin embargo las variaciones en atributos del terreno como concavidad o convexidad podrían haber determinado diferencias en la captación de las precipitaciones. Son también los puntos que presentan menores pendientes por lo que el escurrimiento superficial tiende a minimizarse con respecto al resto de la chacra.

Punto de la Grilla: 36

(Foto 8)

Brunosol Eútrico típico (vértico)

0 – 25 cm	A_p	FAcL
25 – 120 cm	BA	AcL (corroborar bien con análisis mecánico)
120 y +	BC_k	AcL con concreciones de $CaCO_3$

El BA tiende a tener una coloración grisácea en el metro de la profundidad.

A 4 o 5 metros en la misma celda, Brunosol Vértico con lengüeta de calcáreo en posición cóncava.

Punto de la Grilla: 17

(Foto 9) – Zona de bajo rendimiento

Ubicado en ladera media (menor frecuencia de vertisoles en esta área o posición topográfica)

Brunosol Eútrico Típico (vértico)

0 – 30 cm	A	FAcL (algo de arena)
30 – 84 cm	Bt_1	AcL
84 y +	C_k	

Suelo de menor espesor, ubicado en ladera media en zona de pendiente alta (5 % aprox.) lo que favorece el escurrimiento superficial.

Punto de la Grilla: 2

(Foto 10)

Ladera baja, con alta pendiente (3-4 % aprox.), zona de escurrimiento importante
Menor espesor de suelo, menor capacidad de retención de agua.

Brunosol Eútrico Típico

0 – 25 cm	A	FAcL + arena
25 – 80 cm	Bt	AcL
80 y +	C_k	

Hay claras evidencias de arrastre superficial (arenilla en superficie)

Punto de la Grilla: 7

(Foto 11)

Zona de bajo rendimiento

Brunosol Eutrico Típico con arenilla

0 – 20 cm	A	FAcL + arena
20 – 55 cm	Bt1	AcL
55 – 80 cm	BC_k	FAcL o AcL
80 y +	C_k	

Lugar de alta pendiente.

Punto de la Grilla: 14

(Foto 12)

Ubicación: ladera media

Brunosol Eútrico Típico

0 – 20 cm	A	FAcL
20- 55 cm	Bt1	AcL
55 – 100 cm	Bt2	AcL
100 y +	BC_k	

ID	pH	C.Org	Textura			
	(H_2O)	%	% Arena	% Limo	% Arcilla	Clasificación
2 A	6,4	3,2	36	27	37	francosa
2 Bt	6,9*	1,4	44	11	45	areno arcillosa
7 A	6,0	3,0	42	23	35	areno arcillosa
7 Bt	6,5	2,0	40	19	41	areno arcillosa
7 BCk	6,9*	1,1	38	17	45	areno arcillosa
14 A	5,9	3,2	31	37	32	francosa
14 Bt	6,5	1,5	22	27	51	arcillosa
14 Bt2	7,6*	1,3	22	11	66	arcillosa
17 A	5,9	3,6	37	27	36	francosa
17 Bt1	6,5	1,6	32	23	45	areno arcillosa
26 Ap	7,5*	3,0	36	28	36	francosa
26 Ck	8,1*	0,5	29	16	55	arcillosa
27 Au 1	7,0*	2,1	38	26	36	areno arcillosa

27	Au2	7,4*	1,2	42	24	34	areno arcillosa
29	Au1	7,5*	2,8	32	29	39	francosa
29	Au2	7,5*	3,0	31	28	41	areno arcillosa
29	Au3	8,0*	0,9	35	18	46	arcillosa
36	A	6,4	2,9	37	31	32	francosa
36	BA	6,8*	1,8	36	25	39	francosa