

**EFFECTO DE PROPIEDADES EDÁFICAS SOBRE LA PRODUCTIVIDAD  
DE LOS CULTIVOS DE MAÍZ Y SOJA EN LA PAMPA ARENOSA**

**Ing. Agr. Andrea Verónica Lardone**

Trabajo de Tesis para ser presentado como requisito  
parcial para optar al Título de

**MAGISTER EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA  
EN REGIONES SEMIÁRIDAS**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA**



Universidad Nacional  
de La Pampa



**Santa Rosa, La Pampa, Argentina**

**Mes y año** *(que figuran en el Acta de aprobación del trabajo de Tesis)*



Universidad Nacional  
de La Pampa



**EFFECTO DE PROPIEDADES EDÁFICAS SOBRE LA PRODUCTIVIDAD  
DE LOS CULTIVOS DE MAÍZ Y SOJA EN LA PAMPA ARENOSA**

***Ing. Agr. Andrea Verónica Lardone***

.....  
Dra. Elke Noellemeyer  
**Directora de Tesis**

.....  
Dra. Adriana Gili  
**Co-Directora de Tesis**

**Integrantes de la Comisión de Seguimiento:**

.....  
Dra. Mónica Mazzola

.....  
M. Cs. Elena Bonadeo

.....  
Dr. Daniel Estelrich

Universidad Nacional  
de La Pampa

**EFFECTO DE PROPIEDADES EDÁFICAS SOBRE LA PRODUCTIVIDAD  
DE LOS CULTIVOS DE MAÍZ Y SOJA EN LA PAMPA ARENOSA**

**Ing. Agr. Andrea Verónica Lardone**

**Aprobado por:**

.....  
Dra. Mónica Mazzola

.....  
M. Cs. Elena Bonadeo

.....  
Dr. Daniel Estelrich

## **AGRADECIMIENTOS**

A las directoras de este trabajo de tesis, Dra. Elke Noellemeyer y Dra. Adriana Gili, por su permanente guía durante esta etapa de aprendizaje, y su colaboración para el análisis estadístico de la información.

A la comisión de seguimiento y evaluación, M.Sc. Elena Bonadeo, Dra. Mónica Mazzola, y Dr. Daniel Esterlich, por sus valiosas sugerencias y revisiones.

A mis compañeros de trabajo de la EEA INTA General Villegas, a la Ing. Agr. Marta Pérez por transmitir la importancia de la capacitación y allanar el camino en dicho sentido, a la M.Sc. Mirian Barraco por su constante guía en mi formación profesional, a la Ing. Agr. Cecilia Justo por su apoyo en el análisis de los mapas de rendimiento, a la Lic. Paula Fumagallo por su predisposición y ayuda en la búsqueda bibliográfica y el diseño de figuras, a los Ing. Agr. (M.Sc.) Carlos Scianca e Ing. Agr. Walter Miranda, y a los Sres. Alberto Hellbusch, Pablo Agüero, Matías Aguirre y Agustín Mosca, por su colaboración en las tareas de campo, y al Sr. Miguel Menghini por su colaboración en las tareas de laboratorio.

Al Ing. Agr. Sergio Abascal por su apoyo en la realización de la planialtimetría del terreno de estudio.

A los propietarios del establecimiento “Don Ferdinando”, y su asesor Ing. Agr. Guillermo Abadie, por la disponibilidad y el apoyo en las tareas de campo.

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria por el financiamiento que permitió llevar adelante este trabajo y los cursos de posgrado.

A la Escuela de Posgrado de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de La Pampa, a su personal administrativo y docente.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	I
ÍNDICE GENERAL .....	II
ÍNDICE DE TABLAS.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ABREVIATURAS .....	VIII
RESUMEN.....	X
ABSTRACT .....	XII
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 2: MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
Caracterización de la región de estudio.....	8
Ubicación geográfica .....	8
Relieve .....	8
Clima .....	9
Suelos .....	10
Sistemas de producción.....	12
Experimento .....	12
Ubicación y caracterización del sitio experimental .....	12
Tratamientos.....	13
Metodología.....	13
Diseño experimental .....	20
Análisis de los datos .....	22
Capítulo 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	25
Condiciones climáticas.....	25
Relevamiento planialtimétrico.....	27
Propiedades edáficas.....	28
Granulometría y textura .....	28
Materia orgánica.....	29
Reacción del suelo, salinidad y carbonato de Calcio .....	29
Humedad edáfica.....	30
Relaciones entre las variables evaluadas .....	32
Zonas de manejo delimitadas con monitores de rendimiento .....	35
Cultivos de maíz.....	37
Cultivos de soja.....	47

Efecto de las propiedades edáficas y la altimetría sobre la productividad de los cultivos .....	52
Capítulo 4: CONCLUSIONES .....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Radiación solar global media acumulada ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) durante el período vegetativo y reproductivo de los tratamientos MZ1°FS, MZ2°FS, SJ3810 y SJ4670. ...	26
<b>Tabla 2.</b> Coeficientes de correlación de Pearson y significación entre la suma de arcilla más limo y las propiedades químicas, según la profundidad del suelo (iguales en los pares de variables), de 64 unidades observacionales.....	33
<b>Tabla 3.</b> Coeficientes de correlación de Pearson (triángulo inferior) / Significación (triángulo superior), entre las propiedades químicas evaluadas en la capa superficial (0-20 cm) de 64 unidades observacionales.....	33
<b>Tabla 4.</b> Coeficientes de correlación de Pearson y significación entre las propiedades químicas: pH, CE y $\text{CaCO}_3$ , según la profundidad del suelo de 64 unidades observacionales.....	34
<b>Tabla 5.</b> Coeficientes de correlación de Pearson y significación entre la cota relativa del terreno y las propiedades edáficas: MO, MOP, MOM, IMO, arcilla más limo, pH, CE y $\text{CaCO}_3$ , según la profundidad del suelo de 64 unidades observacionales. ....	35
<b>Tabla 6.</b> Propiedades edáficas según zonas de manejo de alto y bajo potencial de rendimiento.....	37
<b>Tabla 7.</b> Valores medios, máximos, mínimos y CV de las variables TCC ( $\text{g planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) e IAF de los tratamientos MZ1°FS y MZ2°FS, 16 unidades observacionales en cada tratamiento.....	42
<b>Tabla 8.</b> Duración en días de las distintas etapas fenológicas, de 16 unidades observacionales de los tratamientos SJ3810 y SJ4670. ....	47
<b>Tabla 9.</b> TCC ( $\text{kg de materia seca ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) en el período crítico para la determinación del rendimiento, y altura de planta (cm) a los 93 días desde la emergencia (07/02/2012), de 16 unidades observacionales de los tratamientos SJ3810 y SJ 4670. ....	48
<b>Tabla 10.</b> Valores medios de las propiedades edáficas evaluadas según conglomerados de alto, medio y bajo potencial de rendimiento, para el tratamiento MZ1°FS. ....	53
<b>Tabla 11.</b> Coeficientes de regresión y estadísticos obtenidos de modelos de regresión lineal múltiple para la materia seca de la fitomasa aérea evaluada en floración del tratamiento MZ1°FS.....	54
<b>Tabla 12.</b> Valores medios de propiedades edáficas según conglomerados de alto y bajo potencial de rendimiento, para el tratamiento MZ2°FS. ....	56
<b>Tabla 13.</b> Coeficientes de regresión y estadísticos obtenidos de modelos de regresión lineal múltiple para el rendimiento en grano del tratamiento MZ2°FS.....	57
<b>Tabla 14.</b> Valores medios de propiedades edáficas según conglomerados de alto y bajo potencial de rendimiento, para el tratamiento SJ 3810. ....	59

<b>Tabla 15.</b> Coeficientes de regresión y estadísticos obtenidos de modelos de regresión lineal múltiple para la materia seca de la fitomasa aérea en R5 del tratamiento SJ3810. ....	60
<b>Tabla 16.</b> Valores medios de rendimientos y propiedades edáficas según conglomerados de alto y bajo potencial de rendimiento, para el tratamiento SJ4670..	61
<b>Tabla 17.</b> Coeficientes de regresión y estadísticos obtenidos de modelos de regresión lineal múltiple para el rendimiento en grano del tratamiento de cultivos de soja variedad comercial DM 4670. ....	62
<b>Tabla 18.</b> Coeficientes de regresión y estadísticos obtenidos de modelos de regresión lineal múltiple para la fitomasa aérea en R5 del tratamiento de cultivos de soja variedad comercial DM 4670. ....	63



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ecoregiones de la Argentina, subregiones de la región pampeana y localización del sitio de estudio en el territorio. ....	9
<b>Figura 2.</b> Esquema de la ubicación en el espacio de las unidades observacionales del ensayo. ....	21
<b>Figura 3.</b> Precipitaciones (mm) por décadas durante la campaña 2011/12 y medias del período 1974 a 2012. (Fuente: Estación Meteorológica EEA INTA General Villegas). 25	
<b>Figura 4.</b> Temperaturas (°C) máximas y mínimas diarias registradas durante la campaña 2011/12. ....	26
<b>Figura 5.</b> Mapa de alturas relativas (cm) del ensayo experimental. ....	27
<b>Figura 6.</b> Contenido medio de arcilla más limo (%) de 64 unidades observacionales, agrupadas por profundidad. ....	28
<b>Figura 7.</b> Valores medios de las propiedades químicas: pH, CE y CaCO <sub>3</sub> , de 64 unidades observacionales, agrupadas por profundidad. ....	30
<b>Figura 8.</b> Contenido de agua disponible (mm) en el suelo hasta los 200 cm de profundidad, promedio de cada tratamiento, agrupados por momento de evaluación. 32	
<b>Figura 9.</b> Mapa de zonas de manejo de alto y bajo potencial de rendimiento, de un lote del establecimiento “Don Ferdinando” (Elordi, General Villegas, Argentina). ....	36
<b>Figura 10.</b> Número de hojas expandidas en función de los días desde la emergencia, de 16 unidades observacionales de los tratamientos: A. MZ1°FS. B. MZ2°FS. ....	38
<b>Figura 11.</b> Número de hojas verdes en función de los días desde la emergencia (14/10/2011), de 16 unidades observacionales de los tratamientos cultivos de maíz de fecha de siembra temprana. ....	39
<b>Figura 12.</b> Número de hojas verdes en función de los días desde la emergencia (18/12/2011), de 16 unidades observacionales de los tratamientos cultivos de maíz de fecha de siembra tardía. ....	40
<b>Figura 13.</b> Fitomasa aérea acumulada (Kg MS ha <sup>-1</sup> ) en función de los días desde la emergencia de 16 unidades observacionales del tratamiento: A. cultivos de maíz de fecha de siembra temprana (emergencia: 14/10/2011). B. cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (emergencia: 18/12/2011). ....	41
<b>Figura 14.</b> Rendimiento en grano medio (kg ha <sup>-1</sup> ) de 16 unidades observacionales de los tratamientos MZ1°FS y MZ2°FS. ....	43
<b>Figura 15.</b> Rendimiento en función del: A. Número de granos m <sup>-2</sup> . B. Peso de mil granos (g), de 16 unidades observacionales de los tratamientos MZ1°FS y MZ2°FS. 43	
<b>Figura 16.</b> Rendimiento en función de: A. Índice de cosecha. B. Protandria, de 16 unidades observacionales de los tratamientos MZ1°FS y MZ2°FS. ....	44
<b>Figura 17.</b> Número de granos m <sup>-2</sup> en función de la TCC, de 16 unidades observacionales de los tratamientos MZ1°FS y MZ2°FS. ....	45
<b>Figura 18.</b> Dendograma de variables de los cultivos del tratamiento MZ1°FS. ....	46

<b>Figura 19.</b> Dendograma de variables de los cultivos del tratamiento MZ2°FS. ....	46
<b>Figura 20.</b> Fitomasa aérea acumulada (kg MS ha <sup>-1</sup> ) en función de los días desde la emergencia (emergencia: 06/11/2011), de 16 unidades observacionales de los tratamientos; A. SJ39810. B. SJ4670. ....	48
<b>Figura 21.</b> Rendimiento en grano medio de 16 unidades observacionales de los tratamientos SJ3810 y SJ 4670. ....	49
<b>Figura 22.</b> Rendimiento en función del: A. Número de granos m <sup>-2</sup> . B. Peso de mil granos, de 16 unidades observacionales de los tratamientos SJ3810 y SJ4670.....	50
<b>Figura 23.</b> Número de granos m <sup>-2</sup> en función de la TCC (g m <sup>-2</sup> día <sup>-1</sup> ) en el período crítico para la determinación del rendimiento, de 16 unidades observacionales de los tratamientos SJ3810 y SJ4670. ....	50
<b>Figura 24.</b> Dendograma de variables de los cultivos del tratamiento soja SJ3810. ....	51
<b>Figura 25.</b> Dendograma de variables de los cultivos del tratamiento SJ4670.....	52
<b>Figura 26.</b> Representación de las variables en el plano de la primera (CP 1) y la segunda (CP 2) componente principal, del tratamiento MZ1°FS.....	54
<b>Figura 27.</b> A. Representación de las variables en el plano de la primera (CP 1) y la segunda (CP 2) componente principal, del tratamiento MZ2°FS. B. Representación de las variables en el plano de la primera (CP 1) y la tercera (CP 3) componente principal, del tratamiento MZ2°FS. ....	57
<b>Figura 28.</b> A. Representación de las variables en el plano de la primera (CP 1) y la segunda (CP 2) componente principal, del tratamiento SJ3810. B. Representación de las variables en el plano de la primera (CP 1) y la tercera (CP 3) componente principal, del tratamiento SJ3810.....	60
<b>Figura 29.</b> Representación de las variables en el plano de la primera (CP 1) y la segunda (CP 2) componente principal, del tratamiento SJ4670.....	62

## ABREVIATURAS

AD = Agua disponible

AT = Agua total

CaCO<sub>3</sub> = Carbonato de Calcio

CMerror = Cuadrado medio del error

CV = Coeficiente de variación

d = Diámetro

DA = Densidad aparente

DAMM = Densidad aparente del material mineral

DAMO = Densidad aparente de la materia orgánica

DDE = Días desde la emergencia

GM = Grupo de madurez

h = Altura

IAF = Índice de área foliar

IC = Índice de cosecha

IMO = Índice de materia orgánica

MO = Materia orgánica

MOM = Materia orgánica de la fracción mineralizable

MOP = Materia orgánica de la fracción particulada

MS = Materia seca

Msh = Masa del suelo húmedo

Mss = Masa del suelo seco

MZ1°FS = Cultivos de maíz de fecha de siembra temprana

MZ2°FS = Cultivos de maíz de fecha de siembra tardía

N = Nitrógeno

n = Número de observaciones

Na = Sodio

NG = Numero de granos por unidad de superficie

P = Fósforo

p = Número de parámetros

PG = Peso individual de los granos

PMP = Punto de marchitez permanente

R3 = Comienzo de fructificación

R4 = Plena fructificación

R5 = Comienzo de llenado de granos

R6 = Máximo tamaño de las semillas

R7= Comienzo de madurez

R8 = Plena madurez

RSG = Radiación solar global

SCerror<sub>p</sub> = Suma de cuadrados del error

sd = Sin determinar

SJ3810 = Cultivos de soja variedad comercial DM 3810

SJ4670 = Cultivos de soja variedad comercial DM 4670

TCC = Tasa de crecimiento del cultivo

## RESUMEN

La productividad alcanzada por los cultivos es el resultado del genotipo, el ambiente (condiciones agroecológicas, prácticas de manejo de los cultivos y los suelos), y la interacción de ambos factores. En la pampa arenosa bajo igual condición climática e iguales prácticas de manejos se observa variabilidad espacial en la productividad de los cultivos. En dicha condición detectar sub zonas dentro de un mismo lote, con diferente combinación de factores determinantes del rendimiento, permitiría la aplicación de prácticas de manejo apropiadas para cada una. El objetivo general de este trabajo fue caracterizar las propiedades edáficas y topográficas que limitan la productividad de los cultivos agrícolas. Se realizó un estudio en condiciones de campo en la zona de General Villegas (Pampa Arenosa Argentina), durante la campaña 2011/12. Se estudiaron cuatro tratamientos: cultivos de maíz en fecha de siembra temprana (03/10/2011), y tardía (13/12/2011), cultivos de soja variedad comercial DM 3810 y DM 4670, dispuestos en un diseño en grilla con 64 unidades observacionales (16 de cada tratamiento). Se registraron las condiciones climáticas, en cada unidad observacional se realizaron mediciones del crecimiento, el desarrollo y la productividad de los cultivos, se midió la altimetría del terreno y algunas propiedades edáficas (granulometría, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, carbonato de Calcio, y humedad), y se realizó un mapa de zonas de manejo en función de los rendimientos de cultivos precedentes. El análisis de resultados se realizó con técnicas de análisis de datos independientes ya que no se observó dependencia espacial. Para identificar relaciones entre las propiedades evaluadas se utilizó el coeficiente de correlación lineal de Pearson, para evaluar la variabilidad dentro de cada tratamiento se realizaron análisis de conglomerados, para determinar el efecto del tratamiento en cada cultivo se realizaron pruebas *t* de Student, y para identificar las propiedades que generaron variabilidad en los cultivos se realizaron pruebas de diferencias de medias entre conglomerados de cada tratamiento (pruebas *t* de Student y ANOVA), análisis de componentes principales, y análisis de regresión lineal múltiple. Las propiedades se jerarquizaron a través del valor de Cp Mallows. Las precipitaciones registradas durante el ciclo de los cultivos representaron el 84 % del valor medio histórico durante octubre, noviembre, enero, marzo y abril, en contraposición durante diciembre no se registraron lluvias, y en febrero fueron tres veces superiores a la media histórica. En las unidades observacionales la granulometría se correlacionó con la materia orgánica (capa superficial 0-20 cm), y con el carbonato de Calcio (capas sub superficiales 60-100 cm). El pH se correlacionó con la conductividad eléctrica y con el carbonato de Calcio, y este último también con la conductividad eléctrica. La cota relativa del terreno se

correlacionó negativamente con la materia orgánica, el contenido de arcilla más limo, y el carbonato de Calcio. La zona de manejo definida a través de monitores de rendimiento de campañas precedentes con mayor potencial se ubicó en posición elevada del relieve y presentó textura gruesa. Se detectó variabilidad en la productividad de los cultivos de todos los tratamientos evaluados y se definieron entre dos y tres conglomerados en cada uno de ellos. Las estrategias de manejo que produjeron mayor productividad fueron la fecha de siembra tardía y la variedad DM 4670 para maíz y soja, respectivamente. Los factores que incidieron sobre la productividad de los cultivos variaron de acuerdo al tratamiento. En el tratamiento maíz con fecha de siembra temprana la propiedad que limitó la productividad con mayor jerarquía fue el pH, seguido del agua disponible al momento de la siembra y el contenido de carbonato de Calcio. Para el tratamiento de fecha de siembra tardía la cota relativa del terreno explicó los rendimientos. En tanto para los cultivo de soja variedad comercial DM 3810 la productividad estuvo condicionada por el pH, y para DM 4670 la cota relativa y la materia orgánica se relacionaron directamente con los rendimientos y la fitomasa aérea acumulada en estadio R5, respectivamente. Estos resultados indican que en la condición estudiada no es posible una realizar una única definición de zonas de manejo en base a las propiedades evaluadas, ya que la zonificación varía en función del cultivo y el escenario climático.

**Palabras clave:** agua disponible, reacción del suelo, altimetría del terreno, variabilidad espacial.

## ABSTRACT

Crop productivity is the result of genotype, environment (agroecological conditions, crop management and soils) and their interaction. In the sandy Pampas of Argentina, under similar climate and management conditions there is great spatial variability of crop productivity. Therefore, detecting sub-zones within a field with different combinations of yield determining factors would enable farmers to apply management practices more appropriate for each zone. A field study was carried out near general Villegas (Sandy Pampas, Argentina) during the 2011/12 summer cropping season. Four treatments consisting of two planting dates for corn (early: 03/10/2011; late: 13/12/2011) and two different cultivars of soybean (DM 3810 and DM 4670) were arranged in a grid of 64 observational units (16 for each treatment). In each of these units growth, phenological stages and crop productivity were recorded, and altimetry and selected soil properties (texture, organic matter, pH, electrical conductivity, calcium carbonate and moisture content) were determined. A map of zones within the field was produced according to the yields of previous crops. Results were analyzed as independent data since no spatial correlations were found. Pearson's linear correlation coefficient was used to determine the relationships among variables. Variability within each treatment was assessed with conglomerate analysis. The effect of each treatment was determined by Student's t-test; and in order to identify the properties that generated variability within the crops mean differences among treatments were tested with Student's t-test and ANOVA, principal component analysis and linear multiple regression. Properties were ranked according to their Cp Mallows value. Precipitations during the crop growing season were 84% above the historical average in October, November, January, March and April, while there was no rain in December, and in February precipitations were three times the historical mean. Correlations between texture, organic matter contents (0-20 cm depth) and calcium carbonate (60-100 cm depth) were observed in the experimental units. Calcium carbonate was related to pH and to electrical conductivity, and the latter were also related among them. Altimetry was negatively related to organic matter, fine particle contents (clay plus silt) and calcium carbonate. The management zone of high potential, derived from yield monitors of preceding crops, was found at higher points and had sandy textures. All treatments showed variability of crop productivity, and between two or three conglomerates were defined for each. Management strategies that produced higher yields were late planting for corn and variety DM 4670 for soybean. The decisive factors for yield were different in each treatment. In early planted corn the most limiting

factors were pH, available water at planting and calcium carbonate contents. For late corn yield was explained by altimetry. In soy crop, DM 3810 was limited by pH, and DM 4670 yield was affected by altimetry and organic matter determined dry matter accumulation in the R5 stage. These results indicate that under the experimental conditions it is not feasible to obtain a unique zoning for this field based on the evaluated variables since yield variability and zones vary according to type of crop and climatic scenario.

**Key words:** available water, soil reaction, altimetry of the terrain, spatial variability.



## Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

La demanda mundial de cultivos para la alimentación está determinada por la tasa de consumo per cápita y el crecimiento demográfico, que se estima continuará aumentando en los próximos 40 años y alcanzará aproximadamente los 9 billones de personas (Godfray *et al.*, 2010). Es posible aumentar la producción primaria a través del cambio de la vegetación natural hacia la agricultura, proceso conocido como expansión de las fronteras agrícolas. Dicho proceso se desarrolló desde 1700 hasta 1992 a diferente velocidad según la región del mundo (Ramankutty & Foley, 1999). En la región pampeana de Argentina la expansión del área con cultivos anuales se dio a expensas de superficie destinada a la producción de ganado bovino y de pasturas naturales (Viglizzo *et al.*, 2001), y en la región extrapampeana sobre ecosistemas nativos y producciones tradicionales de la zona. Otra alternativa para aumentar la producción consiste en incrementar la productividad por unidad de superficie de las rotaciones establecidas (de Koning *et al.*, 1995). La intensificación sustentable de la agricultura se define como la adopción de procesos de uso intensivo de los recursos ambientales y el uso racional de los insumos químicos, manteniendo o incrementando los rendimientos por unidad de área (Caviglia & Andrade, 2010).

Los rendimientos alcanzables por los cultivos dependen del genotipo, del ambiente al que están expuestos y de la interacción entre ambos factores. Incrementos en los rendimientos de los cultivos a través del tiempo se debieron a cambios en las prácticas de manejo y a la mejora genética (Ferreyra *et al.*, 2013). En Argentina, Calviño *et al.* (2003) destacan aumentos en los rendimientos de los cultivos de maíz (*Zea mays* L.) desde fines de 1980 hasta inicios de 2000 por el efecto de prácticas como la fertilización con fósforo (P), el mejor control de malezas, la adopción de la siembra directa, el aumento en la densidad de plantas y la fertilización con nitrógeno (N), junto al avance del potencial genético de los híbridos. A través de un estudio ajustado por el clima durante el período comprendido desde 1968 hasta 1990, Bell *et al.* (1995) definieron que los aumentos de rendimiento de trigo (*Triticum aestivum* L.) en el noroeste de México se debieron en un 28 % a la contribución genética y en un 48 % a incrementos en la fertilización nitrogenada. Bajo iguales prácticas de manejo de los cultivos de maní (*Arachis hypogaea*) en Argentina, los incrementos de rendimientos entre 1948 y 2004 se debieron a mejoras en la genética de los materiales, principalmente por aumentos en el peso de los granos (Haro *et al.*, 2013).

La contribución de la ingeniería genética sobre los cultivos consiste en aumentar los rendimientos potenciales y en generar mecanismos fisiológicos que permitan evitar factores bióticos (Creus *et al.*, 2007) y abióticos (Nagore *et al.*, 2014) de estrés. Cada especie posee gran variabilidad genética, tal es el caso de genotipos de soja (*Glycine max* L.), que expuestos a las mismas condiciones ambientales expresan diferencias en el rendimiento y en sus caracteres relacionados (ramas y vainas por planta y peso de las semillas), (Aditya *et al.*, 2011). Del mismo modo híbridos de maíz con diferente productividad explicado en parte por la duración del ciclo, siendo éste un factor de adaptabilidad al ambiente (Capristo *et al.*, 2007).

El ambiente en el que se establecen los cultivos se define por las condiciones agroecológicas, las prácticas de producción, de manejo de los cultivos y de los suelos. Los cultivos están expuestos a condiciones de estrés que limitan sus rendimientos potenciales, al reducir la tasa de algún proceso fisiológico por debajo del valor máximo que la especie mantendría en condiciones favorables (Golberg *et al.*, 2011). El efecto del estrés depende de la duración y la severidad del agente estresante, la ontogenia y el genotipo del cultivo (Zaidi *et al.*, 2003). Las condiciones agroecológicas que limitan los rendimientos potenciales incluyen el clima, el relieve o la topografía, el suelo (fertilidad física y contenido de agua; Kay *et al.*, 2006), la fertilidad química o nutricional y la fertilidad biológica; y los factores reductores bióticos (malezas, plagas y enfermedades), y abióticos (contaminantes; van Ittersum & Rabbinge, 1997). Dentro de los factores climáticos se incluye la radiación, las precipitaciones (Calviño & Sadras, 2002; Ferreyra *et al.*, 2001; Mercau *et al.*, 2001), las temperaturas máximas (Calviño & Sadras, 2002; Chen *et al.*, 2012; Cicchino *et al.*, 2010) y mínimas (Slafer *et al.*, 2004), y el fotoperiodo (Han *et al.*, 2006).

La principal limitante en producciones de secano en las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas es la disponibilidad de agua (Basso *et al.*, 2012; Nagore *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2013). Bajo estas condiciones es necesario adoptar prácticas de manejo para disminuir el estrés hídrico (Debaeke & Aboudrare, 2004). Calviño & Sadras (1999) determinaron para los cultivos de soja que la disponibilidad de agua durante la formación de vainas y granos es limitante en el 54 % de los años en Tandil (Argentina). El rendimiento en grano tuvo una relación lineal *plateau* con el agua disponible en dicha etapa, siendo explicado en un 74 %. Bajo un procedimiento similar en la zona maicera tradicional de Argentina (entre 32° y 35° de latitud Sur), Calviño *et al.* (2003) explicaron de forma lineal *plateau* el rendimiento de dicho cultivo en más del 84 % por las precipitaciones ocurridas alrededor de la floración (-30 y +20 días). En

Haplustoles Típicos de la pampa central de Argentina, Gregoret *et al.* (2011) proponen un modelo regional para predecir los rendimientos de maíz en base a la disponibilidad de agua y de N en el suelo al momento de la siembra, y el N aplicado como fertilizante. En suelos Haplustoles Enticos sin limitantes físicas de la pampa interior (Argentina), Nosetto *et al.* (2009) observaron una correlación entre los rendimientos de los cultivos y la profundidad de la capa freática, y definieron un rango de profundidad óptima de 1,40 a 2,45, 1,20 a 2,20 y 0,70 a 1,65 m para maíz, soja y trigo, respectivamente.

Las condiciones climáticas aportan una fuente de variabilidad temporal de los cultivos que puede modificar su respuesta a la estrategia de manejo seleccionada, debido a la interacción manejo, clima y suelo (Basso *et al.*, 2007). Al respecto, para cultivos de soja la disponibilidad hídrica y la profundidad efectiva del suelo podrían condicionar la respuesta del rendimiento a estrategias de manejo tales como la fertilización fosfatada y el estrechamiento entre hileras de siembra (Calviño & Sadras, 1999).

En cuanto al efecto del manejo de los cultivos sobre su rendimiento, tanto el atraso como adelanto de una fecha de siembra óptima afectan negativamente la producción y calidad en soja (Hu & Wiatrak, 2012). Para dicho cultivo en la pampa arenosa (Argentina) se observan disminuciones en los rendimientos con el atraso en la fecha de siembra a partir del 5 de noviembre (Barraco, 2009). Del mismo modo las siembras tardías de los cultivos de maíz, ante condiciones hídricas y nutricionales no limitantes, alcanzan menores rendimientos respecto a fechas óptimas (Cantarero *et al.*, 2000; Cirilo & Andrade, 1994). La reducción de la distancia entre hileras es una estrategia de manejo con respuesta positiva en el rendimiento en los cultivos de maíz, girasol (*Helianthus annuus*) y soja cuando no es posible alcanzar el 95 % de intercepción de radiación durante el período crítico, sin limitantes hídricas y nutricionales (Andrade *et al.*, 2002). Las variaciones en la densidad de plantas constituyen otra estrategia de manejo comúnmente usada por los productores de la pampa argentina, que en los cultivos de maíz posee diferente respuesta en función del híbrido seleccionado (Sarlangue *et al.*, 2007). En los cultivos de soja la elección de diferentes grupos de madurez (GM) según su sensibilidad fotoperiódica (Baigorri *et al.*, 2009) determina la adaptabilidad al ambiente. En Hailun (China), Liu *et al.* (2005) evaluaron durante dos años genotipos de soja con diferentes días de ciclo (113-117 y 128-132 días desde emergencia hasta madurez fisiológica), y establecieron que los grupos de ciclo más largo registraron los mayores rendimientos en grano y más estables en el tiempo.

En condiciones climáticas semejantes y prácticas de manejo uniformes comúnmente se observa heterogeneidad espacial en los rendimientos que podría atribuirse a variaciones en las propiedades edáficas o de terreno. En los últimos años aumentó considerablemente el interés en la evaluación de la variación espacial de las propiedades del suelo y del terreno en diferentes escalas (Bai & Wang, 2011; Fu *et al.*, 2011; Kölbl *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2009). La heterogeneidad edáfica puede deberse a factores formadores naturales y/o a factores antrópicos producto del manejo. Cada propiedad edáfica posee una escala propia de variabilidad (Di Pietro *et al.*, 1986), en sentido espacial y temporal, por lo cual algunas se consideran estáticas y otras dinámicas. En suelos de la región central y centro-norte de Iowa (Estados Unidos) clasificados como Hapludoles, Endoacuoles y Calciacuoles, Rogovska *et al.* (2007) registraron que las variaciones en los rendimientos de soja, a nivel de lote o sitio, se explicaron en un 45 % por un índice integrado por el pH (rango de 5,6 a 8,2) y el contenido de carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) equivalente (rango de 0 a 30 %). En Tandil (pampa austral) los rendimientos de maíz fueron menores en suelos someros (Paleudoles Petrocalcicos) respecto a suelos profundos (Argiudoles Típicos), incluso bajo condiciones sin limitantes hídricas en momentos próximos a la floración, lo que indicaría el efecto de restricciones físicas sobre la producción (Calviño *et al.*, 2003). En California (Estados Unidos) para cultivos de arroz (*Oryza sativa*) las principales variables edáficas que condicionaron los rendimientos fueron la salinidad (medida a través de la conductividad eléctrica) y la disponibilidad de P (Simmonds *et al.*, 2013). Para el mismo cultivo en Takatsuki (Japón), Yanai *et al.* (2001) destacan la contribución a la variabilidad de un factor que integra propiedades relacionadas a la materia orgánica (MO) de los suelos y las bases intercambiables. En la pampa arenosa de Argentina se registraron evidencias de menor productividad de los cultivos de soja, maíz y girasol, y en pasturas perennes de alfalfa (*Medicago sativa*), en suelos Hapludoles con discontinuidad litológica en contraposición a Hapludoles Típicos, cuando se aplicó el mismo manejo (Díaz-Zorita *et al.*, 1993; Pérez *et al.*, 2002; Barraco, 2009). En la misma región, la posición en el relieve en ambientes con pendientes del 1,3 y 1,5 % modificó el rendimiento de los cultivos de soja realizados bajo igual manejo a nivel de lote, con menores rendimientos en las lomas, intermedios en medias lomas y mayores en la posición de bajo (Barraco, 2009). También en dicha región, en Hapludoles Típicos y Enticos, el contenido de arena del horizonte superficial, asociado a la posición topográfica, y con elevada influencia sobre la

capacidad de agua disponible del perfil, presentó estrecha asociación con los rendimientos de los cultivos de maíz (Urricariet *et al.*, 2011).

La variabilidad en la producción de los cultivos conlleva un uso ineficiente de los recursos como el agua, la radiación y los nutrientes; e insumos como las semillas, los agroquímicos y los fertilizantes, lo que posee un impacto negativo en los costos de producción. Por otra parte, la geomorfología del ambiente, la variabilidad climática y la intervención humana a través del uso y manejo no adecuado, lleva a procesos de degradación, tales como erosión eólica o inundaciones (Bernardos *et al.*, 2001; Viglizzo & Frank, 2006). En ambientes frágiles con baja capacidad de resiliencia, como suelos de zonas bajas de la pampa arenosa, los pastoreos excesivos con disminución de la cobertura conducen a la acumulación de sales en superficie, la disminución de la infiltración y el aumento de la densidad aparente (Zamolinski, 2000).

Actualmente existen diversos métodos para medir la heterogeneidad edáfica, algunos basados en las propiedades del suelo y su relieve, y otros en el comportamiento de los cultivos. En el primer caso se destacan los muestreos intensivos de suelos e interpolación de sus resultados (Wu *et al.*, 2013), métodos basados en sensores remotos y en sensores próximos al suelo (López-Lozano *et al.*, 2010), modelos de elevación digital del terreno (Basso *et al.*, 2012; Ruffo *et al.*, 2006), y sensores de conductividad eléctrica aparente del suelo (Corwin & Lesch, 2005; Serrano *et al.*, 2013). De forma indirecta el comportamiento de los cultivos permite evaluar la heterogeneidad edáfica a través de la reflectancia del canopeo (Roberts *et al.*, 2013), o en mapas de rendimiento (Adamchuk *et al.*, 2010), y la evaluación de su estabilidad a través de los años (Basso *et al.*, 2007).

Con el objetivo de atenuar la heterogeneidad productiva existe especial interés en la aplicación de tecnologías de manejo e insumos para optimizar la relación entre la oferta de los recursos del ambiente y los requerimientos de los cultivos, también llamado manejo de sitio específico o agricultura de precisión. A fin de maximizar la producción en cada ambiente de manera sustentable, esta tecnología posee beneficios tanto económicos (Meyer-Aurich *et al.*, 2010), como ambientales (Bongiovanni *et al.*, 2007; Robertson *et al.*, 2007).

La agricultura de precisión consiste en una tecnología a nivel de lote que se basa en obtener datos georeferenciados para lograr un mayor conocimiento de los factores que contribuyen a la variabilidad, identificar sus limitantes y delimitar zonas en las cuales sea viable la aplicación de estrategias de manejo y de insumos adecuados (Ovalles, 2006). Las zonas de manejo se definen como subregiones dentro de los lotes

que expresan una combinación homogénea de factores determinantes del rendimiento y a la cual le resulta apropiada una dosis única de insumos o práctica de manejo (Doerge, 1999). El criterio para determinar zonas de manejo puede estar dado por los rendimientos de cultivos antecesores (Basso *et al.*, 2012), las propiedades edáficas, el relieve, las condiciones de manejo previo (Bongiovanni *et al.*, 2007) o el conocimiento de los productores del sitio. En Hapludalfes Típicos derivados de materiales loessicos de Flanders (Bélgica) los principales parámetros para definir zonas de manejo fueron el pH del suelo, la conductividad eléctrica aparente y la elevación (Vitharana *et al.*, 2008). En Haplustoles Típicos de la región semiárida pampeana la elevación o posición topográfica es una herramienta usada para definir zonas de manejo (Gregoret *et al.*, 2011), siendo las posiciones más bajas respecto a la elevación promedio, las de mayor potencial de rendimiento. Los rendimientos previos de los cultivos resultaron ser la mejor herramienta para delimitar zonas de manejo respecto al conocimiento de los productores del lote, en suelos Hapludox Típicos de Rio Grande del Sur (Brasil), (Horbe *et al.*, 2013). En suelos con capas enriquecidas de arcilla de Missouri (Estados Unidos) la conductividad eléctrica aparente y las variables de elevación del terreno permitieron definir zonas de manejo con diferente potencial de rendimiento de los cultivos (Kitchen *et al.*, 2005). Sin embargo, la fertilidad química del suelo (pH, conductividad eléctrica, N disponible, MO, P extractable y potasio intercambiable), no resultó en el factor determinante de los rendimientos de los cultivos de maíz en Inceptisoles de Chile, lo que sugiere la importancia de definir la condición limitante previo a la implementación de técnicas de agricultura de precisión (Ortega & Santibáñez, 2001).

A nivel mundial la aplicación de tecnologías por zonas de manejo permite identificar casos con resultados positivos que justifican su implementación, y neutros o negativos donde no sería conveniente aplicar este manejo. Para la fertilización con N en los cultivos de trigo y avena (*Avena sativa*) en suelos Paleudalfes Típicos y Acuicos de Harpenden (Reino Unido), Córdova *et al.* (2012) recomiendan aplicaciones uniformes a escala de lote debido a la falta de correlación espacial de las fracciones lábiles de la MO, estrechamente relacionadas a la mineralización del N, y la dosis de fertilización. En contraposición, para suelos Argiudoles y Endoacuoles de Illinois (Estados Unidos) se encontró una relación significativa de la respuesta de los cultivos de maíz a la fertilización con N, con interacción a las características sitio-específicas del paisaje y los contenidos de N del suelo, medido a través del test de Illinois (Ruffo *et al.*, 2006).

En base a estos antecedentes se plantean las hipótesis: (i) en la pampa arenosa la variabilidad espacial de las condiciones edáficas y de relieve generan limitaciones en el rendimiento de los cultivos, y (ii) dichas limitaciones pueden ser superadas por la aplicación de prácticas de agricultura de precisión, respecto al manejo uniforme de los lotes.

El objetivo general de este trabajo fue caracterizar las propiedades edáficas y topográficas que limitan la producción de los cultivos agrícolas. Los objetivos específicos que se plantean son: (i) identificar relaciones entre las propiedades edáficas evaluadas, y entre las propiedades edáficas y la topografía, (ii) evaluar la presencia de variabilidad en la productividad de los cultivos realizados bajo igual manejo, (iii) evaluar el efecto de diferentes estrategias de manejo de cultivos de maíz y soja (fecha de siembra y grupos de madurez, respectivamente) en el rendimiento, y (iv) identificar y jerarquizar el efecto de las propiedades edáficas y el relieve, que expliquen la variabilidad en la productividad de los cultivos de soja y maíz, en cada estrategia de manejo propuesta.

## **Capítulo 2: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Caracterización de la región de estudio**

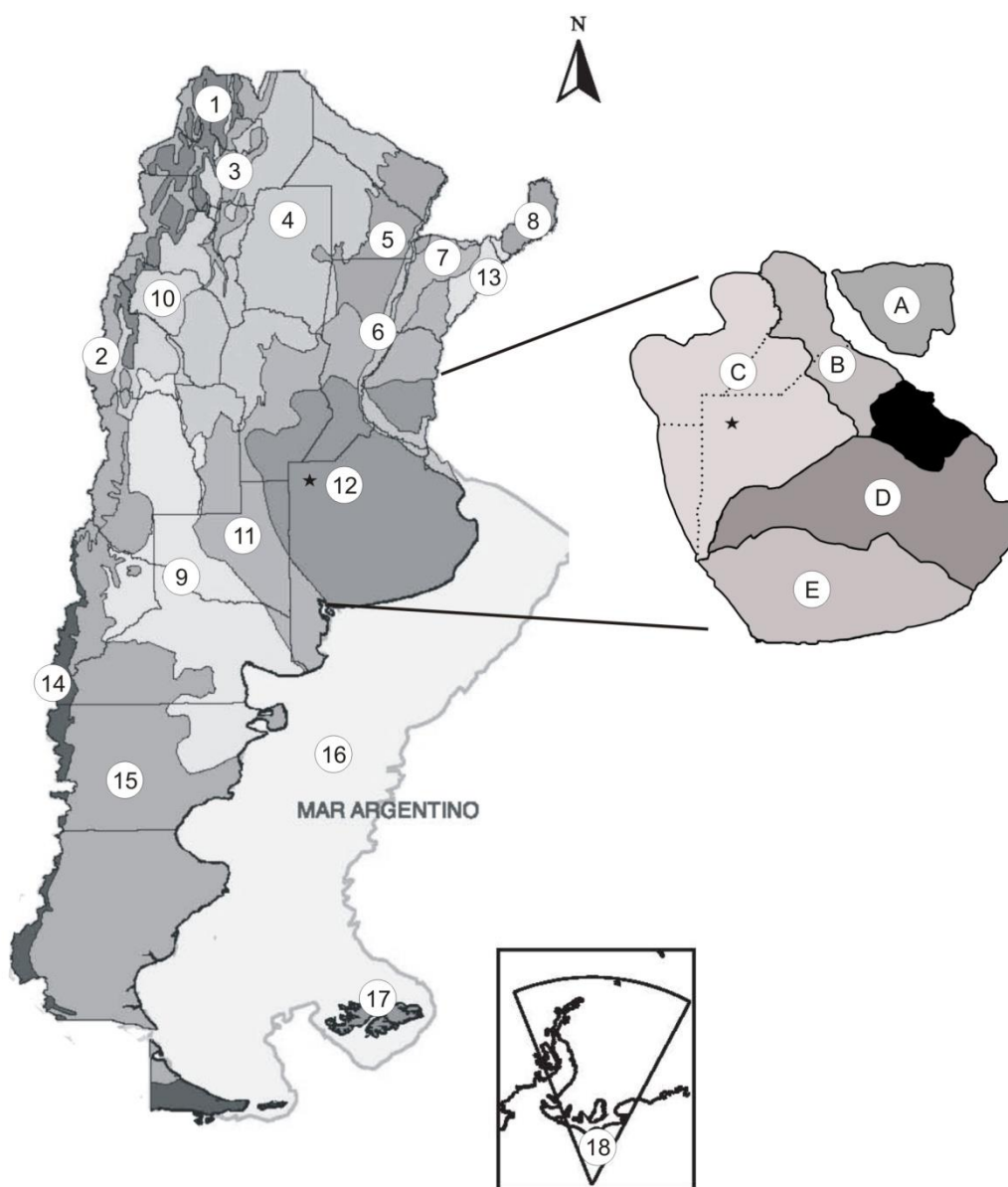
#### **Ubicación geográfica**

El pastizal pampeano o llanura pampeana es una de las ecoregiones de la Argentina de mayor importancia a nivel nacional, tanto por la población en la que allí habita como por sus niveles de producción agropecuaria (Papadakis, 1963). Es posible subdividir esta área según las características de sus suelos y de las precipitaciones en 5 subregiones: pampa ondulada, pampa central, pampa austral, pampa mesopotámica y pampa deprimida (Viglizzo *et al.*, 2001). El área de estudio se denomina pampa arenosa de la subregión pampa central (Fig. 1), está situada en el partido de General Villegas (Buenos Aires, Argentina) y se ubica en unidad geomorfológica de llanuras continentales, subunidad medanoso y de arenas finas (SAGYP-INTA, 1989; Zarate, 2003).

#### **Relieve**

La pampa arenosa comprende una gran llanura con pendiente regional suave (0,25 por mil) de este a oeste (Zamolinski *et al.*, 1994), y presenta una red de drenaje endorreica y pobremente desarrollada (Damiano & Taboada, 2000). El relieve característico es de dunas longitudinales y parabólicas, que poseen aproximadamente 200 km de longitud, y una distancia entre crestas de 0,5 a 5 km (Imbellone & Giménez, 1998). El relieve determina la distribución espacial de los suelos donde los de menor desarrollo se encuentran en las dunas y los suelos maduros en las áreas interdunas.





**Figura 1.** Eco regiones de la Argentina, subregiones de la región pampeana y localización del sitio de estudio en el territorio.

Eco regiones de la Argentina: 1: Puna, 2: Altos Andes, 3: Selva de las Yungas, 4: Chaco Seco, 5: Chaco Húmedo, 6: Deltas e Islas del Paraná, 7: Esteros del Iberá, 8: Selva Paranaense, 9: Monte de Llanuras y Mesetas, 10: Monte de sierras y bolsones, 11: Espinal, 12: Pampa, 13: Campos y Malezales, 14: Bosques Patagónicos, 15: Estepa Patagónica, 16: Mar Argentino, 17: Islas del Atlántico Sur y 18: Antártida Argentina. Subregiones de la región Pampeana: A: pampa mesopotámica; B: pampa ondulada; C: pampa central; D: pampa deprimida y E: pampa austral). La estrella representa el sitio experimental. Adaptado de Burkart *et al.*, 1999, citado por Brown *et al.*, 2006.

## Clima

El clima es templado con moderadas condiciones continentales y las temperaturas varían de mayor en el norte a menor en el sur (Álvarez & Lavado, 1998). La amplitud térmica diaria y anual es media, siendo la diferencia entre el mes más cálido y el más

frío superior a 16° C. La temperatura media anual es de alrededor de 17° C, en enero la temperatura media es de 24° C, y en julio de 10° C. Durante todo el año las masas de aire ejercen su influencia sobre el territorio, lo que puede ocasionar cambios meteorológicos bruscos estacionales (SAGYP-INTA, 1989).

A lo largo de la región pampeana las precipitaciones varían principalmente de mayor en el este a menor en el oeste (Álvarez & Lavado, 1998). El área de estudio se ubica en la región subhúmeda seca pero esta situación puede variar según las condiciones ambientales puntuales (SAGYP-INTA, 1989). En General Villegas la distribución media de las precipitaciones es primavero-estivo-otoñal, con los máximos aportes en los meses de marzo y abril. La media anual es de 861 mm, coincidiendo en su magnitud con la probabilidad de 0,5 de ocurrencia (845 mm), (Díaz-Zorita *et al.*, 1998). La relación entre las precipitaciones y la demanda por evapotranspiración determina un período seco desde julio a septiembre y una relación negativa entre noviembre y febrero (Díaz-Zorita *et al.*, 2002).

La zona se caracteriza por una incidencia cíclica de inundaciones y de sequías (Alconada Magliano *et al.*, 2009). Períodos con elevadas precipitaciones en áreas de relieve plano y suelos con una capa de arcilla impermeable cercana a la superficie que dificulta la percolación del agua, producen inundaciones en forma de cubetas poco profundas. Estos fenómenos son exacerbados por efectos antrópicos tales como caminos, rutas y canales (Ghersa *et al.*, 2002).

## **Suelos**

En la región pampeana los suelos son en su mayoría del orden Molisol que se desarrollaron sobre sedimentos loésicos y con vegetación natural de pastizales, donde predominaron las especies gramíneas (Álvarez & Lavado, 1998; Ghersa *et al.*, 2002). En la pampa arenosa los suelos son en su mayoría cultivables y algunos poseen limitaciones por susceptibilidad a la erosión eólica (Viglizzo *et al.*, 2001).

En el partido de General Villegas (723.000 has) la mayor parte de la superficie está ocupada por suelos Hapludoles Típicos (38,5 %), Hapludoles Thapto-nátricos (17,8 %), Hapludoles Thapto-árgicos (16,0 %), (Griego: thapto: enterrado) y Hapludoles Énticos (11,6 %), (Justo & Sueiro, 2013). Según la edición N°12 de Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014a) la nomenclatura de los suelos Hapludoles Thapto-árgicos y Hapludoles Thapto-nátricos antes mencionados, corresponderían a Argiudoles Abrúpticos y Natrudoles Abrúpticos, respectivamente (Imbellone, com. pers.).

Los suelos del área generalmente se encuentran en asociaciones, consociaciones o complejos, mostrando variabilidad espacial que se manifiesta en forma de mosaico y son conocidos como "lotes overos". En algunas áreas, independientemente del tipo de suelo y a profundidades variables, se observa la presencia de duripanes de calcáreo (planchas de tosca) que limitan la profundidad explorable del perfil de suelo (SAGYP-INTA, 1989).

Los suelos Hapludoles Típicos y Énticos son los de mayor aptitud de uso (clase II-III) y generalmente se desarrollan en las posiciones más elevadas y convexas del relieve. Los Hapludoles Típicos están bien provistos de MO, sin limitantes químicas y adecuadas propiedades físicas, con buen drenaje y apropiada profundidad explorable por las raíces. Los Hapludoles Énticos tienen menor capacidad de almacenar agua y son algo excesivamente drenados producto de su textura con mayor contenido de arena y sin presencia de horizontes B.

En posiciones de media loma o planicies se encuentran suelos poligenéticos Argiudoles Abrúpticos y Natrudoles Abrúpticos con capacidad de uso III-IV-V. Se denominan suelos enterrados cuando el pedón presenta una secuencia de horizontes genéticos cubiertos por un manto superficial de 50 cm o más de espesor de material mineral en gran medida inalterado, al menos en su parte inferior (Soil Survey Staff, 2014a). Para el caso de suelos en la pampa arenosa, Imbellone *et al.* (2010) establecen que el concepto se aplica a suelos con discontinuidades litológicas dentro del pedón, con los espesores antes mencionados y con un ciclo pedológico suprayacente con distinto grado de pedogénesis. La génesis de suelos con discontinuidad litológica de las llanuras continentales se desarrolló en varias etapas y sobre sedimentos eólicos depositados en distintos ciclos geológicos. Durante un primer período de edafización con mayor pluviometría se desarrollaron suelos con un horizonte B textural enriquecido en arcilla y con estructura prismática, donde luego el horizonte A fue erosionado en un ciclo árido subsiguiente. Con posterioridad hubo un aporte de sedimentos de aproximadamente 50 cm de espesor sobre el cual se desarrollaron el horizonte A y AC actuales (Sobral *et al.*, 1993).

La principal limitante en suelos Argiudoles Abrupticos es el cambio de textura y el sistema poroso limitado del horizonte argílico, lo cual resulta en un ineficiente almacenaje del agua, y afecta el normal desarrollo radicular. Generalmente presentan elevadas resistencias a la penetración en períodos de sequía, y anoxia en períodos de excesos hídricos, producto del anegamiento por baja conductividad hidráulica o baja permeabilidad (Díaz-Zorita *et al.*, 1993). En suelos Natrudoles Abrupticos, donde el

horizonte B presenta elevado contenido de Sodio (Na), estos problemas físicos se agravan debido al efecto dispersante del Na sobre los coloides del suelo y se adiciona una limitante de tipo química por su alcalinidad, que disminuye marcadamente su aptitud productiva. Por lo tanto, en suelos abrupticos el espesor del horizonte superficial es el principal determinante de la producción de los cultivos (Díaz-Zorita *et al.*, 2002).

### **Sistemas de producción**

Históricamente los sistemas de producción del noroeste bonaerense se caracterizaron por la integración de actividades agrícolas y ganaderas pastoriles, en proporciones prácticamente equivalentes. A partir de la década del noventa, incentivado por un cambio en el régimen de precipitaciones y la adopción de nuevas tecnologías, se produjo una transformación en el uso de la tierra hacia una mayor superficie destinada a la actividad agrícola (Satorre, 2004). Al analizar los trece partidos del noroeste bonaerense Zaniboni (2012) observó que dicho proceso se intensificó a partir de la campaña 2001/02 alcanzando su máximo en la campaña 2010/11, y desde el año 2008 hasta 2012 dicha tendencia se estabilizó. Además en dicha región se modificaron las proporciones de superficie sembradas con cada cultivo. En la campaña 1989/90, del total de la superficie dedicada a la agricultura (1.033.100 has) el 15, 12, 35 y 38 % se destinó a los cultivos de soja, maíz, girasol y trigo, respectivamente. Luego de 20 años (2009/10) tanto la superficie como las proporciones cambiaron, el nuevo escenario se integró por 63, 21, 8 y 9 % de soja, maíz, girasol y trigo, respectivamente, sobre un total de 2.123.610 has destinadas a la agricultura (SIIA, 2011).

### **Experimento**

#### **Ubicación y caracterización del sitio experimental**

El estudio se realizó en una sección del establecimiento "Don Ferdinando" propiedad de la firma "Pablo Pedro Courreges S.A." (34°58'29" S - 63°07'48" O), ubicado en la localidad de Elordi (General Villegas, Buenos Aires), (118 m.s.n.m, De Fina, 1992). Se seleccionó un lote de 50 has correspondiente a la unidad cartográfica MJ:ag-7 (Moscatelli, 1990). La misma es de tipo asociación y está compuesta por

suelos Hapludoles thapto árgicos (60 %) y Hapludoles Típicos (40 %), ubicados en planicies extendidas con lomas pequeñas ó planicies, y lomas, respectivamente.

## **Tratamientos**

Durante la campaña 2011/12 se instaló un ensayo experimental, ubicado en posición de plano medio. Los cultivos antecesores fueron soja (campaña 2008/09), sorgo (*Sorghum bicolor*) (2009/10), y soja (2010/11). Los tratamientos fueron producto de la combinación de cultivos (maíz y soja) y estrategias de manejo, de manera de poder explorar diferentes ventanas de efectos climáticos (Cirilo & Andrade, 1994). Se establecieron diferentes fechas de siembra para los cultivos de maíz: fecha de siembra temprana (MZ1°FS) y fecha de siembra tardía (MZ2°FS), y genotipos de soja con diferente largo del ciclo: variedad comercial DM 3810, grupo de madurez (GM) III (SJ3810), y variedad comercial DM 4670, GM IV (SJ4670).

Cada tratamiento se dispuso en dos franjas de 15 m de ancho y 500 m de largo, dentro de las cuales se definieron 8 unidades observacionales equidistantes cada 50 m, haciendo un total de 16 unidades de cada tratamiento. La distancia entre ambas franjas fue de 150 m.

## **Metodología**

### *a) Condiciones climáticas y variables ambientales*

Durante el período comprendido entre octubre de 2011 hasta abril de 2012 se registraron las precipitaciones diarias en el sitio experimental (pluviómetro manual). Los datos de las temperaturas máximas y mínimas, la radiación solar global (RSG) y las precipitaciones diarias históricas se obtuvieron de la estación agrometeorológica automática (Siap, Argentina) de la Estación Experimental Agropecuaria del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria General Villegas (34°52'00" S - 62°47'01" O, 117 m.s.n.m.). Dicha estación está ubicada a 35 km del sitio experimental, y dado que la región de estudio presenta relieve plano, se consideró que los valores registrados de las variables se pueden extrapolar.

Se construyeron variables ambientales producto de la combinación de datos meteorológicos y fenológicos, para los períodos vegetativo, reproductivo y crítico. Siendo éste último para maíz el período de activa elongación de la espiga,

comprendido entre -227 y +100° C día desde la floración (Otegui & Bonhomme, 1998) y para soja desde la plena fructificación (R4) hasta el máximo tamaño de las semillas (R6), (Andrade *et al.*, 2012). En cada período considerado se calculó la temperatura media del aire (° C) como el promedio entre la temperatura máxima y mínima diaria, la RSG acumulada (MJ m<sup>-2</sup>), y las precipitaciones acumuladas (mm).

#### *b) Zonas de manejo, altimetría y propiedades edáficas*

Se definieron zonas de manejo dentro del lote seleccionado a partir de información multianual obtenida de los datos filtrados y normalizados de los monitores de rendimiento (el promedio del lote se consideró como el 100 %) de las campañas 2008/09, 2009/10 y 2010/11. Se definieron dos zonas de manejo con el software Management Zone Analyst (Mizzou-ARS, 2000), que realiza agrupaciones o clasificaciones no supervisadas de datos espaciales, es decir, no requiere conocimientos previos de las variables a clasificar (Fridgen *et al.*, 2004).

En septiembre de 2011 se realizó un relevamiento planialtimétrico en el centro de cada unidad observacional y se registraron las alturas de hilo medio observadas a través de un nivel de anteojo (Pentax) con tolerancia de error de 2 mm. Cada altura se midió como valor relativo (cm), al borde superior de estaca ubicada adyacente a un esquinero de la tranquera en el sector norte del lote. Las distancias entre puntos de observación se midieron con cinta métrica y luego se georeferenciaron. Las alturas se expresaron considerando como cero a la unidad experimental con menor cota y se realizó un mapa altimétrico (Golden Software, 2012).

En otoño de 2012 se realizó un muestreo de suelos que consistió en la toma de una muestra simple disturbada por unidad observacional (Rogovska *et al.*, 2007), en capas de 20 cm hasta los 100 cm de profundidad, con barreno de 15 cm de diámetro. Posteriormente las muestras de suelo se secaron al aire y se tamizaron con tamiz con malla de 2 mm, y una submuestra con malla de 0,5 mm.

En cada una de las muestras de suelo se determinó el pH en agua (potenciometría, INTA – RILSAV, 2010) y la conductividad eléctrica (puente estándar de Wheatstone), en suspensión de suelo con agua de 1:2,5. La granulometría (%) de los tamaños arcilla <0,002 mm, limo: 0,002-0,05 mm, y arena: 0,05-2,00 mm se realizó con hidrómetro de Bouyoucos (Ashworth *et al.*, 2001; Bouyoucos, 1962), y la clase textural a través del triángulo textural (Soil Survey Staff, 2014b).

En todas las capas de suelo se determinó la MO (%), por combustión húmeda a partir del contenido de Carbono (%), (Walkley & Black, 1934), considerando que la MO posee un 58 % de Carbono en su composición, según la ecuación:

$$MO = \text{Carbono} * 1,72$$

En la capa superficial de 0 a 20 cm de profundidad se evaluó el contenido de MO de la fracción particulada (MOP) en la fracción granulométrica de tamaño 106-2000  $\mu\text{m}$  (Galantini *et al.*, 1994). Se realizó el fraccionamiento físico por tamaño de partículas a través de tamizado en húmedo (Cambardella & Elliott, 1992) con el agregado de 5 g L<sup>-1</sup> de hexametáfosfato de Na y luego se determinó el contenido de C (Walkley & Black, 1934). La MOP (%) se calculó según la ecuación:

$$MOP = \frac{C (\%) * 1,72 * \text{masa de suelo fracción } 106 - 2000 \mu\text{m} (\%)}{100}$$

Posteriormente se calculó el contenido de MO de la fracción mineralizable (MOM) en la fracción granulométrica de tamaño <160  $\mu\text{m}$ , como la diferencia entre la MO y la MOP. Se calculó el índice de materia orgánica (IMO), como la relación entre el contenido de MO (%) y de arcilla (%) más limo (%), según la ecuación (Quiroga *et al.*, 2006):

$$IMO = \frac{MO}{\text{arcilla} + \text{limo}} * 100$$

Se determinó el equivalente de CaCO<sub>3</sub> (%) (Allison *et al.*, 1954) desde los 20 hasta los 100 cm de profundidad.

El contenido de agua total (AT), (método gravimétrico) se determinó en capas de 20 cm de espesor hasta los 200 cm de profundidad o hasta encontrar algún impedimento físico para extraer la muestra (ej. plancha de tosca o capa freática). En los tratamientos con cultivos de maíz se realizó al momento de la siembra, floración y madurez fisiológica. A excepción de la etapa madurez fisiológica del tratamiento MZ1°FS y floración en MZ2°FS donde no fue posible recolectar la muestra ya que el suelo se encontraba saturado de agua. Para los tratamientos con cultivos de soja el AT se determinó al momento de la siembra, a los 87 días desde la emergencia (DDE), [estado comienzo de fructificación (R3) a comienzo de llenado de granos (R5)], según la unidad observacional (Fehr *et al.*, 1971), y entre los 143 y 153 DDE según la unidad observacional [estado plena madurez (R8)]. El AT (%) se calculó relacionando la cantidad de agua en el suelo obtenida a través de la masa del suelo húmedo (Msh) y la masa del suelo seco (Mss) con el peso seco en estufa hasta peso constante, según la ecuación (Álvarez *et al.*, 2012):

$$AT = \frac{Msh - Mss}{Mss} * 100$$

La densidad aparente (DA, g cm<sup>-3</sup>) en capas hasta los 100 cm de profundidad se estimó a partir del contenido de MO (%), su densidad aparente promedio (DAMO: 0,224 g cm<sup>-3</sup>) y la densidad aparente del material mineral (DAMM, g cm<sup>-3</sup>), obtenido a través de la granulometría, según la ecuación (Rawls, 1983):

$$DA = \frac{100}{\frac{MO}{DAMO} + (100 - \frac{MO}{DAMM})}$$

Para validar el modelo elegido para la estimación de la DA se realizó una calicata en el lote contiguo al ensayo experimental donde se tomaron muestras en las capas de 0-10, 20-30 y 40-50 cm de profundidad para la determinación de la DA según el método del cilindro. Los valores estimados por el modelo (Rawls, 1983) presentaron relación lineal respecto a los valores medidos (p<0,01, r<sup>2</sup>=0,78), y correlación (p<0,01, coeficiente de Pearson= 0,88).

El contenido de agua en punto de marchitez permanente (PMP) se estimó con las funciones de edafotransferencia propuestas por Gupta & Larson (1979), Rawls *et al.* (1982) y Rawls & Brakensiek (1989), (citados por Urricariet *et al.*, 2011) y el modelo Soil Water Characteristics (Saxton & Rawls, 2006). Los valores estimados se relacionaron con valores medidos en las muestras de suelo en capas de 20 cm hasta los 100 cm de profundidad de las unidades observacionales N° 17, 24 y 53 con el método de olla extractora de presión a 15 atm. Los valores estimados con las funciones propuestas por Rawls *et al.* (1982), y Rawls & Brakensiek (1989), (citados por Urricariet *et al.*, 2011) no presentaron correlación con los valores medidos (p>0,10). El modelo Soil Water Characteristics (Saxton & Rawls, 2006) presentó correlación con los valores medidos (p=0,02, coeficiente de Pearson=0,54), como así también la función propuesta por Gupta & Larson (1979), (p=0,03, coeficiente de Pearson=0,53). Se definió el uso del modelo Soil Water Characteristics en función de los resultados antedichos, y un estudio realizado por Alonso *et al.* (2012) en la región Chaco-Pampeana donde consideran al modelo como una herramienta eficiente para la determinación del agua útil en horizontes superficiales y subsuperficiales, especialmente en suelos de texturas arenosa, franco arenosa y arenosa franca.

A partir de los valores de AT (%), PMP (%), DA (g cm<sup>-3</sup>) y espesor del suelo (mm) se calcularon los contenidos de agua disponible (AD, mm), según la ecuación:

$$AD = (AT - PMP) * DA * espesor$$



En las capas de suelo de 100 a 200 cm de profundidad se consideraron los valores de DA y PMP obtenidos en el espesor de 80 a 100 cm.

Durante el mes de marzo de 2012 se registraron los días en que el suelo se encontró con agua libre en superficie, en cada unidad observacional.

### *c) Evaluaciones en los cultivos de maíz*

Los cultivos de maíz (híbrido comercial DK 190 TriplePro) se establecieron en siembra directa, con una densidad de 3,1 semillas m lineal<sup>-1</sup> y un distanciamiento entre hileras de 0,52 m (59615 pl ha<sup>-1</sup>). El tratamiento MZ1°FS se sembró el día 03/10/2011 y MZ2°FS el día 13/12/2011.

Se realizó el seguimiento del crecimiento y desarrollo a través del ciclo de 10 plantas individualizadas y marcadas con cintas de papel en cada unidad observacional. Se registró la fenología (Ritchie & Hanway, 1982) de cada planta, de una a tres veces por semana. Las fechas de emergencia, floración y madurez fisiológica se determinaron cuando el 50% de las plantas alcanzaba dicho estado. Se midió la senescencia como número de hojas verdes planta<sup>-1</sup> cada 7 a 10 días, a partir de 8 días desde la floración. Se calculó la duración de los períodos vegetativo, reproductivo y crítico a partir de los datos fenológicos y climáticos registrados.

En los cultivos del tratamiento MZ1°FS se estimó la materia seca (MS) acumulada en fitomasa aérea a los 20, 32, 46, 54, 62, 67, 81 y 98 días desde la emergencia (DDE), y para el tratamiento MZ2°FS a los 11, 26, 37, 45, 50, 54, 60, 68, 73 y 89 DDE. En ambos casos se realizó mediante un modelo alométrico no destructivo (Borrás & Otegui, 2001) aplicado en las plantas seleccionadas de cada unidad observacional. La metodología consistió en el corte de 12 plantas, de tamaños visualmente medio, superior e inferior a lo normal (a excepción de las seleccionadas e identificadas de cada unidad observacional), en los momentos antedichos. En las plantas cortadas se realizaron las mediciones morfométricas: diámetro (d, cm) del tallo a la altura de la base de la planta (aproximadamente a 2 cm de la superficie del suelo), altura (h, cm) del tallo desde la superficie del suelo hasta la lígula de la última hoja desplegada, y diámetro en cm de espiga (si poseía). Dichas plantas se cortaron a ras del suelo y secaron en estufa hasta alcanzar peso constante. Se calculó el volumen (cm<sup>3</sup>) de cada planta, según la ecuación:

$$\text{Volumen} = \pi * (d \div 2)^2 * h$$

En cada fecha de muestreo con los datos de las 12 plantas se realizó un análisis de regresión lineal simple entre el peso (g), y el volumen de la planta (cm<sup>3</sup>), obteniendo una ecuación del tipo:

$$Peso = a * Volumen + b$$

La MS acumulada en la fitomasa aérea de las plantas seleccionadas de cada unidad observacional se calculó reemplazando el volumen obtenido de cada una ellas, a través de la medición de las variables morfométricas diámetro de tallo a la altura de la base de la planta, largo del tallo desde la superficie del suelo hasta la lígula de la última hoja desplegada, y diámetro de espiga (si poseía). Los valores obtenidos se expresaron por unidad de superficie, relacionando el peso individual promedio de las 10 plantas (g), con la densidad (plantas m<sup>-2</sup>), según la ecuación:

$$MS \text{ acumulada en fitomasa aérea} = \text{PesoIndividualPromedio} * \text{densidad}$$

En estados reproductivos se adicionó la estimación de las espigas mediante la relación entre el diámetro (cm), y peso (g) de la/s espiga/s.

La tasa de crecimiento del cultivo (TCC) en el período crítico se calculó como la diferencia de MS de la fitomasa aérea entre -227 y +100° C día desde la floración (Borrás & Otegui, 2001; Otegui & Bonhomme, 1998). Cuando no se contó con los valores de fitomasa aérea obtenida mediante el modelo alométrico no destructivo en dichas fechas puntuales, se hicieron interpolaciones lineales a fin de estimarla en los días precisos (Andrade *et al.*, 1999).

En estado de floración se estimó el área foliar individual de cada hoja de las plantas seleccionadas a través de la medición del largo (cm) y ancho máximo (cm) de cada hoja, según la ecuación (Stewart & Dwyer, 1999):

$$\text{Área foliar individual} = \text{largo} * \text{ancho máximo} * 0,75$$

El índice de área foliar (IAF) se calculó como la relación entre la sumatoria del área foliar individual y la densidad (plantas m<sup>2</sup>), según la ecuación:

$$IAF = \sum \text{Área foliar individual} * \text{densidad}$$

En madurez fisiológica de los cultivos se determinó la producción de grano por cosecha manual (1,44 m<sup>2</sup>) y posterior trilla con máquina estática de las plantas identificadas de cada parcela. El rendimiento se expresó con 0 % de humedad de los granos. Se evaluó la prolificidad como el número de espigas granadas planta<sup>-1</sup>. A través de una muestra de granos de cada espiga se determinó la humedad (higrómetro, Delver, Argentina) y el peso individual de los granos (PG), (conteo manual y peso de 200 granos de cada espiga). Se estimó el número de granos por unidad de

superficie (NG, granos m<sup>-2</sup>) como la relación entre el rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>), y el PG (mg grano<sup>-1</sup>), según la ecuación:

$$NG = \frac{\text{Rendimiento}}{PG} * 100$$

En madurez fisiológica las plantas identificadas inicialmente se cortaron al ras de suelo y se secaron en estufa hasta alcanzar peso constante para estimar el índice de cosecha (IC), como la relación entre el rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) y la MS de la fitomasa aérea total (kg ha<sup>-1</sup>), según la ecuación:

$$IC = \frac{\text{Rendimiento}}{MS \text{ fitomasa aérea total}} * 100$$

#### d) Evaluaciones en los cultivos de soja

El día 28/10/2011 se sembraron los cultivos de soja variedad comercial DM 3810 y DM 4670 inoculados con *Bradyrhizobium japonicum* en siembra directa. Se establecieron a razón de 17,2 semillas metro lineal<sup>-1</sup> y con un distanciamiento entre las hileras de 0,38 m (452.631 pl ha<sup>-1</sup>).

Luego del establecimiento se seleccionaron e identificaron con estacas de madera numeradas, 10 plantas consecutivas en cada unidad observacional, a las cuales se realizó el seguimiento de los eventos fenológicos a lo largo de la estación de crecimiento (Fehr *et al.*, 1971), de una a tres veces por semana. Se registraron las fechas de emergencia, estados fenológicos vegetativos (V<sub>n</sub>), y estados fenológicos reproductivos cuando el 50% de las plantas alcanzaba dicho estado. A partir de las fechas registradas se calculó la duración del período vegetativo, reproductivo y crítico.

Se midió la MS de la fitomasa aérea en 10 momentos del ciclo de los cultivos mediante muestreos destructivos de 1 m lineal de un surco. Las plantas allí establecidas se cortaron y secaron en estufa hasta alcanzar peso constante. En estado R5 (SJ3810) y plena fructificación (R4) (SJ4670), el día 07/02/12 (93 DDE) se registró la altura en cm de 10 plantas de cada unidad observacional, desde la superficie del suelo hasta el último nudo desarrollado.

Se calculó la TCC en el período crítico para la determinación del rendimiento en grano a través de los valores de MS de fitomasa aérea en R4 y estado de máximo tamaño de semilla (R6). Cuando fue necesario se hicieron interpolaciones lineales para estimarla en esos días precisos (Andrade *et al.*, 1999), luego se calculó la TCC como la diferencia de MS de fitomasa aérea de planta entre dichos momentos (Borrás & Otegui, 2001).

En estadio R8 de los cultivos se determinó la producción de grano por cosecha manual en una superficie de 2,28 m<sup>2</sup> y posterior trilla con máquina estática de las plantas identificadas de cada unidad observacional. A una muestra de granos se le determinó la humedad (higrómetro, Delver, Argentina) y el PG (conteo manual y peso de una muestra de 200 granos). El rendimiento se expresó con 0 % de humedad de los granos. Se estimó el NG (en granos m<sup>-2</sup>) como la relación entre el rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) y el PG (mg grano<sup>-1</sup>), según la ecuación:

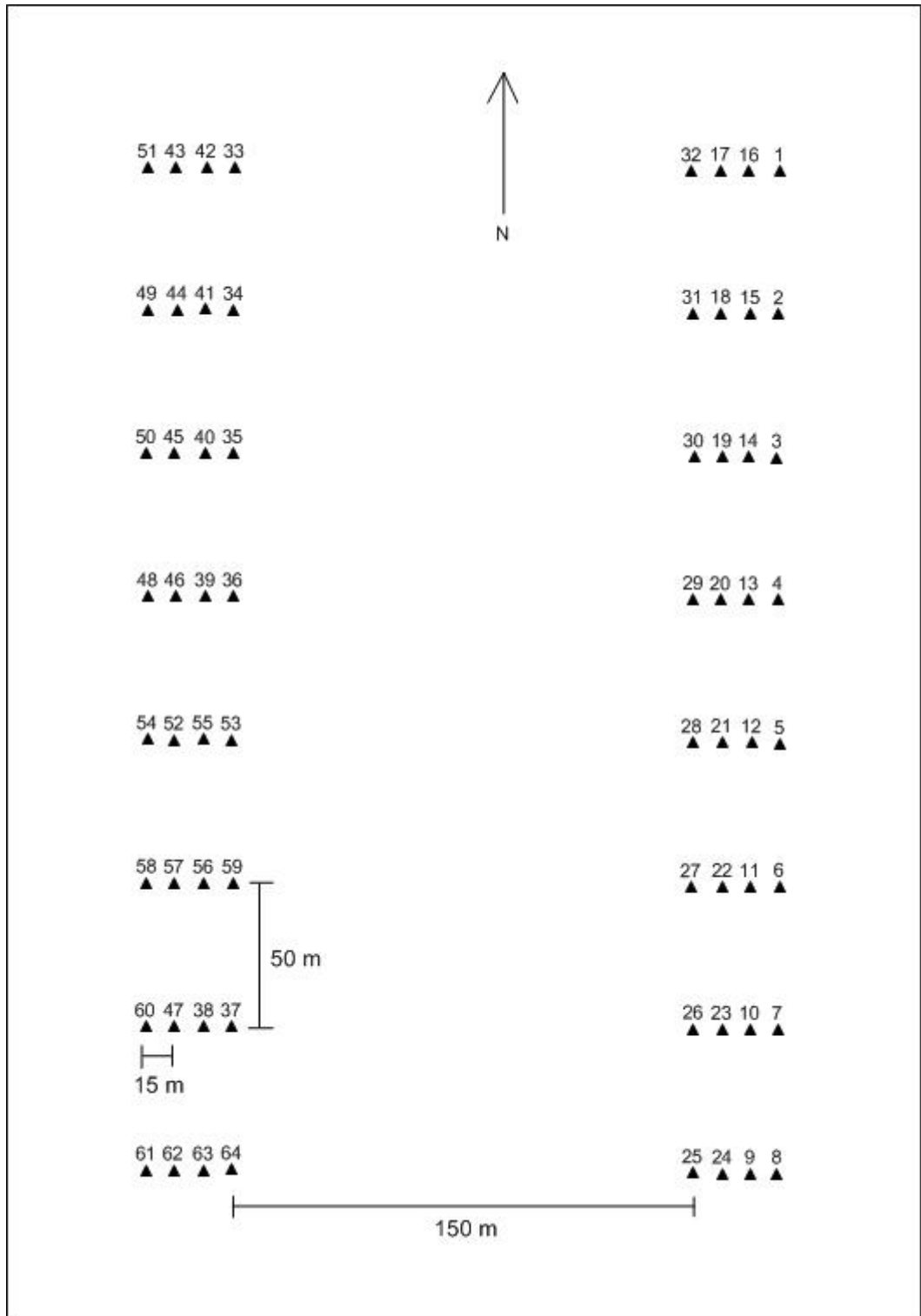
$$NG = \frac{\text{Rendimiento}}{PG} * 100$$

Se estimó el IC como la relación entre el rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>), y la MS de la fitomasa aérea total (kg ha<sup>-1</sup>) en estado comienzo de madurez (R7) y R6 en los tratamientos SJ3810 y SJ4670, respectivamente (14/03/2012, 128 DDE), según la ecuación:

$$IC = \frac{\text{Rendimiento}}{MS \text{ fitomasa aérea total}} * 100$$

### **Diseño experimental**

Se realizó un diseño en grilla compuesta por 64 unidades observacionales, que se denominaron para el tratamiento de cultivos de maíz en fecha de siembra temprana (MZ1°FS): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 y 40, para los cultivos de maíz en fecha de siembra tardía (MZ2°FS): 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, para los cultivos de soja variedad comercial DM 3810 (SJ3810): 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47 y 48, y para los cultivos de soja variedad comercial DM 4670 (SJ4670): 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55 y 56 (Fig. 2).



**Figura 2.** Esquema de la ubicación en el espacio de las unidades observacionales del ensayo.

Los triángulos negros representan las unidades observacionales y el número encima a su identificación.

## Análisis de los datos

Para estudiar la variabilidad de los parámetros en estudio se realizó la distribución de frecuencias y los estadísticos descriptivos: media, mínimo, máximo y coeficiente de variación (CV). Las posibles relaciones entre las propiedades edáficas fueron evaluadas a través del coeficiente de correlación lineal de Pearson entre pares de variables para igual profundidad, y del mismo modo entre las variables edáficas y la cota relativa del terreno.

A las zonas de manejo obtenidas a través del análisis de monitores de rendimientos se evaluaron posibles diferencias en las propiedades edáficas y la altimetría para las zonas de alto y bajo potencial de rendimiento, a través de prueba *t* de Student.

La existencia de dependencia espacial de una variable se define cuando el valor obtenido en un sitio depende de la distancia y/o dirección del obtenido en un sitio vecino (Jaramillo, 2012). La existencia o no de correlación espacial de cada parámetro (edáficas y de cultivos) se evaluó a través índice de Moran. Cuando este último no fue significativo, el tratamiento de los datos se realizó con técnicas de análisis para datos independientes.

En cada tratamiento se evaluó la presencia de variabilidad de la productividad a través del análisis de conglomerados. Las variables consideradas para los cultivos de maíz fueron: MS de la fitomasa aérea en floración (77 y 66 DDE para MZ1°FS y MZ2°FS, respectivamente), IAF, rendimiento en grano, NG, PG, prolificidad e IC; y para los cultivos de soja: MS de la fitomasa aérea en R5, altura de planta (93 DDE), rendimiento en grano, NG, PG e IC. Los conglomerados se realizaron usando la distancia euclídea, a través del método de Ward. El número de conglomerados se definió a partir de la identificación del primer salto de mayor distancia observado en el dendograma (Balzarini *et al.*, 2015).

Se evaluó el efecto de las estrategias de manejo de los cultivos fecha de siembra para maíz, y la elección del grupo de madurez para soja, a través de comparaciones de sus rendimientos en grano con prueba *t* de Student.

Para identificar y jerarquizar el efecto de las propiedades edáficas y la cota relativa del terreno que explicaron la variabilidad en el rendimiento para cada estrategia de manejo de los cultivos de soja y maíz se realizaron distintos análisis. La primera identificación de propiedades se realizó considerando todas las variables evaluadas a través de pruebas de diferencias de medias para cada conglomerado con similar productividad. La prueba de diferencias de medias se realizó con pruebas *t* de Student

para las comparaciones cuando se definieron dos conglomerados, y con ANOVA cuando se definieron tres conglomerados.

Posteriormente se seleccionaron variables teniendo en cuenta las distintas profundidades en las cuales se evaluaron en base al criterio de elevada variabilidad, es decir, se eligieron las que presentaron CV más elevado. Otro criterio fue el de elegir las variables cuyos rangos de valores se encuentran en los que según la bibliografía condicionan la productividad de los cultivos, y el último criterio que se tuvo en cuenta fue que las variables seleccionadas no se interrelacionen entre ellas. Las propiedades seleccionadas por los criterios antes mencionados se relacionaron con la productividad de los cultivos permitiendo identificarlas como influyentes a través de los análisis de componentes principales y de regresión lineal múltiple. Estos últimos proveyeron la herramienta necesaria para la jerarquización de las variables.

Los modelos de regresión lineal múltiple incluyeron a las variables independientes: MO (capa 0-20 cm), pH (40-60 cm), arcilla más limo (40-60 cm), carbonato de Calcio (80-100 cm), humedad a la siembra (0-100 cm), y cota relativa del terreno. Se obtuvieron y graficaron los residuos parciales: en los casos en que la relación entre los residuos parciales y la variable predictora fue lineal, se asumió que la misma podría ser un componente útil del modelo lineal. Se verificó que no existió multicolinealidad y correlación entre las variables a través del coeficiente de correlación de Pearson. Además se eliminaron del análisis los puntos anómalos detectados a través de la distancia de Cook o Leverage. Las variables que se mantuvieron en cada modelo fueron seleccionadas a través del proceso de eliminación de variables backward ( $p < 0,10$ ). La jerarquización de las propiedades identificadas como influyentes en los rendimientos de los cultivos se definió a través del valor de Cp Mallows. El Cp de Mallows para cada término del modelo se calculó de la siguiente manera:

$$Cp = (SCerror_p / CMerror) - (n - 2p)$$

Donde  $SCerror_p$  es la suma de cuadrados del error de un modelo reducido (con  $p$  parámetros incluida la constante) respecto al modelo completo. El modelo reducido contiene todos los términos del modelo completo menos el de la variable que se quiere evaluar. El valor  $CMerror$  es el cuadrado medio de error para el modelo completo y  $n$  el número total de observaciones. Luego, para cada regresora se tiene un indicador de su contribución en el ajuste del modelo propuesto. Si al sacar una regresora el valor Cp se incrementa de forma pronunciada se asume que esa regresora es importante para el ajuste del modelo. El mejor modelo es aquel en el cual el Cp de Mallows sea pequeño y esté cerca del número de predictores del modelo más la constante ( $p$ ).

Los análisis de componentes principales incluyeron a las variables: rendimiento en grano, MS de la fitomasa aérea en floración (maíz) o R5 (soja), MO (capa 0-20 cm), pH (40-60 cm), arcilla más limo (40-60 cm), carbonato de Calcio (80-100 cm), humedad a la siembra (0-100 cm), y cota relativa del terreno, que fueron previamente estandarizadas. Se seleccionaron tantas componentes como fue necesario para que el análisis reconstruya como mínimo el 70 % de la variabilidad total. En cada par de componentes evaluadas se calculó el % de representación de cada variable, tomando como criterio solo concluir acerca de las que están bien representadas en el espacio (porcentaje de representación mínimo 70 %). En los casos donde al menos hay un par de variables bien representadas se muestran los gráficos de las componentes principales.

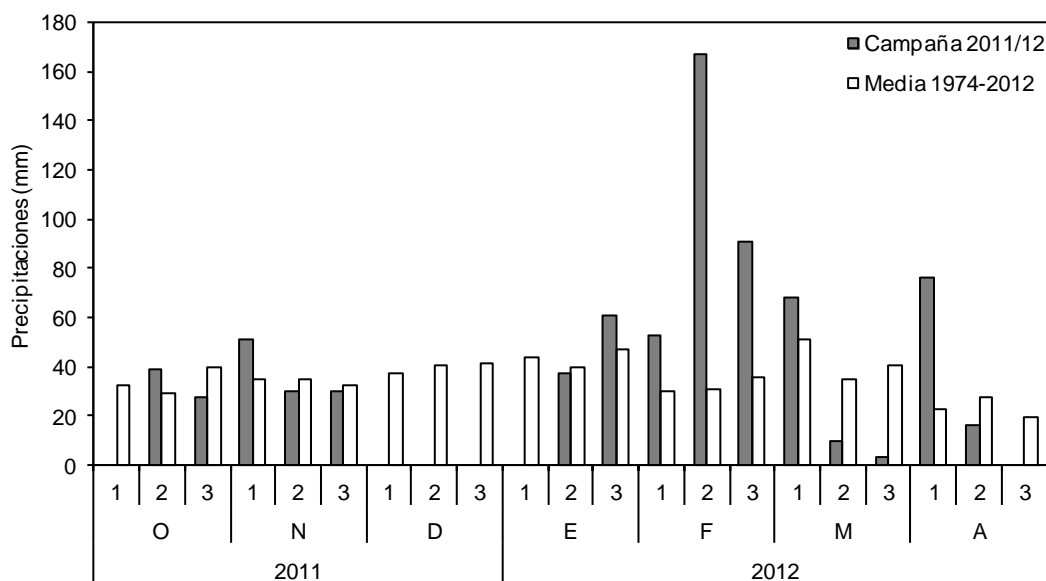
Los análisis se realizaron con el software InfoStat versión 2014 (Di Rienzo *et al.*, 2014) y el software R (R Core Team, 2016).



## Capítulo 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Condiciones climáticas

Las precipitaciones registradas durante el ciclo de los cultivos superaron los 550 mm en todos los tratamientos, con una distribución heterogénea entre ellos a lo largo de la campaña (Fig. 3). Durante el período crítico en los tratamientos MZ1°FS, MZ2°FS, SJ3810 y SJ4670 se registraron 0, 291, 190 y 327 mm, respectivamente. El promedio histórico de precipitaciones durante dicho período en MZ1°FS es de 75 mm. En los restantes tratamientos las precipitaciones fueron mayores a las históricas, siendo para MZ2°FS, SJ3810 y SJ4670 superiores a la media acumulada histórica en 208, 141 y 216 mm, respectivamente.

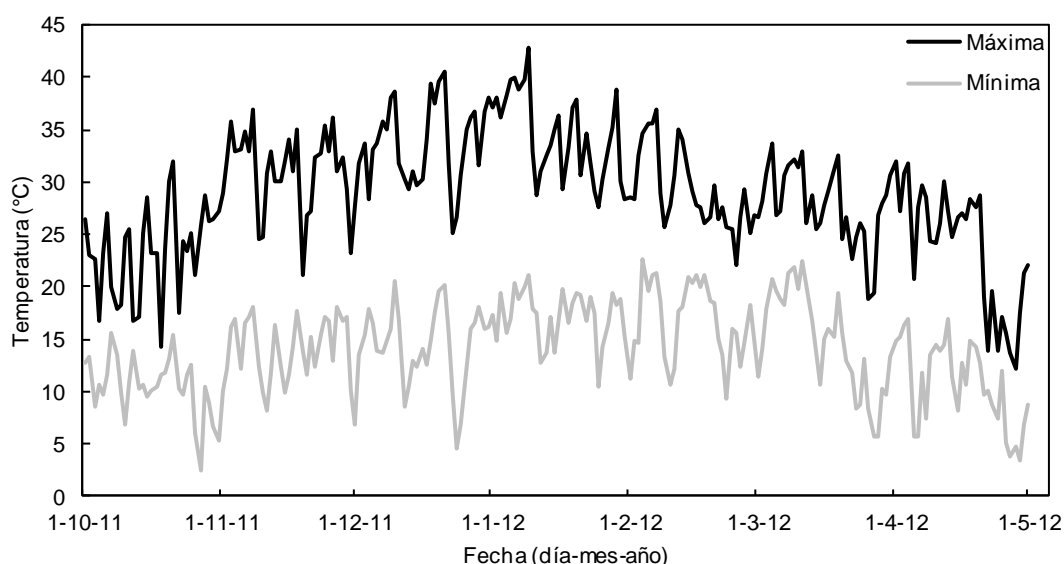


**Figura 3.** Precipitaciones (mm) por décadas durante la campaña 2011/12 y medias del período 1974 a 2012. (Fuente: Estación Meteorológica EEA INTA General Villegas). O: octubre. N: noviembre. D: diciembre. E: enero. F: febrero. M: marzo. A: abril.

La temperatura media mínima diaria durante el ciclo de los cultivos varió entre 2,5 y 22,7° C con un valor medio de 13,9° C, en tanto la temperatura media máxima diaria varió entre 12,2 y 42,9° C con un valor medio de 29,0° C (Fig. 4). Las temperaturas medias diarias durante el período crítico de los cultivos fueron de 24,8, 22,3, 23,6 y 22,7° C para los tratamientos MZ1°FS, MZ2°FS, SJ3810 y SJ4670, respectivamente.

Los cultivos de maíz del tratamiento MZ1°FS estuvieron expuestos a una temperatura menor durante el período vegetativo respecto a MZ2°FS (21,1 versus

25,3° C), y el caso contrario ocurrió durante el período reproductivo (24,0 versus 19,2° C). En los cultivos de soja durante la etapa vegetativa la temperatura media diaria fue igual entre los tratamientos, y durante las etapas reproductivas se observó una diferencia media de entre 0,4 y 1,1° C.



**Figura 4.** Temperaturas (°C) máximas y mínimas diarias registradas durante la campaña 2011/12.

La RSG acumulada en el ciclo de los cultivos varió entre 1111 y 1929 MJ m<sup>-2</sup> (Tabla 1). Para el caso de maíz el atraso en la fecha de siembra ubicó a los cultivos frente a una menor oferta de RSG, tanto en la etapa vegetativa como en la reproductiva. Sin embargo, debido a la mayor temperatura durante el crecimiento vegetativo en siembras tardías (Fig. 4), la intercepción de la radiación fue mayor respecto a las siembras tempranas (Cirilo & Andrade, 1994). En los cultivos de soja la mayor diferencia entre tratamientos se registró durante la etapa reproductiva, donde SJ4670 recibió la mayor RSG, dado por la mayor longitud de su etapa reproductiva, respecto a SJ3810 (Tabla 1).

**Tabla 1.** Radiación solar global media acumulada (MJ m<sup>-2</sup>) durante el período vegetativo y reproductivo de los tratamientos MZ1°FS, MZ2°FS, SJ3810 y SJ4670.

	MZ1°FS		MZ2°FS		SJ3810		SJ4670	
	PV	PR	PV	PR	PV	PR	PV	PR
RSG	1419	1700	1186	1418	1111	1489	1126	1929

RSG: radiación solar global. MZ1°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra temprana (03/10/2011). MZ2°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (13/12/2011). SJ3810: cultivos de soja variedad comercial DM 3810. SJ4670: cultivos de soja variedad comercial DM4670. PV: período vegetativo. PR: período reproductivo.

## Relevamiento planialtimétrico

Las unidades observacionales presentaron una diferencia altimétrica de hasta 30,9 cm, siendo las unidades observacionales 48 y 27 las ubicadas en el sector más elevado y bajo del sitio, respectivamente. La pendiente general del lote fue de 0,08 % con dirección NO-SE (Fig. 5) y la cota relativa presentó dependencia espacial ( $p < 0,01$ , índice de Moran= 0,61).



**Figura 5.** Mapa de alturas relativas (cm) del ensayo experimental.

Las líneas blancas unen puntos de igual altura del terreno. La mayor intensidad del color negro corresponde a la menor altura del terreno. Los triángulos representan a las unidades observacionales. Escala en cm.

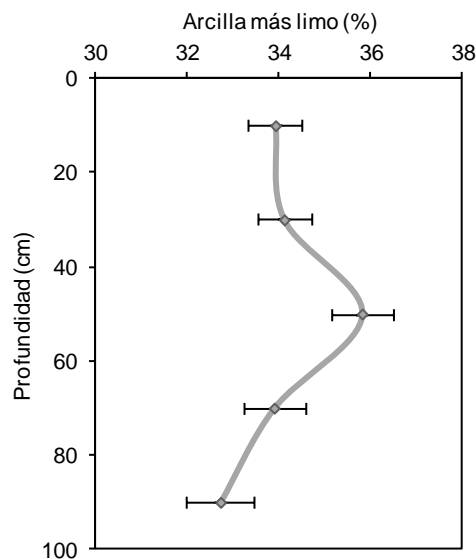
La escasa diferencia altimétrica es una característica del relieve de la zona que impide el escurrimiento superficial de los excesos hídricos, generando zonas con

encharcamientos durante períodos de tiempo prolongados. En este sentido, se observó una relación lineal negativa entre la cota relativa del terreno y los días en que el suelo se encontró saturado de agua durante el mes de marzo. El mejor ajuste de la relación se obtuvo al no incluir las unidades observacionales que no estuvieron inundadas ( $p < 0,01$ ,  $R^2 = 0,73$ ), y se correspondió con valores de cota relativa de 9,8 cm o menores.

## Propiedades edáficas

### Granulometría y textura

La proporción de arena varió entre 55,4 y 79,4 %, el limo entre 14,6 y 43,6 % y la arcilla entre 2,0 y 20,0 %, considerando todas las capas evaluadas hasta los 100 cm de profundidad del suelo. Los valores medios de arcilla más limo fueron de 33,9, 34,1, 35,8, 33,9, y 32,7 para las capas de 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 y 80-100 cm, respectivamente (Fig. 6). El tamaño de partículas que presentó la mayor variabilidad fue el contenido de arcilla ( $CV = 37$  a  $43$  % según la capa) y en menor medida el de arena ( $CV = 7$  a  $9$  %). La variable arcilla más limo presentó dependencia espacial ( $p < 0,01$ , índice de Moran de entre 0,44 y 0,51, según la capa).



**Figura 6.** Contenido medio de arcilla más limo (%) de 64 unidades observacionales, agrupadas por profundidad.

Las barras horizontales corresponden al error estándar de los datos.

El 80 % de las unidades observacionales evaluadas presentaron en la capa superficial textura franco arenosa, y los casos restantes textura arenosa franco. Las capas de suelo que presentaron textura franco arenosa se encontraron adyacentes a capas arenoso franco. A excepción de las unidades observacionales 33, 34, 48, 49, 63 y 64 que presentaron textura arenosa franca en el total del perfil de suelo evaluado (0-100 cm). Las texturas finas pueden generar limitaciones en el movimiento del agua, y en contraposición cuando predominan partículas de tamaño grande se reduce la capacidad de almacenaje de agua de los suelos (Rubio & Taboada, 2013). Por lo tanto, el patrón de precipitaciones anuales puede mitigar o exacerbar necesidad de suministro de agua del suelo para cubrir la demanda de los cultivos (Yang *et al.*, 2003).

### **Materia orgánica**

El contenido de MO en la capa superficial varió entre 1,2 y 2,1 %, con un valor medio de 1,6 % (CV= 14 %). Estos resultados coinciden con datos relevados en 2005 y 2006 por Sainz Rozas *et al.* (2011) quienes reportaron para lotes agrícolas de la región del noroeste bonaerense valores de entre 0,95 y 1,95 %.

La MOP varió entre 0,02 y 0,18 %, con un valor medio de 0,09 % (CV= 43 %). Dicha fracción representó entre el 0,03 y 6,31 % de la MO de la capa superficial. La MOP corresponde al material orgánico más joven, lábil y activo del suelo, y representa una fuente de energía primaria para los organismos heterótrofos y una reserva de nutrientes (Galantini & Suñer, 2008).

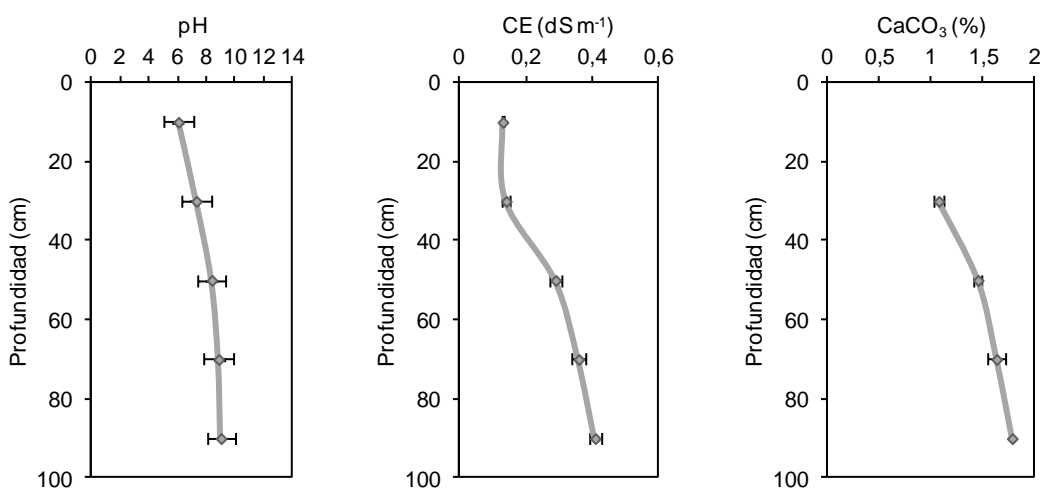
El IMO varió entre 3,3 y 9,7, con un valor medio de 4,9 (CV= 20 %) y en el rango de datos explorados se observó una relación lineal entre la MO y el contenido de arcilla más limo ( $p < 0,01$ ), con escaso poder de predicción ( $R^2 = 0,17$ ).

### **Reacción del suelo, salinidad y carbonato de Calcio**

El pH superficial varió entre 5,4 y 7,2 (CV= 6 %), y en el 58 % de las unidades observacionales los valores se encontraron dentro del rango óptimo (6 a 7,5) para los cultivos agrícolas predominantes de la región (Sainz Rozas *et al.*, 2011). En las capas subsuperficiales se observó que el pH presentó la menor variabilidad entre las unidades observacionales y sus valores medios alcanzaron magnitudes que en algunos casos pueden afectar a los cultivos (Sainz Rozas *et al.*, 2011) (Fig. 7).

La CE varió entre 0,1 a 0,2 dS m<sup>-1</sup> (CV= 18 %), (Fig. 7). En un número mínimo de casos la CE alcanzó valores perjudiciales para los cultivos (Salvatierra *et al.*, 2013, Doran & Jones, 1996), en su mayoría fue en las capas más profundas donde existe menor densidad de raíces, y por lo tanto el efecto perjudicial sería de menor magnitud (Mass & Hoffman, 1977).

El contenido de carbonato de Calcio varió entre 0,61 y 4,33 % (Fig. 7) y los valores obtenidos se encontraron dentro del rango común para el loess argentino (0 al 8 %) que en su mayoría contiene aproximadamente 2 % (Teruggi, 1957). Esta propiedad presentó correlación espacial en todas las capas evaluadas ( $p < 0,09$ ) de baja magnitud (índice de Moran entre 0,01 y 0,16, según la capa). En la región pampeana el carbonato de Calcio se presenta bajo la forma de concreciones y panes endurecidos ó como partículas distribuidas en la masa de los sedimentos (Teruggi, 1957). Los valores registrados en el presente trabajo corresponden a esta última presentación.



**Figura 7.** Valores medios de las propiedades químicas: pH, CE y CaCO<sub>3</sub>, de 64 unidades observacionales, agrupadas por profundidad.

pH en relación suelo:agua 1:2,5, CE: conductividad eléctrica en relación suelo:agua 1:2,5. CaCO<sub>3</sub>: carbonato de Calcio. Las barras horizontales corresponden al error estándar de los datos.

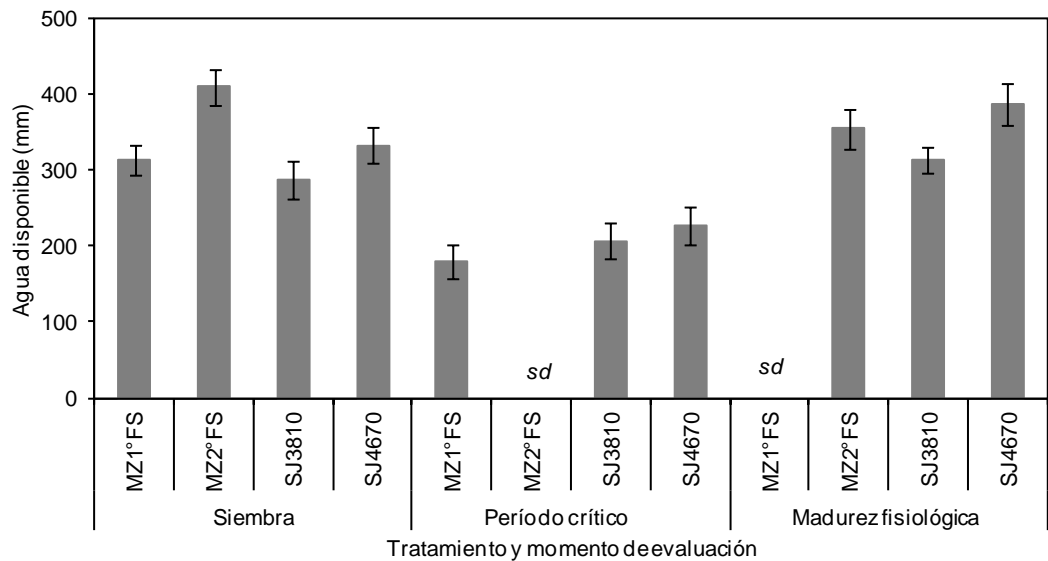
### Humedad edáfica

Al momento de la siembra de los cultivos, para el tratamiento MZ1°FS (03/10/2011) el AD en el suelo hasta los 200 cm de profundidad varió entre 156 y 425 mm, para los cultivos de soja (28/10/2011) entre 143 y 203 mm, y para MZ2°FS (13/12/2011) el AD varió entre 212 y 508 mm (Fig. 8). En al menos una unidad observacional de cada tratamiento no fue posible extraer la muestra de suelos hasta los 200 cm de profundidad por la presencia de una plancha de tosca, o por un bajo contenido hídrico

donde la consistencia fue muy duro en seco. En todos los tratamientos se observó variabilidad entre las unidades observacionales en el AD a la siembra, con CV de 25, 23, 35 y 27 % para MZ1°FS, MZ2°FS, SJ3810 y SJ4670, respectivamente.

En el período crítico de los cultivos en los tratamientos MZ1°FS, SJ3810 y SJ4670 el agua disponible hasta los 200 cm de profundidad varió entre 84 y 108, 89 y 207 y 93 y 228 mm, respectivamente (Fig. 8). Los contenidos hídricos en dicho momento fueron inferiores a los registrados a la siembra debido al consumo de los cultivos y las escasas precipitaciones registradas. En este sentido, Calviño *et al.* (2003) establecen que las precipitaciones alrededor de la floración (-30 y +20 días) es una variable de gran peso para la predicción de los rendimientos de maíz en la región pampeana. Se destaca la mayor variabilidad en el contenido hídrico entre las unidades observacionales en el período crítico (CV de 48, 45 y 45 % para MZ1°FS, SJ3810 y SJ4670, respectivamente), respecto a la evaluación realizada al momento de la siembra. A causa de las abundantes precipitaciones registradas en la segunda década de febrero (Fig. 3), el suelo en los sectores más bajos del ensayo se saturaron de humedad y en algunos casos se observó agua libre en superficie. Lo que impidió la toma de muestras en período crítico del tratamiento MZ2°FS, ya que el suelo se encontraba saturado de humedad.

En madurez fisiológica de los cultivos el AD hasta los 200 cm de profundidad del suelo varió entre 224 y 537, 205 y 431, y 226 y 564 mm en los tratamientos MZ2°FS, SJ3810 y SJ4670, respectivamente (Fig. 8). En los tratamientos con cultivos de soja se observó una recarga de los perfiles de suelo y una menor variabilidad entre las unidades observacionales, respecto a las determinaciones realizadas durante el período crítico (CV de 22 y 28 % para SJ3810 y SJ4670, respectivamente). Noretto *et al.* (2009) definieron la profundidad óptima de la capa freática para los cultivos de maíz y soja, en un rango entre 140 a 245 cm y entre 120 a 220 cm, respectivamente. Por lo tanto, en este estudio el agua de la capa freática se ubicó dentro del rango óptimo al momento de la siembra de los cultivos. En el período crítico de MZ2°FS, SJ3810 y SJ4670 algunas unidades observacionales presentaron valores por encima de dichos umbrales.



**Figura 8.** Contenido de agua disponible (mm) en el suelo hasta los 200 cm de profundidad, promedio de cada tratamiento, agrupados por momento de evaluación.

MZ1°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra temprana (03/10/2011). MZ2°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (13/12/2011). SJ3810: cultivos de soja variedad comercial DM 3810. SJ4670: cultivos de soja variedad comercial DM 4670. Las líneas verticales representan el desvío estándar de los datos. sd: sin determinar.

## Relaciones entre las variables evaluadas

### a) Relaciones entre las propiedades edáficas

En la capa superficial del suelo se observó una relación positiva entre la granulometría (contenido de arcilla más limo) y la MO, explicada principalmente por el componente MOM, que presentó igual relación (Tabla 2). En el total del perfil de suelo evaluado no se registró relación entre el contenido de arcilla más limo y el pH, en tanto la CE presentó correlación en la capa 40-60 cm. Respecto al contenido de carbonato de Calcio se observó una correlación positiva con la granulometría, en las capas comprendidas entre 40 y 100 cm de profundidad (Tabla 2). En este sentido, Allison *et al.* (1954) establecen que cantidades considerables de carbonatos alcalino-térreos tienen influencia en la textura del suelo, por el tamaño de sus partículas semejante a los limos.



**Tabla 2.** Coeficientes de correlación de Pearson y significación entre la suma de arcilla más limo y las propiedades químicas, según la profundidad del suelo (iguales en los pares de variables), de 64 unidades observacionales.

Variable	Variable	Profundidad (cm)	Coefficiente	P valor	
Arcilla más limo	MO	0-20	0,29	0,02	
	MOP	0-20	0,18	0,16	
	MOM	0-20	0,27	0,03	
	pH		0-20	-0,04	0,77
			20-40	0,08	0,54
			40-60	0,17	0,17
			60-80	0,01	0,91
			80-100	-0,01	0,91
	CE		0-20	-0,18	0,19
			20-40	0,20	0,12
			40-60	0,34	0,01
			60-80	0,19	0,14
			80-100	0,16	0,21
	CaCO <sub>3</sub>		20-40	0,14	0,27
			40-60	0,27	0,03
		60-80	0,49	<0,01	
		80-100	0,39	<0,01	

MO: materia orgánica. MOM: materia orgánica de la fracción mineralizable. MOP: materia orgánica de la fracción particulada. pH: pH en relación suelo:agua 1:2,5. CE: conductividad eléctrica en relación suelo:agua 1:2,5. CaCO<sub>3</sub>: carbonato de Calcio.

En la capa superficial del suelo se registró correlación positiva de la MO respecto a la MOP, y estos parámetros no se correlacionaron con el pH, ni con la CE (Tabla 3). No se calcularon los coeficientes de correlación entre el IMO y la granulometría, como así tampoco entre el IMO y la MO, ya que los contenidos de arcilla y de limo, y de MO forman parte del cálculo de dicho índice. Estos resultados sugieren la conveniencia de evaluar alternativas de modelos de regresión lineal múltiple, solo con MO, MOP ó IMO, ya que la inclusión de las tres variables en un único modelo lineal sería redundante.

**Tabla 3.** Coeficientes de correlación de Pearson (triángulo inferior) / Significación (triángulo superior), entre las propiedades químicas evaluadas en la capa superficial (0-20 cm) de 64 unidades observacionales.

Variable	MO	MOP	pH	CE
MO	-	0,01	0,11	0,96
MOP	0,32	-	0,80	0,38
pH	-0,20	-0,03	-	0,08
CE	-0,01	0,11	0,22	-

MO: materia orgánica. MOP: materia orgánica de la fracción particulada. IMO: índice de materia orgánica. pH relación suelo:agua 1:2,5. CE: conductividad eléctrica relación suelo:agua 1:2,5.

El pH se correlacionó positivamente con la CE en todas las capas evaluadas (Tabla 3 y 4), y con el contenido de carbonato de Calcio en la capa de 20-60 cm de profundidad (Tabla 4). A su vez el contenido de carbonato de Calcio presentó una relación positiva con la CE (Tabla 4). Estos resultados permitieron definir al pH y carbonato de Calcio para integrar alternativas de modelos de regresión lineal múltiple. Descartando a la CE por presentar correlación con las restantes variables medidas y encontrarse en valores por debajo de los umbrales de restricción a los cultivos.

**Tabla 4.** Coeficientes de correlación de Pearson y significación entre las propiedades químicas: pH, CE y CaCO<sub>3</sub>, según la profundidad del suelo de 64 unidades observacionales.

Variable	Variable	Profundidad (cm)	Coefficiente	P valor
pH	CE	20-40	0,62	<0,01
		40-60	0,69	<0,01
		60-80	0,68	<0,01
		80-100	0,53	<0,01
pH	CaCO <sub>3</sub>	20-40	0,34	0,01
		40-60	0,32	0,01
		60-80	0,23	0,06
		80-100	0,11	0,37
CE	CaCO <sub>3</sub>	20-40	0,53	<0,01
		40-60	0,32	0,01
		60-80	0,27	0,03
		80-100	0,33	<0,01

pH: pH en relación suelo:agua 1:2,5. CE: conductividad eléctrica en relación suelo:agua 1:2,5. CaCO<sub>3</sub>: carbonato de Calcio.

#### *b) Relaciones entre las propiedades edáficas y la altimetría*

Se observó correlación significativa entre la cota relativa y las variables MO, MOP, MOM e IMO, esta última con sentido positivo y para las restantes la correlación presentó sentido negativo (Tabla 5). El porcentaje de arcilla más limo, en todas las capas evaluadas, presentó correlación negativa con la altimetría, como así también con el carbonato de Calcio de las capas 40-60 y 60-80 cm de profundidad (Tabla 5).

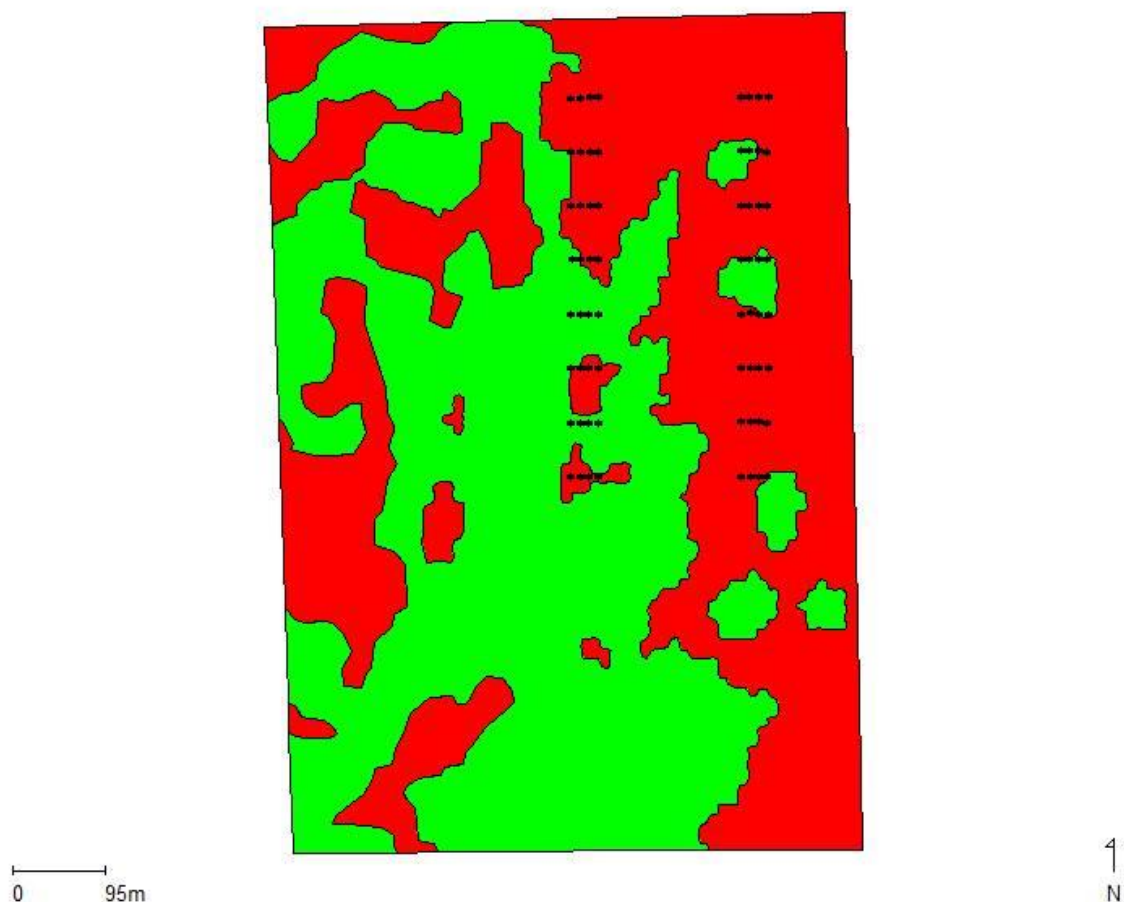
**Tabla 5.** Coeficientes de correlación de Pearson y significación entre la cota relativa del terreno y las propiedades edáficas: MO, MOP, MOM, IMO, arcilla más limo, pH, CE y CaCO<sub>3</sub>, según la profundidad del suelo de 64 unidades observacionales.

Variable	Variable	Profundidad (cm)	Coeficiente	P valor	
Cota relativa	MO	0-20	-0,24	0,06	
	MOP	0-20	-0,23	0,06	
	MOM	0-20	-0,27	0,03	
	IMO	0-20	0,27	0,03	
	Arcilla más limo		0-20	-0,58	<0,01
			20-40	-0,49	<0,01
			40-60	-0,43	<0,01
			60-80	-0,42	<0,01
			80-100	-0,45	<0,01
	pH		0-20	0,11	0,40
			20-40	0,09	0,50
			40-60	-0,04	0,75
			60-80	0,01	0,94
			80-100	0,14	0,28
	CE		0-20	0,04	0,75
			20-40	-0,03	0,83
			40-60	-0,09	0,49
			60-80	0,02	0,89
			80-100	0,07	0,58
	CaCO <sub>3</sub>		20-40	-0,08	0,52
		40-60	-0,25	0,04	
		60-80	-0,25	0,05	
		80-100	-0,20	0,11	

MO: materia orgánica. MOP: materia orgánica de la fracción particulada. MOM: materia orgánica de la fracción mineralizable. IMO: índice de materia orgánica. pH en relación suelo:agua 1:2,5. CE: conductividad eléctrica en relación suelo:agua 1:2,5. CaCO<sub>3</sub>: carbonato de Calcio.

### Zonas de manejo delimitadas con monitores de rendimiento

Se definieron dos zonas de manejo denominadas como de alto potencial y bajo potencial de rendimiento. Las mismas se distribuyeron en el espacio en forma de mosaico y presentaron similar superficie. La zona de alto potencial de rendimiento posee una superficie de 26,02 has y contiene al 33 % de las unidades observacionales (4, 5, 12, 13, 18, 20, 29, 31, 37, 38, 43, 46, 47, 48, 49, 52, 53, 54, 55, 58 y 60), y la de bajo potencial de 23,98 has e incluye a las restantes de unidades (1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 50, 51, 56, 57, 59, 61, 62, 63 y 64), (Fig. 9).



**Figura 9.** Mapa de zonas de manejo de alto y bajo potencial de rendimiento, de un lote del establecimiento “Don Ferdinando” (Elordi, General Villegas, Argentina). Los colores indican la zona de potencial de rendimiento: verde (alto potencial) y rojo (bajo potencial). Los puntos negros representan la ubicación de las unidades observacionales.

El rendimiento de los cultivos en la zona de alto potencial fue de 2910, 6792 y 2966 kg ha<sup>-1</sup> en las campañas de soja 2008/09, sorgo 2009/10 y soja 2010/11, respectivamente. Lo que representó, respectivamente, un 100, 17 y 42 % más de rendimiento respecto a la zona de bajo potencial para las campañas antes mencionadas.

La zona de manejo de alto potencial delimitada con monitores de rendimiento (Fig. 7) se ubicó en la posición más elevada del relieve (Fig. 5) y presentó textura gruesa en profundidades menores a 40 cm, respecto a la zona de manejo de bajo potencial (Tabla 6). La CE de la capa 20-40 cm de profundidad también presentó diferencias entre zonas de manejo (Tabla 6) pero los valores fueron normales.

**Tabla 6.** Propiedades edáficas según zonas de manejo de alto y bajo potencial de rendimiento.

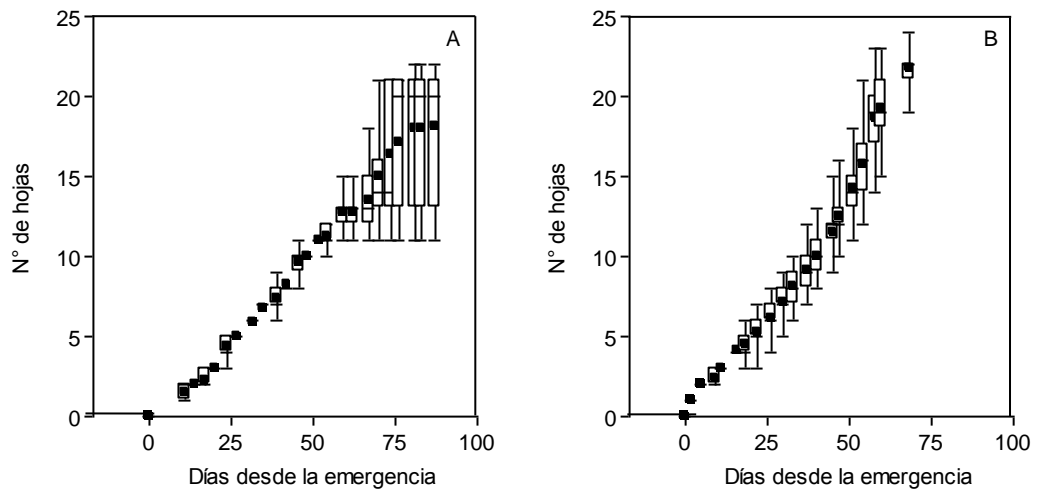
Variables	Unidad	Profundidad	Zona de manejo		p valor
			AP	BP	
Materia orgánica	%	0-20	1,57	1,63	0,27
Arcilla más limo	%	0-20	31,66	34,13	0,03
		20-40	32,39	34,93	0,02
		40-60	34,33	36,52	0,12
		60-80	32,28	34,66	0,10
		80-100	31,53	33,29	0,26
pH	-	0-20	6,04	6,02	0,85
		20-40	7,20	7,31	0,56
		40-60	8,41	8,33	0,69
		60-80	8,92	8,81	0,44
		80-100	9,09	8,96	0,33
Conductividad eléctrica	dS m <sup>-1</sup>	0-20	0,13	0,13	0,97
		20-40	0,11	0,16	0,03
		40-60	0,27	0,29	0,57
		60-80	0,38	0,35	0,46
		80-100	0,45	0,39	0,23
Carbonato de Calcio	%	20-40	1,05	1,08	0,64
		40-60	1,43	1,47	0,69
		60-80	1,62	1,63	0,94
		80-100	1,76	1,79	0,86
Cota relativa	cm		11,34	8,53	0,10

AP: alto potencial. BP: bajo potencial. pH en relación suelo:agua 1:2,5. CE: conductividad eléctrica en relación suelo:agua 1:2,5.

## Cultivos de maíz

### a) Fenología

Los cultivos de maíz del tratamiento MZ1°FS presentaron una menor tasa de desarrollo durante el período vegetativo, y como consecuencia una mayor duración respecto a la siembra tardía (77 versus 66 días), y el caso contrario ocurrió con la tasa y la duración del período reproductivo (63 versus 67 días, Fig. 10). El desarrollo fenológico de los cultivos de maíz presentó mayor variabilidad en el tratamiento MZ1°FS, respecto a MZ2°FS. Particularmente para MZ1°FS los mayores CV en la fenología se registraron entre los estadios de V12 a V14 (52 a 110 DDE). Lo que podría evidenciar efectos de estrés hídrico, ya que las precipitaciones durante dicho período fueron muy escasas (Fig. 3).



**Figura 10.** Número de hojas expandidas en función de los días desde la emergencia, de 16 unidades observacionales de los tratamientos: A. MZ1°FS. B. MZ2°FS.

MZ1°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra temprana (fecha de emergencia: 14/10/2011). MZ2°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (fecha de emergencia 18/12/2011). Los cuadrados corresponden al valor medio de los datos, los extremos de las líneas al cuantil 0,05 y 0,95, y los extremos de las cajas a los cuantiles 0,25 y 0,75.

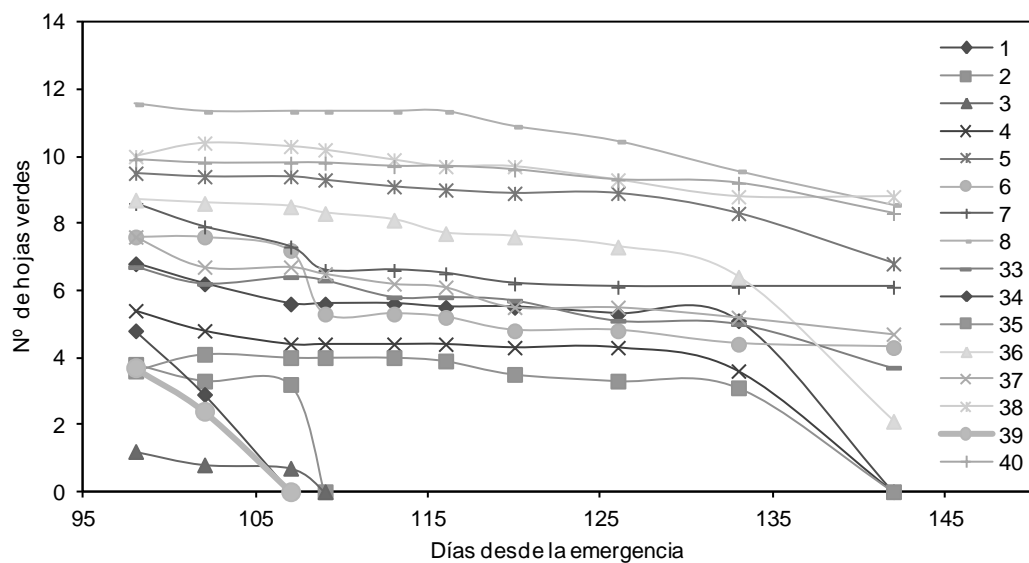
En MZ1°FS la floración masculina (junto con el despliegue de la totalidad de hojas diferenciadas) se registró entre los 81 y 90 DDE en las unidades observacionales 5, 7, 8, 36, 38, y 40. En las restantes, los cultivos detuvieron el crecimiento hasta el evento de precipitaciones de 26 mm del día 12/01/12, y posteriormente florecieron todas las plantas en las parcelas 1, 33 y 37. Sólo algunas plantas (sin alcanzar el promedio de 20 hojas desplegadas) florecieron en las unidades observacionales 2, 3, 4, 6, 34, 35 y 39, y el efecto más severo se observó en la parcela 3 donde ninguna planta panojó. En cuanto a la floración femenina, sólo en la unidad observacional 8 todas las plantas espigaron, y lo hicieron en promedio 5 días después de la floración masculina. En las parcelas 36 y 38, 5 y 40 solo algunas plantas espigaron con una asincronía media entre la floración masculina y femenina de 9 y 18 días, respectivamente. La asincronía en el desarrollo de ambas inflorescencias disminuye las posibilidades de fecundación de las espiguillas (Cárcova *et al.*, 2003), y junto con el aborto de granos de las flores retrasadas (Otegui *et al.*, 1995), generaría un menor NG en las situaciones bajo estrés.

En el tratamiento MZ2°FS el desarrollo fenológico de los cultivos presentó baja variabilidad entre las unidades observacionales. A los 68 DDE todas las plantas desplegaron un promedio 22 hojas totales, en coincidencia con la fecha media de floración masculina (Fig. 10). La floración femenina se registró 3 días después (+/- 1 día). Por lo tanto, la sincronía floral fue adecuada, asegurando la disponibilidad de polen viable para los estigmas receptivos. A los 63 DDE ocurrió un evento de precipitación (80 mm) que produjo el anegamiento del suelo en los sectores más bajos

del ensayo, sin producir efectos sobre la fenología de los cultivos. Estos resultados coinciden con los encontrados por Zaidi *et al.* (2004), donde un estrés por exceso hídrico en estado de panojamiento ó emergencia de los estigmas no produjo cambios en el intervalo entre la floración masculina y femenina.

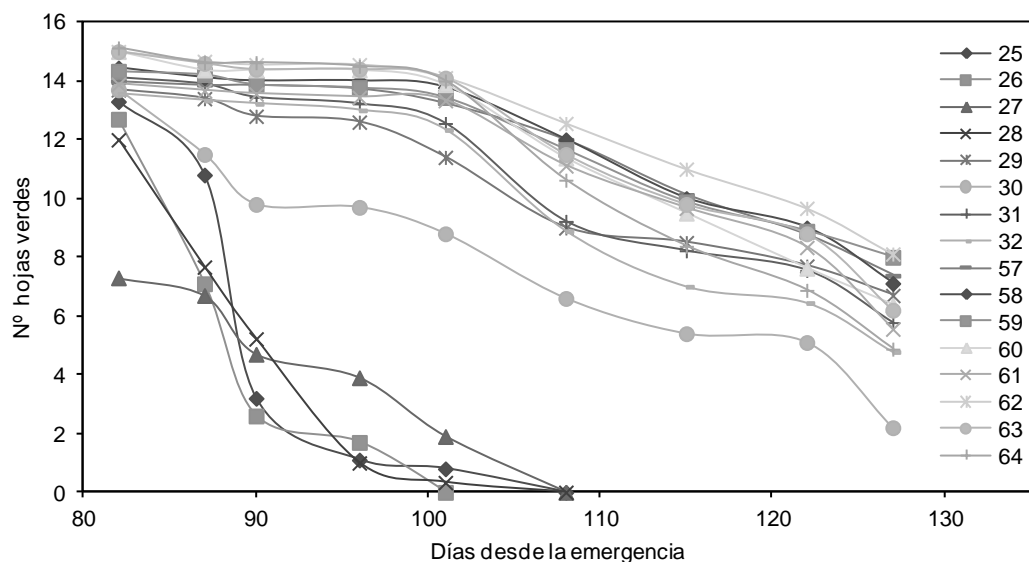
La senescencia de las hojas a partir de los 80 DDE presentó una elevada variabilidad en los tratamientos evaluados (Fig. 11 y 12) por causas contrapuestas, como la sequía y el anegamiento, en MZ1°FS y MZ2°FS, respectivamente.

Los cultivos de maíz en condiciones de estrés por déficit hídrico presentan síntomas visibles como marchitamiento o enrollamiento de las láminas foliares, si la sequía persiste las hojas se secan y la planta finalmente muere (Golberg *et al.*, 2011). En las condiciones de este estudio para el tratamiento MZ1°FS se observó que la senescencia de las hojas presentó diferente comportamiento según la unidad observacional (Fig. 11), posiblemente por diferente magnitud y duración del estrés hídrico. En las parcelas 2, 3, 34 y 39 se observó el menor número de hojas verdes y las plantas murieron a los 99 DDE. Las unidades observacionales 4 y 35 tuvieron igual tendencia que las anteriores, y en situación intermedia se ubicaron las parcelas 1, 6, 7, 37 y 33. En contraposición, las unidades observacionales que llegaron a construir grano, permanecieron con al menos 6 hojas verdes hasta los 140 DDS y se ubicaron en la zona con mayor número de hojas verdes y la parcela 36 presentó una condición inferior a las anteriores (Fig. 11).



**Figura 11.** Número de hojas verdes en función de los días desde la emergencia (14/10/2011), de 16 unidades observacionales de los tratamientos cultivos de maíz de fecha de siembra temprana.

Para el tratamiento MZ2°FS, en las unidades observacionales (25, 26, 27, 28, 29, 30 y 31) donde el suelo se saturó de agua, se observaron los síntomas característicos de las plantas sensibles, tales como la disminución en la tasa de crecimiento y menor biomasa aérea acumulada, engrosamiento de los tallos, epinastía (plantas con tallos caídos), senescencia prematura de hojas (Fig. 12), y formación de raíces adventicias (Golberg *et al.*, 2011). En las unidades observacionales 25, 26, 27 y 28 se produjo la senescencia de las plantas en aproximadamente 25 días de encontrarse el suelo saturado. La unidad observacional 30 tuvo un comportamiento similar a las anteriores pero menos acentuado ya que se encontró menos días afectada por dicho proceso (Fig. 12). Las restantes unidades observacionales se encontraban en posiciones elevadas del relieve lo que impidió que el suelo se encontrara saturado durante períodos prolongados. En este sentido, bajo anegamiento durante 10 días en estado de panojamiento, Zaidi *et al.* (2004) observaron una mortalidad de plantas de 32,6 % respecto a la condición normal. En los casos sin estrés por exceso de agua desde los 82 hasta los 101 DDE se observó un promedio de 14 hojas verdes que disminuyó a tasa aproximadamente constante ( $0,05 \text{ hojas día}^{-1}$ ). A partir de 101 DDE hasta la última fecha de evaluación, el número de hojas verdes disminuyó a razón de  $0,27 \text{ hojas día}^{-1}$  (Fig. 12).

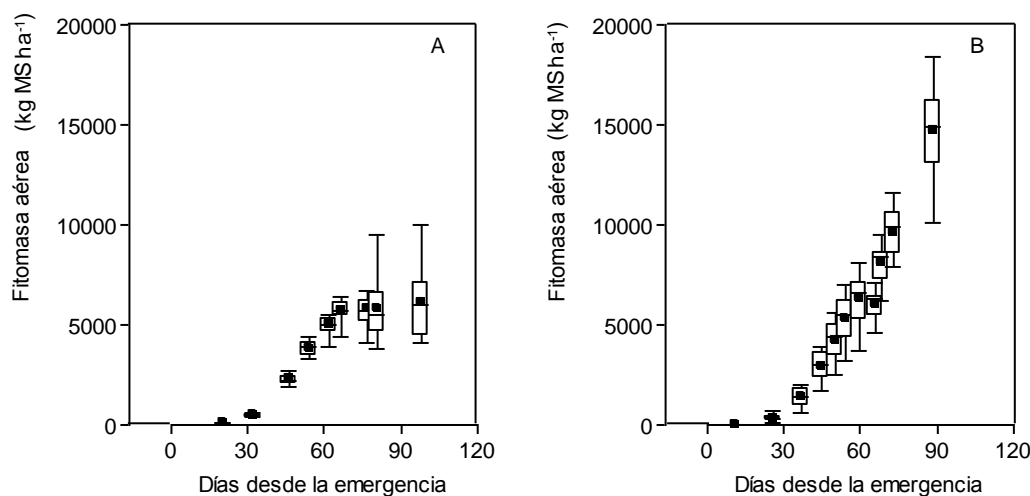


**Figura 12.** Número de hojas verdes en función de los días desde la emergencia (18/12/2011), de 16 unidades observacionales de los tratamientos cultivos de maíz de fecha de siembra tardía.



b) Fitomasa aérea y tasa de crecimiento de los cultivos

La fitomasa aérea de los cultivos de maíz presentó elevada variabilidad en ambos tratamientos y en todas las fechas evaluadas (Fig. 13). El tratamiento MZ2°FS acumuló mayor cantidad de fitomasa aérea respecto a MZ1°FS. Esta diferencia podría deberse al déficit hídrico registrado en MZ1°FS, ya que la acumulación de biomasa es afectada por el estado hídrico de los cultivos (Otegui *et al.*, 1995).



**Figura 13.** Fitomasa aérea acumulada (Kg MS ha<sup>-1</sup>) en función de los días desde la emergencia de 16 unidades observacionales del tratamiento: A. cultivos de maíz de fecha de siembra temprana (emergencia: 14/10/2011). B. cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (emergencia: 18/12/2011).

MS: materia seca. Los puntos cuadrados corresponden al valor medio de los datos, los extremos de las líneas al cuantil 0,05 y 0,95; y los extremos de las cajas a los cuantiles 0,25 y 0,75.

Del análisis individual de cada unidad observacional del tratamiento MZ1°FS se detectó entre los 67 y 81 DDE dos tendencias opuestas en la acumulación de materia seca de la fitomasa aérea. Las unidades observacionales 5, 8, 36, 38 y 40 continuaron aumentando su fitomasa aérea en el tiempo y, en contraposición, las restantes disminuyeron. Posteriormente, las precipitaciones ocurridas el día 12/01/2012 (112 DDE) de 26 mm permitieron revertir dicha tendencia negativa en algunas parcelas, pero con escasa magnitud de recuperación. Posiblemente este fenómeno se encuentra explicado por las condiciones de estrés hídrico donde el crecimiento es afectado más rápidamente que la fotosíntesis, lo que contribuye al crecimiento de las raíces en relación a la parte aérea (Golberg *et al.*, 2011). En todas las unidades observacionales del tratamiento MZ2°FS la fitomasa aérea aumentó a través del tiempo evaluado (Fig. 13).

La TCC en el período crítico varió entre 0,0 y 4,5 g planta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, presentó la mayor variabilidad y el menor valor medio en el tratamiento MZ1°FS, respecto a MZ2°FS (p<0,01), (Tabla 7). En 5 unidades observacionales de MZ1°FS se produjo la removilización de asimilados, con TCC negativas, que se expresaron como TCC de 0 g planta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> (Tabla 9).

El IAF determinado en floración varió entre 0,5 y 4,5, y presentó la mayor variabilidad en el tratamiento MZ1°FS. El mayor IAF se registró en el tratamiento MZ2°FS respecto a MZ1°FS (p<0,01), (Tabla 7). Estos resultados coinciden con Cirilo & Andrade (1994) que establecen una mayor intercepción de la radiación en siembras tardías de maíz respecto a siembras en fechas tempranas u óptimas. La mayor variabilidad del IAF observada en MZ1°FS podría explicarse por las condiciones hídricas particulares de cada unidad observacional. Ya que bajo condiciones de déficit hídrico, Otegui *et al.* (1995) reportan que la elongación de los tallos y las hojas se ven afectadas severamente. Este mecanismo de reducción del área de hojas en respuesta a la sequía permite minimizar las pérdidas de agua (Sadras & Milroy, 1996).

**Tabla 7.** Valores medios, máximos, mínimos y CV de las variables TCC (g planta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>) e IAF de los tratamientos MZ1°FS y MZ2°FS, 16 unidades observacionales en cada tratamiento.

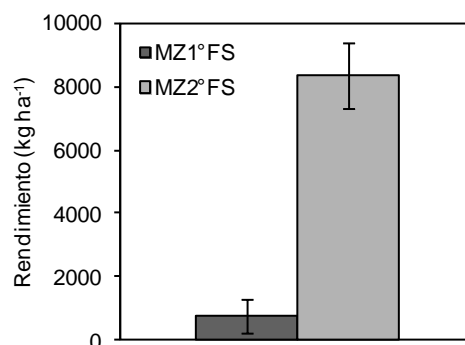
	IAF		TCC	
	MZ1°FS	MZ2°FS	MZ1°FS	MZ2°FS
Media	1,9	3,7	0,7	3,9
Mínimo	0,5	3,0	0,0	3,4
Máximo	3,8	4,5	2,5	4,5
CV (%)	44	11	120	8

MZ1°FS: cultivos de maíz de siembra temprana (03/10/2011). MZ2°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (13/12/2011). CV: coeficiente de variación. TCC: tasa de crecimiento de los cultivos durante el período crítico. IAF: índice de área foliar

### c) Producción de grano y componentes del rendimiento

El rendimiento en grano de los cultivos varió entre 0 y 12640 kg ha<sup>-1</sup> y presentó elevada variabilidad entre unidades observacionales en ambos tratamientos evaluados, con CV de 273 y 49 % en MZ1°FS y MZ2°FS, respectivamente. El rendimiento medio del tratamiento MZ1°FS fue menor respecto a MZ2°FS (773 vs. 8355 kg ha<sup>-1</sup>, p<0,01), (Fig. 14). El amplio rango observado indicaría diferente disponibilidad de recursos entre unidades observacionales, ya que la prolificidad, depende del genotipo y de la disponibilidad de recursos entre 15 días pre floración y floración (Cárcova *et al.*, 2000). En contraposición a lo observado por otros autores

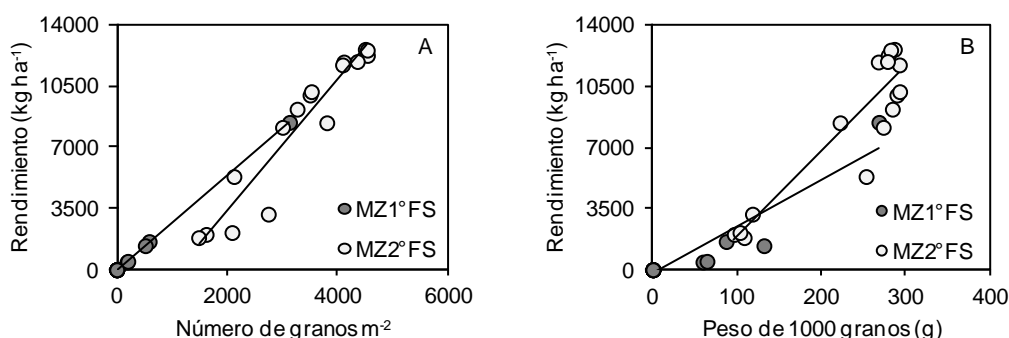
(Cantarero *et al.*, 2000, Cirilo & Andrade, 1994) bajo condiciones hídricas y nutricionales no limitantes, para este estudio bajo condiciones de campo el atraso en la fecha de siembra tuvo un efecto positivo en los rendimientos. Pero es coincidente con lo reportado por Miranda *et al.* (2013) en la misma zona y bajo condiciones de campo en seco.



**Figura 14.** Rendimiento en grano medio ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de 16 unidades observacionales de los tratamientos MZ1°FS y MZ2°FS.

MZ1°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra temprana (03/10/2011). MZ2°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (13/12/2011). Las barras verticales representan el error estándar de los datos.

El NG varió entre 0 y 4545 granos  $\text{m}^2$  y el PG varió entre 0 y 293 g. Para todas las variables los mayores CV se registraron en el tratamiento MZ1°FS, respecto a MZ2°FS. El rendimiento en grano se definió por el PG y el NG en ambos tratamientos ( $p < 0,01$ , Fig. 15). Reducciones en el NG compensaron parcialmente el rendimiento con un mayor peso de los mismos, posiblemente por una mayor relación fuente destino post floración (Borrás & Otegui, 2001).

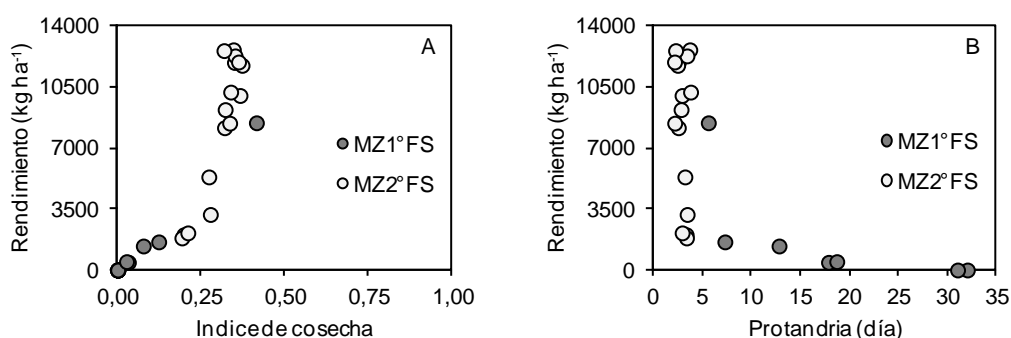


**Figura 15.** Rendimiento en función del: A. Número de granos  $\text{m}^{-2}$ . B. Peso de mil granos (g), de 16 unidades observacionales de los tratamientos MZ1°FS y MZ2°FS.

MZ1°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra temprana (03/10/2011). MZ2°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (13/12/2011). Las líneas corresponden a la regresión lineal simple de cada tratamiento.

El IC varió entre 0 y 0,42, y los rendimientos se relacionaron positivamente con el IC en ambos tratamientos ( $p < 0,01$ ; Fig. 16). En las unidades observacionales que

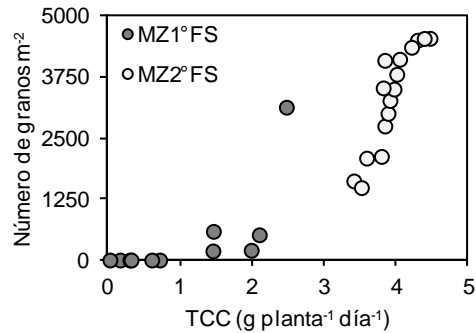
produjeron grano la sincronía entre la floración masculina y la floración femenina (protandria) varió entre 6 y 10 días, y entre 0 y 5 días en los tratamientos MZ1°FS y MZ2°FS, respectivamente. Se observó una relación negativa entre la protandria y los rendimientos en MZ1°FS ( $p=0,01$ ), para el caso de MZ2°FS el rendimiento no estuvo asociado a la protandria (Fig. 16). En coincidencia con la información reportada por Cárcova & Otegui (2001), que definieron un plazo de 5 días para garantizar la polinización de la mayoría de los ovarios.



**Figura 16.** Rendimiento en función de: A. Índice de cosecha. B. Protandria, de 16 unidades observacionales de los tratamientos MZ1°FS y MZ2°FS. MZ1°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra temprana (03/10/2011). MZ2°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (13/12/2011).

En el tratamiento MZ2°FS se observó una relación lineal positiva entre la TCC en el período crítico y el NG ( $p<0,01$ ,  $R^2= 0,82$ ), pero no así en MZ1°FS (Fig. 17). El rango de datos explorado en este estudio no fue suficiente para observar la curva característica reportada para los cultivos de maíz (Andrade *et al.*, 1999).

Andrade *et al.* (1999 y 2000a) reportan valores umbrales de TCC para la producción de granos de entre 0,93 y 1,1 g planta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, lo que estaría dado por la posición axilar de la espiga en la planta. En el tratamiento MZ1°FS el 69 % de las unidades observacionales no produjeron grano y en coincidencia con el umbral antedicho, presentaron TCC por debajo de 1 g planta<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> (Fig. 17).



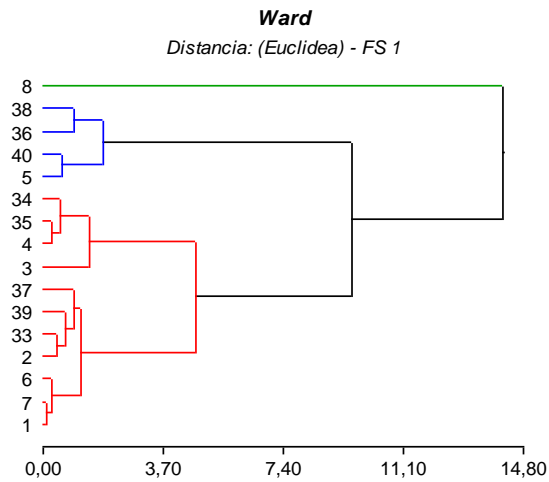
**Figura 17.** Número de granos m<sup>-2</sup> en función de la TCC, de 16 unidades observacionales de los tratamientos MZ1°FS y MZ2°FS.

MZ1°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra temprana (03/10/2011). MZ2°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (13/12/2011). TCC: tasa de crecimiento de los cultivos en floración.

*d) Evaluación de la variabilidad de los cultivos*

Los cultivos bajo igual manejo presentaron diferencias en su productividad. En el tratamiento MZ1°FS el análisis de conglomerados permitió definir tres grupos de unidades observacionales de comportamiento similar (Fig. 18), y en el tratamiento MZ2°FS dos grupos (Fig. 19).

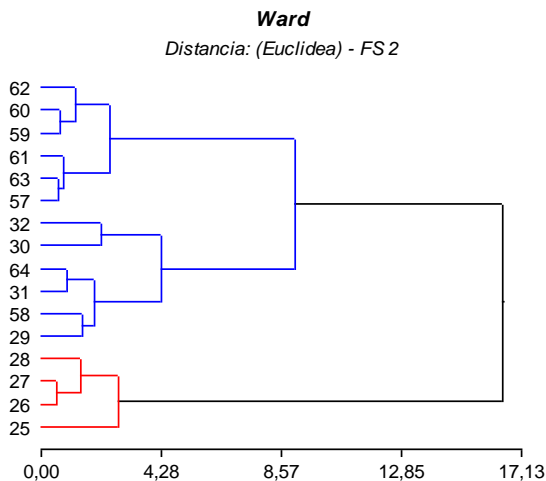
En el tratamiento MZ1°FS el conglomerado de mayor productividad (conglomerado verde) contiene a la unidad observacional 8, y con productividad intermedia se agruparon las unidades 38, 36, 40 y 5 (conglomerado azul). Las restantes se ubicaron en el conglomerado rojo que presentó los menores valores de las variables consideradas (Fig. 18). Los rendimientos fueron diferentes en función del conglomerado ( $p < 0,01$ ), con valores medios de 8450, 978 y 0 kg ha<sup>-1</sup> para el conglomerado verde (alta), azul (media), y rojo (baja productividad), respectivamente.



**Figura 18.** Dendrograma de variables de los cultivos del tratamiento MZ1°FS.

Coeficiente de correlación cofenética= 0,605. MZ1°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra temprana (03/10/2011). Variables: materia seca de la fitomasa aérea evaluada en floración, índice de área foliar, rendimiento, número de granos, peso de los granos, índice de cosecha y prolificidad. Colores diferentes indican los conglomerados obtenidos del análisis: verde, azul y rojo.

En el tratamiento MZ2°FS los rendimientos fueron diferentes entre conglomerados ( $p < 0,01$ ), con valores medios de 10374 y 2295 kg ha<sup>-1</sup> para los conglomerados azul y rojo, respectivamente. El conglomerado con menores valores de rendimiento (rojo), definido como de bajo potencial, se integró por las unidades observacionales 25, 26, 27 y 28, y las restantes integraron el grupo de alto potencial de rendimiento (Fig. 19).



**Figura 19.** Dendrograma de variables de los cultivos del tratamiento MZ2°FS.

Coeficiente de correlación cofenética= 0,586. MZ2°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (13/12/2011). Variables: materia seca de la fitomasa aérea evaluada en floración, índice de área foliar, rendimiento, número de granos, peso de los granos, índice de cosecha y prolificidad. Colores diferentes indican los conglomerados obtenidos del análisis: azul y rojo.

## Cultivos de soja

### a) Fenología

El largo del ciclo de los cultivos varió en función de tratamiento ( $p < 0,01$ ) con una diferencia media de 10 días (Tabla 8), alcanzando R7 el día 14/03/2012 y 24/03/2012 en SJ3810 y SJ4670, respectivamente. La diferencia en el largo del ciclo se explicó por la duración de la etapa reproductiva, en este sentido la duración del período crítico fue mayor en SJ4670 respecto a SJ3810 ( $p < 0,01$ ). Estas diferencias se explicaron por la temperatura media diaria, donde para la etapa vegetativa fue igual entre los tratamientos, y en la fase reproductiva se registró una diferencia media de entre 0,4 y 1,1° C.

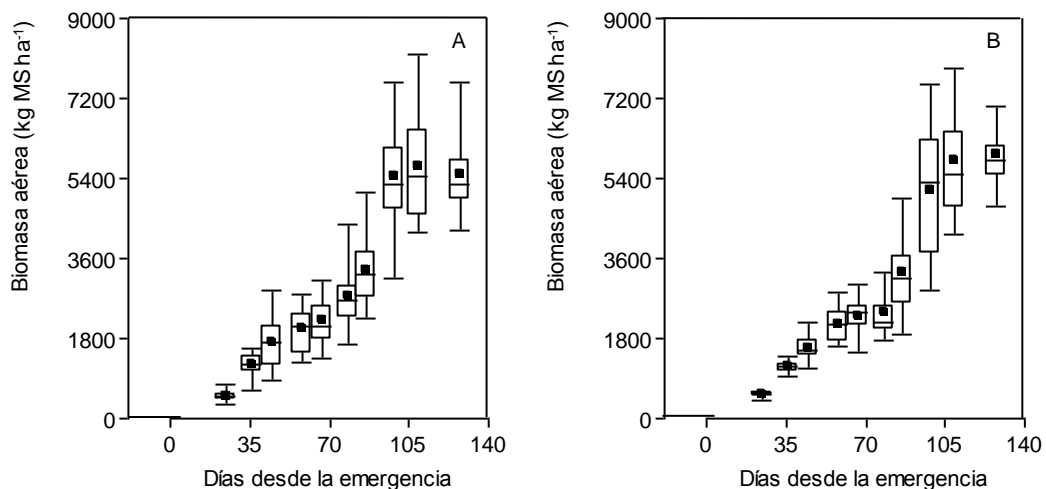
**Tabla 8.** Duración en días de las distintas etapas fenológicas, de 16 unidades observacionales de los tratamientos SJ3810 y SJ4670.

	E-R1		R1-R5		R5-R7		E-R7	
	SJ3810	SJ4670	SJ3810	SJ4670	SJ3810	SJ4670	SJ3810	SJ4670
Media	41	45	48	52	40	43	129	139
Mínimo	29	31	43	38	24	33	124	131
Máximo	44	58	58	66	48	50	135	145
CV (%)	12	13	11	16	16	12	3	4

SJ3810: cultivos de soja variedad comercial DM 3810. SJ4670: cultivos de soja variedad comercial DM 4670. CV: coeficiente de variación; E-R1: emergencia – comienzo de floración, R1-R5: comienzo de floración – comienzo de llenado de granos, R5-R7: comienzo de llenado de granos – comienzo de madurez, E-R7: emergencia – comienzo de madurez.

### b) Fitomasa aérea, tasa de crecimiento y altura de los cultivos

La fitomasa aérea acumulada al final de ciclo varió entre 4213 y 7558, y entre 4210 y 8137 kg MS ha<sup>-1</sup> en el tratamiento SJ3810 y SJ4670, respectivamente (Fig. 20). En todas las fechas evaluadas la producción de fitomasa aérea presentó elevada variabilidad, y no se observaron diferencias estadísticas entre los tratamientos en ninguna de ellas ( $p > 0,15$ ).



**Figura 20.** Fitomasa aérea acumulada ( $\text{kg MS ha}^{-1}$ ) en función de los días desde la emergencia (emergencia: 06/11/2011), de 16 unidades observacionales de los tratamientos; A. SJ39810. B. SJ4670.

SJ3810: cultivos de soja variedad comercial DM 3810. SJ4670: cultivos de soja variedad comercial DM 4670. Los cuadrados corresponden al valor medio de los datos, los extremos de las líneas al cuantil 0,05 y 0,95; y los extremos de las cajas a los cuantiles 0,25 y 0,75.

La TCC en el período crítico presentó mayor variabilidad en el tratamiento SJ3810, respecto a SJ4670, debido principalmente a la presencia de valores máximos extremos que se alejaron de la media de los datos (Tabla 9), y se encontraron diferencias entre tratamientos ( $p=0,09$ ), a favor de SJ4670. El período crítico puede dividirse en subperíodos, el comprendido entre R4,5 y R5,5 es más sensible ya que pueden abortar vainas y semillas pequeñas al momento que la floración se completa, y durante el subperíodo R6 a R6,5 condiciones desfavorables pueden acortar el período de llenado de los granos y disminuir el peso de los mismos (Sadras *et al.*, 2000).

La altura de planta a los 93 DDE varió entre 32 y 45 cm y entre 31 y 46 cm en SJ3810 y SJ4670, respectivamente, y no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ( $p=0,45$ ), siendo en promedio de 38,5 cm (Tabla 9).

**Tabla 9.** TCC ( $\text{kg de materia seca ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) en el período crítico para la determinación del rendimiento, y altura de planta (cm) a los 93 días desde la emergencia (07/02/2012), de 16 unidades observacionales de los tratamientos SJ3810 y SJ 4670.

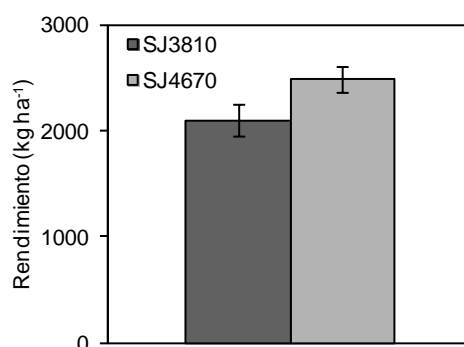
	TCC		Altura	
	SJ3810	SJ3810	SJ3810	SJ4670
Media	101	81	39	38
Mínimo	36	40	32	31
Máximo	154	115	45	46
CV (%)	41	28	9	11

SJ3810: cultivos de soja variedad comercial DM 3810. SJ46470: cultivos de soja variedad comercial DM 4670. CV: coeficiente de variación.



### c) Producción de grano y componentes del rendimiento

El rendimiento en grano de los cultivos varió entre 1283 y 2489 kg ha<sup>-1</sup>, y presentó similar variabilidad entre unidades observacionales en ambos tratamientos evaluados (CV 28 y 20 %, para SJ 3810 y SJ4670, respectivamente), encontrándose los valores más extremos en SJ3810. Se observaron diferencias en los rendimientos medios ( $p=0,06$ ), siendo de 2106 y 2489 kg ha<sup>-1</sup> para SJ3810 y SJ 4670, respectivamente (Fig. 21).

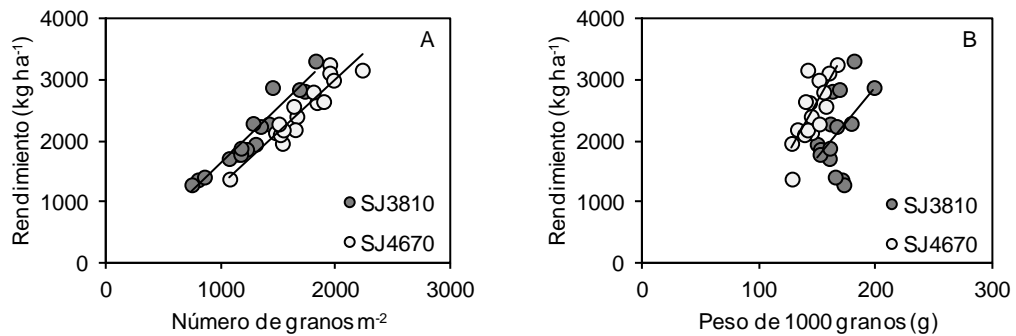


**Figura 21.** Rendimiento en grano medio de 16 unidades observacionales de los tratamientos SJ3810 y SJ 4670.

SJ3810: cultivos de soja variedad comercial DM 3810. SJ46470: cultivos de soja variedad comercial DM 4670. Las barras verticales representan el error estándar de los datos.

El NG varió entre 743 y 1703 granos m<sup>2</sup>, el PG varió entre 128 y 166 g, y el IC varió entre 0,21 y 0,42. El componente del rendimiento que presentó la mayor variabilidad fue el NG, respecto al PG. El NG fue mayor en el tratamiento SJ4670 ( $p<0,01$ ) y el PG fue mayor en SJ3810 ( $p<0,01$ ).

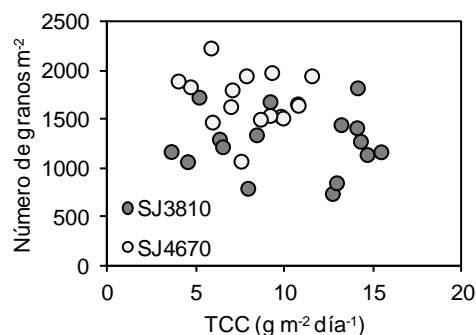
El rendimiento se encontró asociado al NG en ambos tratamientos ( $p<0,01$ ), y al PG en mayor medida en el tratamiento SJ4670 ( $p<0,01$ ), respecto a SJ3810 ( $p<0,10$ ), (Fig. 22). Numerosos autores en la literatura definen al NG como el principal componente de los rendimientos (Egli, 1993; Liu *et al.*, 2005). No se encontró una relación entre el IC y el rendimiento, en coincidencia con Liu *et al.* (2005) al investigar genotipos con diferente GM y potencial de rendimiento en el noreste de China.



**Figura 22.** Rendimiento en función del: A. Número de granos m<sup>-2</sup>. B. Peso de mil granos, de 16 unidades observacionales de los tratamientos SJ3810 y SJ4670.

Las líneas corresponden a la regresión lineal simple de cada tratamiento. SJ3810: cultivos de soja variedad comercial DM 3810. SJ4670: cultivos de soja variedad comercial DM 4670.

La generación del rendimiento es función de la TCC durante el período crítico, y presenta una relación lineal y directa con el número de semillas logradas, interceptando al eje X próximo al origen (Andrade *et al.*, 2000b; Egli, 1993). No fue posible observar dicha relación (Fig. 23), lo que se debería al efecto de los excesos hídricos ocurridos en estados R5 y R6 en adelante de los cultivos.



**Figura 23.** Número de granos m<sup>-2</sup> en función de la TCC (g m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>) en el período crítico para la determinación del rendimiento, de 16 unidades observacionales de los tratamientos SJ3810 y SJ4670.

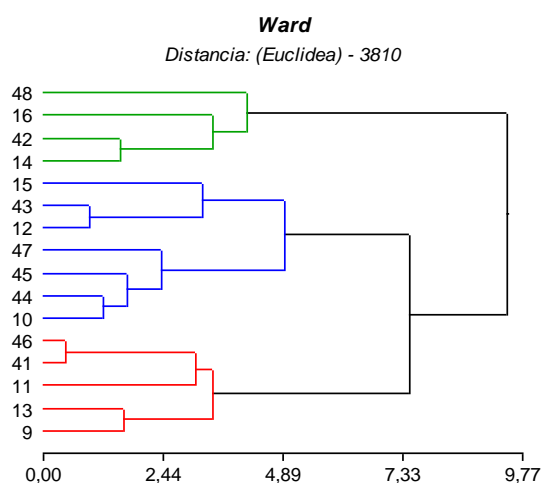
SJ3810: cultivos de soja variedad comercial DM 3810. SJ4670: cultivos de soja variedad comercial DM 4670. TCC: tasa de crecimiento de los cultivos.

#### d) Evaluación de la variabilidad de los cultivos

En cada tratamiento se diferenciaron grupos de unidades observacionales con diferente comportamiento, evidenciando variabilidad bajo iguales condiciones de manejo (Fig. 24 y 25).

En el tratamiento SJ3810 un conglomerado incluyó a las unidades observacionales 48, 16, 42 y 14 (conglomerado verde), otro a las unidades 15, 43, 12, 47, 45, 44 y 10

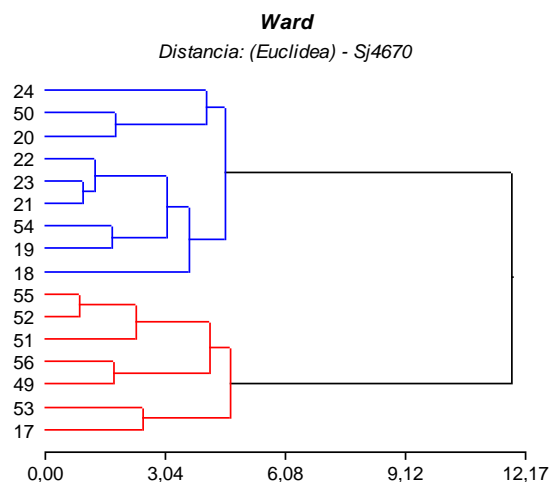
(conglomerado azul) y el último a las restantes (conglomerado rojo), (Fig. 24). Se observaron diferencias en los rendimientos en función del conglomerado ( $p < 0,01$ ) y el mayor valor se observó en el conglomerado verde respecto al azul y rojo, que no presentaron diferencias entre ellos. En tal sentido se definió al conglomerado verde de mayor rendimiento como de alto potencial, y a los restantes como de menor potencial de rendimiento.



**Figura 24.** Dendrograma de variables de los cultivos del tratamiento soja SJ3810.

Coefficiente de correlación cofenética= 0,630. SJ3810: cultivos de soja variedad comercial DM 3810. Variables: materia seca de la fitomasa aérea evaluada en R5, altura de planta, rendimiento en grano, número de granos, peso de 1000 granos e índice de cosecha. Colores diferentes indican los conglomerados obtenidos del análisis (conglomerado 1: verde, 2: azul, 3: rojo).

En el tratamiento SJ4670 el conglomerado de alto potencial de rendimiento incluyó a las unidades observacionales 17, 49, 51, 52, 53, 55 y 56 (conglomerado rojo), las restantes corresponden a la clasificación de bajo potencial (conglomerado azul), (Fig. 25). Se observaron diferencias de rendimiento entre conglomerados ( $p > 0,01$ ) con valores medios de 2945 y 2134 kg ha<sup>-1</sup> para el conglomerado de alto y bajo potencial, respectivamente.



**Figura 25.** Dendrograma de variables de los cultivos del tratamiento SJ4670.

Coefficiente de correlación cofenética= 0,694. SJ4670: cultivos de soja variedad comercial DM 4670. Variables: materia seca de la fitomasa aérea en R5, altura de planta, rendimiento en grano, número de granos, peso de 1000 granos e índice de cosecha. Colores diferentes indican los conglomerados obtenidos del análisis (conglomerado 1: azul, 2: rojo).

## **Efecto de las propiedades edáficas y la altimetría sobre la productividad de los cultivos**

### *a) Cultivos de maíz en fecha siembra temprana*

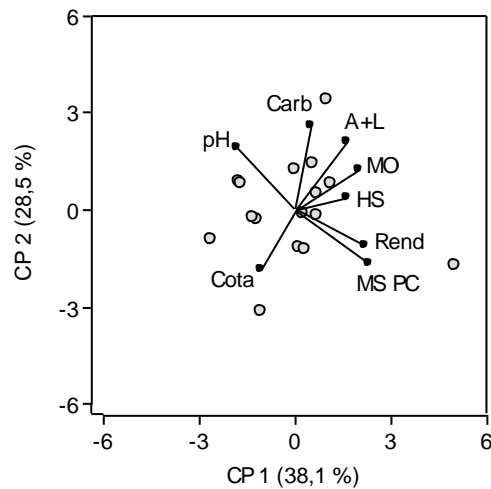
En el tratamiento MZ1°FS se observó diferencias entre los conglomerados con diferente productividad en las variables pH (40-100 cm), CE (60-80 cm) y AD a la siembra (0-100 cm). En tal sentido el conglomerado de alto potencial de rendimiento registró menor pH y CE, respecto al conglomerado de bajo potencial, y el grupo de potencial medio se comportó de manera intermedia. El AD a la siembra fue mayor en el conglomerado de alto potencial, menor en el de medio potencial, y el grupo bajo potencial presentó un comportamiento medio (Tabla 10).

**Tabla 10.** Valores medios de las propiedades edáficas evaluadas según conglomerados de alto, medio y bajo potencial de rendimiento, para el tratamiento MZ1°FS.

Variables	Unidad	Profundidad	Conglomerado			p valor
			AP	MP	BP	
Materia orgánica total	%	0-20	1,71 a	1,79 a	2,00 a	0,49
		0-20	34,56 a	30,56 a	31,56 a	0,79
Arcilla más limo	%	20-40	40,56 a	34,56 a	34,80 a	0,65
		40-60	44,56 a	35,06 a	37,65 a	0,48
		60-80	44,56 a	33,81 a	37,38 a	0,40
		80-100	42,56 a	30,56 a	35,74 a	0,27
		0-20	5,53 a	5,74 a	5,98 a	0,16
pH	-	20-40	6,20 a	6,98 a	7,20 a	0,32
		40-60	6,92 b	8,01 ab	8,39 a	0,10
		60-80	7,60 b	8,60 ab	8,85 a	0,05
		80-100	7,62 b	8,90 a	9,13 a	<0,01
		20-40	1,15 a	1,08 a	1,12 a	0,78
Carbonato de Calcio	%	40-60	1,08 a	1,32 a	1,49 a	0,41
		60-80	1,34 a	1,62 a	1,61 a	0,86
		80-100	1,47 a	1,62 a	1,97 a	0,67
		0-20	0,13 a	0,11 a	0,14 a	0,32
Conductividad eléctrica	dS m <sup>-1</sup>	20-40	0,12 a	0,09 a	0,14 a	0,23
		40-60	0,11 a	0,19 a	0,29 a	0,22
		60-80	0,10 b	0,27 ab	0,38 a	0,09
		80-100	0,09 a	0,32 a	0,77 a	0,12
		Cota relativa	cm		7,60 a	7,65 a
Agua disponible a la siembra	mm	0-100	172 a	114 b	123 ab	0,11

MZ1°FS: cultivos de maíz en fecha de siembra temprana (03/11/2011). AP: alto potencial. MP: medio potencial. BP: bajo potencial. Medias con una letra diferente en sentido horizontal indica diferencias significativas entre conglomerados (p valor<0,10. ANOVA. Test LCD Fisher).

La identificación de variables determinantes de la productividad a través del análisis de componentes principales definió que las tres primeras componentes del análisis explicaron el 81 % de la variabilidad. En la gráfica de las componentes 1 y 2 las variables bien representadas son el rendimiento, la MS de fitomasa aérea en floración, el pH y el contenido de arcilla más limo (40-60 cm), para las componentes 1 y 3 el AD al momento de la siembra (0-100 cm), y para las componentes 3 y 2 la variable carbonato de Calcio (80-100 cm), (Fig. 26). Se observó que el rendimiento y la MS de fitomasa aérea en floración se encontraron correlacionados de forma positiva, y éstos se relacionaron de forma negativa con el pH, y sin relación al contenido de arcilla más limo (Fig. 26).



**Figura 26.** Representación de las variables en el plano de la primera (CP 1) y la segunda (CP 2) componente principal, del tratamiento MZ1°FS.

MZ1°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra temprana (03/10/2011). Rend: rendimiento en grano. MS PC: materia seca de la fitomasa aérea en floración. A+L: arcilla más limo de la capa 40-60 cm de profundidad. pH: pH en relación suelo:agua 1:2,5 de la capa 40-60 cm de profundidad. Carb: carbonato de Calcio de la capa 80-100 cm de profundidad. Cota: cota relativa del terreno. Los puntos grises representan a las unidades observacionales (n=16), y los puntos negros representan a las variables.

La jerarquización de las variables prevista a través de la obtención de modelos de regresión lineal múltiple no fue posible, ya que el 31 % de los casos presentaron valores de rendimiento por encima de cero. En contraposición se obtuvo una jerarquización que explicó la MS de la fitomasa aérea acumulada en floración a través de un modelo de regresión lineal múltiple (Tabla 11). Se destaca la correlación positiva observada entre el rendimiento y la MS de la fitomasa aérea acumulada en floración (Fig. 26), por lo cual se podría suponer que las mismas variables podrían afectar los rendimientos.

**Tabla 11.** Coeficientes de regresión y estadísticos obtenidos de modelos de regresión lineal múltiple para la materia seca de la fitomasa aérea evaluada en floración del tratamiento MZ1°FS.

n	R <sup>2</sup> aj	Variable	Coefficiente	p-valor	Cp Mallows
13	0,89	Constante	16156,9	<0,01	
		pH 40-60 cm	-1321,8	<0,01	50,78
		AD siembra 0-100 cm	16,2	0,01	11,77
		CaCO <sub>3</sub> 80-100 cm	-893,2	0,02	11,05

MZ1°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra temprana (03/10/2011). pH en relación suelo:agua 1:2,5. AD siembra: agua disponible al momento de la siembra. CaCO<sub>3</sub>: carbonato de Calcio.

La fitomasa aérea de los cultivos del tratamiento MZ1°FS se afectó negativamente por el pH del suelo, el contenido de carbonato de Calcio, y positivamente por el AD al momento de la siembra, en base a la ecuación:

$$\text{Fitomasa} = 16157 - 1322 * \text{pH} + 16 * \text{ADsiembra} - 893 * \text{CaCO}_3$$

La jerarquización de las propiedades permitió definir a la reacción del suelo como la variable más influyente en el crecimiento de los cultivos, siendo el rango explorado en este estudio de 6,92 a 9,20 (capa 40-60 cm), donde los casos de mayor productividad correspondieron a menores valores de dicha propiedad. En segundo lugar se jerarquizó al AD a la siembra y el contenido de carbonato de Calcio, con escasa diferencia entre ellas. El efecto positivo del AD al momento de la siembra se explicaría por el déficit de precipitaciones registradas durante el ciclo de los cultivos. Estos resultados coinciden con Abbate *et al.*, (2004) quienes reportan mayores rendimientos de trigo con altos contenidos hídricos a la siembra, en la región sud-este bonaerense (Argentina). Del mismo modo, para cultivos de maíz bajo sistemas de secano en Argentina los rendimientos se encontraron asociados a las precipitaciones (Calviño *et al.*, 2003, Gregoret *et al.*, 2011). En tanto, el carbonato de Calcio (rango explorado: 1,14 a 4,33 %) produjo un efecto negativo sobre la productividad de los cultivos.

#### *b) Cultivos de maíz en fecha de siembra tardía*

En el tratamiento MZ2°FS a través del método de diferencias de medias se identificaron diferencias entre conglomerados para las variables arcilla más limo (0-40 y 60-80 cm), carbonato de Calcio (60-100 cm), y cota relativa. El conglomerado de alto potencial de rendimiento presentó textura más gruesa, menor contenido de carbonato de Calcio, y se ubicó en posición elevada del relieve (Tabla 12).

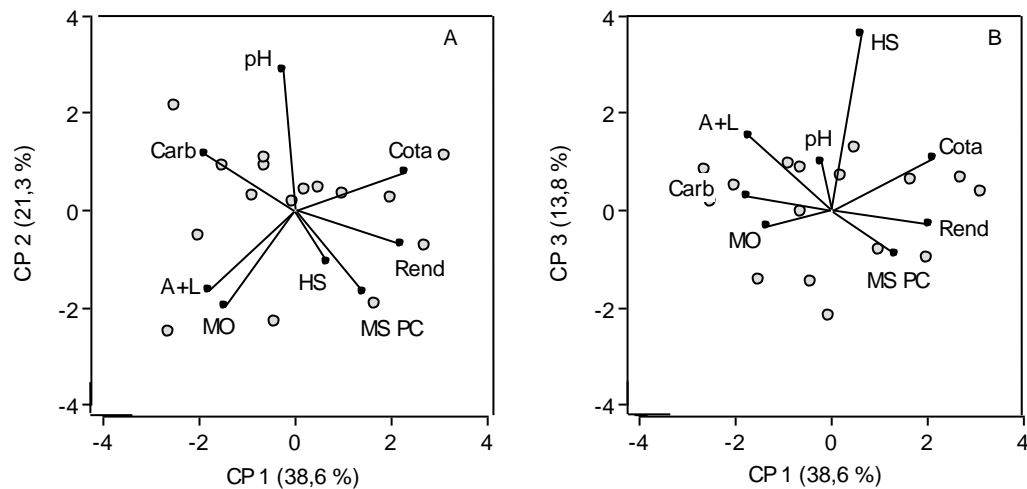
**Tabla 12.** Valores medios de propiedades edáficas según conglomerados de alto y bajo potencial de rendimiento, para el tratamiento MZ2°FS.

Variables	Unidad	Profundidad	Conglomerado		p valor
			AP	BP	
Materia orgánica total	%	0-20	1,41	1,52	0,24
		0-20	32,06	38,71	<0,01
Arcilla más limo	%	20-40	32,00	35,81	0,06
		40-60	33,56	37,06	0,12
		60-80	30,48	34,06	0,07
		80-100	31,09	34,31	0,28
		0-20	6,04	6,22	0,50
pH	-	20-40	7,25	7,45	0,67
		40-60	8,38	8,57	0,72
		60-80	8,87	8,93	0,89
		80-100	8,90	8,95	0,90
		20-40	1,01	1,37	0,30
Carbonato de Calcio	%	40-60	1,44	1,52	0,58
		60-80	1,44	1,72	0,01
		80-100	1,50	1,77	0,05
		0-20	0,13	0,14	0,19
Conductividad eléctrica	dS m <sup>-1</sup>	20-40	0,15	0,21	0,53
		40-60	0,23	0,31	0,36
		60-80	0,29	0,27	0,70
		80-100	0,35	0,32	0,75
		0-20	0,13	0,14	0,19
Cota relativa	cm	-	11,23	0,73	<0,01
Agua disponible a la siembra	mm	0-100	180	176	0,74

MZ2°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (13/12/2011). AP: alto potencial. BP: bajo potencial. P valor de prueba de diferencia de media *t* de Student.

El análisis de componentes principales permitió explicar la variabilidad en un 74 % a través de sus tres primeras componentes. Las componentes 1 y 2 representaron correctamente a las variables rendimiento y cota relativa, las componentes 1 y 3 las variables rendimiento, cota relativa y AD a la siembra (0-100 cm), y las componentes 2 y 3 a las variables pH (46-60 cm), y AD a la siembra (0-100 cm), (Fig. 27). El rendimiento se correlacionó positivamente con la cota relativa, y no presentó correlación con el AD a la siembra (Fig. 27).





**Figura 27.** A. Representación de las variables en el plano de la primera (CP 1) y la segunda (CP 2) componente principal, del tratamiento MZ2°FS. B. Representación de las variables en el plano de la primera (CP 1) y la tercera (CP 3) componente principal, del tratamiento MZ2°FS.

MZ2°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (13/12/2011). Rend: rendimiento en grano. MS PC: materia seca de la fitomasa aérea en floración. A+L: arcilla más limo de la capa 40-60 cm de profundidad. pH: pH en relación suelo:agua 1:2,5 de la capa 40-60 cm de profundidad. Carb: carbonato de Calcio de la capa 80-100 cm de profundidad. Cota: cota relativa del terreno. Los puntos grises representan a las unidades observacionales (n=16), y los puntos negros representan a las variables.

La jerarquización de las propiedades que explicaron el rendimiento de los cultivos a través de modelos de regresión lineal mostró relación únicamente con la variable cota relativa del terreno (Tabla 13).

**Tabla 13.** Coeficientes de regresión y estadísticos obtenidos de modelos de regresión lineal múltiple para el rendimiento en grano del tratamiento MZ2°FS.

n	R <sup>2</sup> aj	Variable	Coefficiente	p-valor	Cp Mallows
14	0,77	Constante	2634,5	0,02	42,46
		Cota relativa	669,6	<0,01	

MZ2°FS: cultivos de maíz de fecha de siembra tardía (13/12/2011).

Los rendimientos de los cultivos del tratamiento MZ2°FS se vieron afectados positivamente por la cota relativa del terreno (Tabla 13), en base a la ecuación:

$$\text{Rendimiento} = 2635 + 670 * \text{CotaRelativa}$$

No fue posible obtener una jerarquización de variables que definieron la fitomasa aérea al momento de la floración de los cultivos, lo que impidió el análisis previo al evento de precipitaciones que causó el anegamiento del suelo en varias unidades observacionales del ensayo.

El marcado efecto de la cota relativa se debió a los excesos de agua que causaron el anegamiento de los suelos durante el ciclo de los cultivos. Destacándose el efecto

nulo del AD al momento de la siembra, en contraposición al tratamiento MZ1°FS. La cota relativa también mostró diferencias de medias entre conglomerados y de componentes principales. Además la textura y el contenido de carbonato de Calcio se correlacionaron con la cota relativa, es decir posiciones elevadas del terreno presentaron texturas más arenosas y menor contenido de carbonato de Calcio.

*c) Cultivos de soja variedad comercial DM3810*

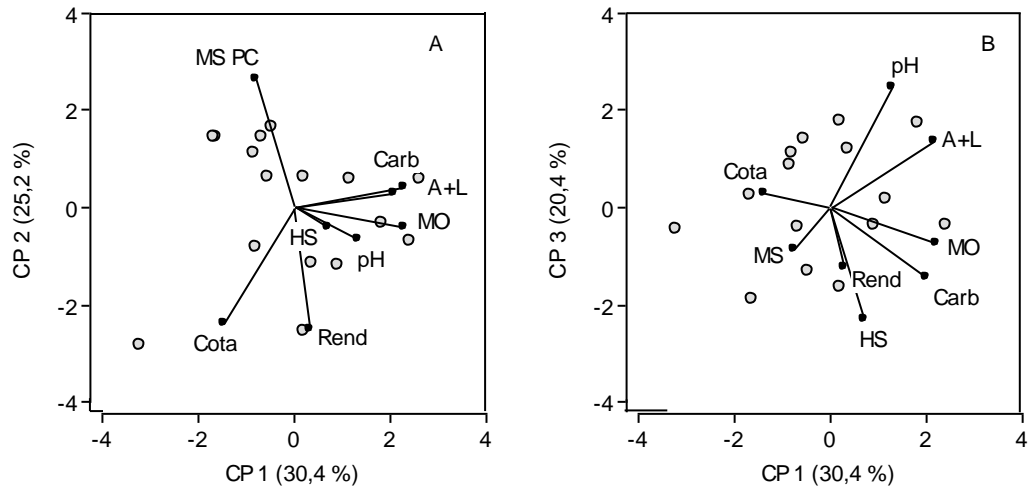
En el análisis de conglomerados del tratamiento SJ3810 en función de variables de los cultivos se diferenciaron tres grupos de unidades observacionales, pero en cuanto a diferencias en los rendimientos se realizaron dos conjuntos (conglomerado amarillo versus conglomerado rojo y azul). El conglomerado de alto potencial de rendimiento (verde, Fig. 24) presentó menor conductividad eléctrica en las capas de 20-40 y 60-80 cm de profundidad, respecto al conglomerado de bajo potencial (azul y rojo, Fig. 24), (Tabla 14).

**Tabla 14.** Valores medios de propiedades edáficas según conglomerados de alto y bajo potencial de rendimiento, para el tratamiento SJ 3810.

Variables	Unidad	Profundidad	Conglomerado		p valor
			AP	BP	
Materia orgánica total	%	0-20	1,66	1,55	0,50
Arcilla más limo	%	0-20	32,31	35,23	0,31
		20-40	33,81	35,48	0,51
		40-60	35,06	37,31	0,51
		60-80	33,06	35,98	0,35
		80-100	32,81	34,14	0,71
pH	-	0-20	6,04	5,95	0,64
		20-40	7,06	7,29	0,56
		40-60	8,07	8,23	0,71
		60-80	8,53	8,71	0,60
		80-100	8,83	8,86	0,92
Carbonato de Calcio	%	20-40	1,01	1,04	0,80
		40-60	1,36	1,49	0,64
		60-80	1,90	1,69	0,38
		80-100	2,01	1,91	0,81
Conductividad eléctrica	dS m <sup>-1</sup>	0-20	0,12	0,13	0,45
		20-40	0,10	0,13	0,03
		40-60	0,21	0,30	0,30
		60-80	0,27	0,40	0,09
		80-100	0,34	0,48	0,15
Cota relativa	cm	-	14,95	6,25	0,21
Agua disponible a la siembra	mm	0-100	164	151	0,43

SJ3810: cultivos de soja variedad comercial DM 3810. AP: alto potencial. BP: bajo potencial. P valor de prueba de diferencia de media *t* de Student.

Las tres primeras componentes principales explicaron en un 76 % la variabilidad. Las variables materia seca de la fitomasa aérea en R5 y cota relativa estuvieron bien representadas en las componentes 1 y 2, en las componentes 1 y 3 se analizaron las variables pH y contenido de arcilla más limo (capa 40-60 cm) y carbonatos de Calcio (80-100 cm), y en las componentes 2 y 3 las variable rendimiento y materia seca de la fitomasa aérea en R5. La materia seca en R5 no presentó correlación con la cota relativa, en tanto la textura y el pH estuvieron correlacionados positivamente entre sí. El contenido de carbonato de Calcio (80-100 cm) presentó relación positiva con la textura (40-60 cm), y no se relacionó con el pH (40-60 cm), (Fig. 28).



**Figura 28.** A. Representación de las variables en el plano de la primera (CP 1) y la segunda (CP 2) componente principal, del tratamiento SJ3810. B. Representación de las variables en el plano de la primera (CP 1) y la tercera (CP 3) componente principal, del tratamiento SJ3810.

SJ3810: cultivos de soja variedad comercial DM 3810. Rend: rendimiento en grano. MS PC: materia seca de la fitomasa aérea en R5. A+L: arcilla más limo de la capa 40-60 cm de profundidad. pH: pH en relación suelo:agua 1:2,5 de la capa 40-60 cm de profundidad. Carb: carbonato de Calcio de la capa 80-100 cm de profundidad. Cota: cota relativa del terreno. Los puntos grises representan a las unidades observacionales (n=16), y los puntos negros representan a las variables.

Los rendimientos de cultivos del tratamiento SJ3810 no pudieron ser explicados a través de modelos de regresión múltiple ya que las variables seleccionadas no cumplieron los supuestos propuestos. En contraposición fue posible explicar la materia seca de la fitomasa aérea acumulada en estadio R5 de los cultivos (Tabla 15).

**Tabla 15.** Coeficientes de regresión y estadísticos obtenidos de modelos de regresión lineal múltiple para la materia seca de la fitomasa aérea en R5 del tratamiento SJ3810.

n	R <sup>2</sup> aj	Variable	Coefficiente	p-valor	Cp Mallows
14	0,68	Constante	10434,9	<0,01	27,49
		pH 40-60 cm	-789,9	<0,01	

SJ3810: cultivos de soja variedad comercial DM 3810. pH en relación suelo:agua 1:2,5

La propiedad que afectó la acumulación de materia seca de la fitomasa aérea acumulada en estadio R5 de los cultivos fue la reacción del suelo, según la ecuación:

$$Fitomasa = 10435 - 790 * pH$$

Para el rango de valores explorados en este estudio el pH (6,81 a 9,38) se definió como la única variable que explicó la productividad de los cultivos.

d) Cultivos de soja variedad comercial DM4670

El análisis de conglomerados de cultivo del tratamiento SJ4670 permitió diferenciar dos grupos homogéneos de unidades observacionales. Se registraron diferencias entre conglomerados en la cota relativa del terreno, pero no así en las propiedades edáficas estudiadas. El conglomerado de alto potencial de rendimiento se ubicó en la posición más elevada del terreno (Tabla 16).

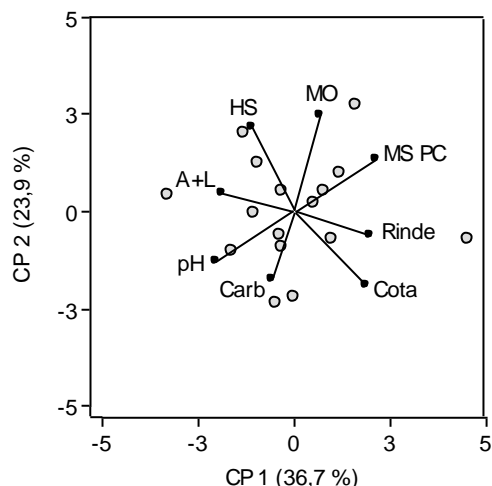
**Tabla 16.** Valores medios de rendimientos y propiedades edáficas según conglomerados de alto y bajo potencial de rendimiento, para el tratamiento SJ4670.

Variables	Unidad	Profundidad	Conglomerado		p valor
			AP	BP	
Materia orgánica total	%	0-20	1,75	1,61	0,17
		0-20	32,85	34,12	0,66
		20-40	31,62	34,56	0,27
Arcilla más limo	%	40-60	34,19	34,89	0,74
		60-80	31,34	32,45	0,54
		80-100	29,77	30,67	0,68
		0-20	6,04	6,26	0,26
		20-40	7,49	7,48	0,99
pH	-	40-60	8,27	8,87	0,11
		60-80	8,96	9,25	0,21
		80-100	9,19	9,33	0,27
		20-40	1,03	1,03	0,99
Carbonato de Calcio	%	40-60	1,38	1,56	0,17
		60-80	1,61	1,72	0,40
		80-100	1,95	1,65	0,48
		0-20	0,12	0,13	0,47
		20-40	0,13	0,18	0,30
Conductividad eléctrica	dS m <sup>-1</sup>	40-60	0,31	0,39	0,43
		60-80	0,42	0,45	0,76
		80-100	0,48	0,47	0,93
Cota relativa	cm	-	13,76	8,21	0,08
Agua disponible a la siembra	mm	0-100	161	172	0,22

SJ4670: cultivos de soja variedad comercial DM 4670. AP: alto potencial. BP: bajo potencial. P valor de prueba de diferencia de media *t* de Student.

Las tres primeras componentes explicaron el 73 % de la variabilidad. En la representación gráfica de las componentes 1 y 2 se encontraron bien representadas las variables MS de la fitomasa aérea en R5, pH (40-60 cm) y cota relativa. Para las componentes 1 y 3, la variable arcilla más limo (40-60 cm), y para 2 y 3, la MO (0-20

cm), (Fig. 29). La MS de la fitomasa aérea presentó asociación negativa con el pH, y no estuvo relacionado a la cota relativa del terreno (Fig. 29).



**Figura 29.** Representación de las variables en el plano de la primera (CP 1) y la segunda (CP 2) componente principal, del tratamiento SJ4670.

SJ4670: cultivos de soja variedad comercial DM 4670. Rend: rendimiento en grano. MS PC: materia seca de la fitomasa aérea en R5. A+L: arcilla más limo de la capa 40-60 cm de profundidad. pH: pH en relación suelo:agua 1:2,5 de la capa 40-60 cm de profundidad. Carb: carbonato de Calcio de la capa 80-100 cm de profundidad. Cota: cota relativa del terreno. Los puntos grises representan a las unidades observacionales (n=16), y los puntos negros representan a las variables.

La regresión lineal múltiple para explicar los rendimientos del tratamiento SJ4670 definió como única propiedad a la cota relativa del terreno, con efecto positivo (Tabla 17).

**Tabla 17.** Coeficientes de regresión y estadísticos obtenidos de modelos de regresión lineal múltiple para el rendimiento en grano del tratamiento de cultivos de soja variedad comercial DM 4670.

N	R <sup>2</sup> aj	Variable	Coefficiente	p-valor	Cp Mallows
14	0,34	Constante	1723,9	<0,01	8,27
		Cota relativa	83,5	0,02	

El rendimiento se explicó en base a la ecuación:

$$\text{Rendimiento} = 1724 + 84 * \text{CotaRelativa}$$

En tanto la jerarquización de las propiedades que explicaron la materia seca de la fitomasa aérea acumulada en estadio R5 de los cultivos definió como único factor al contenido de MO superficial (Tabla 18).

**Tabla 18.** Coeficientes de regresión y estadísticos obtenidos de modelos de regresión lineal múltiple para la fitomasa aérea en R5 del tratamiento de cultivos de soja variedad comercial DM 4670.

n	R <sup>2</sup> aj	Variable	Coeficiente	p-valor	Cp Mallows
15	0,47	Constante	-756,0	0,59	13,34
		MO 0-20 cm	3031,1	<0,01	

MO: materia orgánica.

La fitomasa aérea acumulada en estadio R5 de los cultivos se explicó según la ecuación:

$$Fitomasa = -756 + 3031 * MO$$

A través de los análisis precedentes se identificó y jerarquizó a la variable cota relativa del terreno con un efecto negativo sobre el rendimiento de los cultivos, pero no así con la fitomasa aérea acumulada en estado R5. Estos resultados muestran el efecto del anegamiento del suelo en estadios posteriores a R5. En tanto antes de dicho evento climático la MO superficial del suelo presentó un efecto positivo directo sobre la productividad.

*e) Análisis integrado del efecto de las propiedades edáficas y la altimetría sobre la productividad de los cultivos en cada manejo propuesto*

El análisis del efecto de las propiedades edáficas y la altimetría sobre la productividad de los cultivos permitió establecer que existen diferentes tipos de limitaciones para cada cultivo y manejo.

Para el tratamiento MZ1°FS el factor determinante de la productividad fue la reacción del suelo del suelo, siendo estos resultados coincidentes con lo observado por Rogovska *et al.* (2007) para cultivos de soja en la región central y centro norte de Iowa (Estados Unidos). En tanto el agua disponible al momento de la siembra afectó positivamente a los cultivos, al igual que lo reportado por Urricarriet *et al.* (2011) para la misma zona de estudio donde los rendimientos de maíz estuvieron asociados a la posición topográfica, y su influencia sobre la disponibilidad hídrica del perfil del suelo.

La cota relativa del terreno fue un factor determinante de los rendimientos para los tratamientos MZ2°FS y SJ 4670, ambos afectados por el anegamiento del suelo en las posiciones bajas del relieve, a causa de excesivas precipitaciones. En contraposición, en años con precipitaciones cercanas a los valores normales, Barraco (2009) observó mayores rendimientos de soja en las posiciones bajas del terreno respecto a las lomas, explicado por el agua almacenada en el suelo al momento de la siembra y estadio R4 de los cultivos. No fue posible explicar la variabilidad en los rendimientos

del tratamiento SJ3810, tanto la cota relativa del terreno como las propiedades edáficas analizadas, pero sí el pH del suelo condicionó directamente a la MS acumulada en la fitomasa aérea en estadio R5.

Estudios que comprenden varios años o varios sitios identifican como primer factor determinante de la productividad a las precipitaciones (Terra *et al.*, 2010, Bacigaluppo *et al.*, 2011), y en función de la condición climática se diferencia la identificación de variables influyentes. En Argiudoles y Argiacuoles de la zona de lomadas del Este (Uruguay), Terra *et al.* (2010) identifican como factor determinante de los rendimientos de soja en años secos al manejo de la rotación, la topografía y la textura del suelo, y para años húmedos a la topografía y la textura del suelo. En Argiudoles de Argentina, Bacigaluppo *et al.* (2011) establecen como umbral del efecto climático para cultivos de soja a precipitaciones de 200 mm durante el período reproductivo, y 180 mm de AD en el suelo al momento de la siembra. En situaciones con valores superiores a los citados, las condiciones climáticas de temperatura y radiación fueron determinantes junto con la fertilidad química y física del suelo. Por el contrario en ambientes con menores valores al umbral la oferta de precipitaciones durante el período reproductivo explicó en mayor medida las variaciones en los rendimientos.



## Capítulo 4: CONCLUSIONES

Se identificaron relaciones entre la textura del suelo y el contenido de MO y carbonato de Calcio, y a su vez relaciones entre el pH, la CE y el carbonato de Calcio. La altura relativa del terreno estuvo directamente relacionada a la textura, la MO y el carbonato de Calcio del suelo.

Los cultivos de soja y de maíz presentaron alta variabilidad en sus rendimientos a pesar de ser realizados bajo un manejo uniforme de procesos e insumos.

En las condiciones edáficas y climáticas del ensayo, los cultivos de maíz en fecha de siembra tardía presentaron condiciones más favorables para su desarrollo respecto a la fecha de siembra temprana. Aunque en las unidades observacionales con cota relativa baja, el suelo se saturó de humedad, y los cultivos registraron rendimientos inferiores a la media del tratamiento.

En cambio, la sequía durante el desarrollo del maíz de fecha de siembra temprana, que se agravó en las unidades observacionales con menor AD a la siembra, afectó negativamente el desarrollo del cultivo. Lo que provocó la senescencia temprana de las unidades observacionales con bajos contenidos de agua a la siembra, contenidos elevados de carbonato de Calcio y valores de pH alto. Para el caso de los cultivos de soja, la variedad comercial de grupo de madurez IV presentó mayor rendimiento en grano y menor variabilidad, respecto al GM III.

La propiedad con mayor influencia en los rendimientos de cultivos con excesos hídricos durante el ciclo fue la cota relativa del terreno, explicado por la falta de vías naturales de drenaje o escurrimiento de los excesos hídricos (sistema endorreico). Caso contrario bajo condiciones hídricas limitantes el agua disponible en el suelo al momento de la siembra presentó efecto directo sobre la productividad. Particularmente para los cultivos de maíz de siembra temprana el pH del suelo afectó negativamente a la productividad, al igual que la MS de la fitomasa aérea en soja del GM III, pero no fue posible identificar relación con dicha variable en los restantes tratamientos evaluados.

Los resultados del presente estudio permiten afirmar que la jerarquía de los factores edáficos y del paisaje que inciden sobre la productividad de los cultivos varía de acuerdo, y en interacción con las condiciones climáticas. Se observó que la cota relativa incidió de manera positiva sobre el rendimiento en condiciones de excesos hídricos, mientras que en condiciones de escasez de precipitaciones el agua almacenada en el suelo durante el barbecho fue el factor primordial. Estos resultados indican que para las condiciones edáficas, topográficas y climáticas de la región de

estudio no existiría una zonificación única, sino que habría que desarrollar zonas de diferentes potenciales productivos de acuerdo a distintos escenarios climáticos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abbate P.E., J.L. Dardanelli, M.G. Cantarero, M. Maturano, R.J.M. Melchiori & E.E. Suero. 2004. Climatic and water availability effects on water-use efficiency in wheat. *Crop Sci.* 483:474-483.
- Adamchuk V.I., R.B. Ferguson & G.W. Hergert. 2010. Soil Heterogeneity and Crop Growth. En: Oerke E.C. *et al.* (Eds.). *Precision Crop Production – the Challenge and Use of Heterogeneity*. Springer. Netherlands. Chapter 1, pp. 3-26.
- Aditya J.P., P. Bhartiya & A. Bhartiya. 2011. Genetic variability, heritability and character association for yield and component characters in soybean (*G. max* (L.) Merrill). *J. Central Eur. Agr.* 12(1):27-34.
- Alconada Magliano M.M., A. Bussoni, R. Rosa & J.J. Carrillo Rivera. 2009. El bio-drenaje para el control del exceso hídrico en Pampa Arenosa, Buenos Aires, Argentina. *Investigaciones Geográficas.* 68:50-72.
- Allison L.E., J.W. Brown, H.E. Hayward, L.A. Richards, L. Bernstein, M. Fireman, G.A. Pearson, L.V. Wilcox, C.A. Bower, J.T. Hatcher & R.C. Reeve. 1954. Determinación de las Propiedades de Suelos Salinos y Sódicos. En: Richards L.A. (Ed.) *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. Manual de Agricultura N°60. USDA. Riverside. Chapter 2, pp. 7-35.
- Alonso J., R. Michelena, P. Carfagno & M. Eiza. 2012. Aplicación del modelo Soil Water Characteristics a las condiciones de la Región Chaco-Pampeana Semiárida para la determinación de constantes hídricas de suelos. *Rev. Fac. Agronomía y Cs. Agroalim. UM.* 3(5):41-42.
- Álvarez C., J. Andriani, M. Eiza, R. Fernandez, R. Gil, R. Michelena & H. Sánchez. 2012. Metodología de muestreo de suelo. Protocolo básico común: Agua del suelo. En: Santos D.J. *et al.* (Eds.). *Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo*. Protocolos básicos comunes. Ediciones INTA. Buenos Aires. Pp. 57-59.
- Álvarez R. & R.S. Lavado. 1998. Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma.* 83:127-141.
- Andrade F.H., C. Vega, S. Uhart, A. Cirilo, M. Cantarero & O. Valentinuz. 1999. Kernel Number Determination in Maize. *Crop Sci.* 39:453-459.
- Andrade F.H., M.E. Otegui & C. Vega. 2000a. Intercepted Radiation at Flowering and Kernel Number in Maize. *Agron. J.* 92:92-97.

- Andrade F.H., L.A.N Aguirrezábal & R.H. Rizzalli. 2000b. Crecimiento y rendimiento comparados. En: Andrade F.H. & V.O Sadras (Eds.). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Ediciones INTA. Balcarce. Capítulo 3, pp. 61-96.
- Andrade F.H., P. Calviño, A. Cirilo & P. Barbieri. 2002. Yield Responses to Narrow Rows Depend on Increased Radiation Interception. *Agron. J.* 94:975-980.
- Andrade J.F., A. Cerrudo, R.H. Rizzalli & J.P. Monzon. 2012. Sunflower-Soybean Intercrop Productivity under Different Water Conditions and Sowing Managements. *Agron. J.* 104:1049-1055.
- Ashworth J., D. Keyes, R. Kirk & R. Lessar. 2001. Standard procedure in the hydrometer method for particle size analysis. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32(5-6):633-642.
- Bacigaluppo S., M.L. Bodrero, M. Balzarini, G.R. Gerster, J.M. Andriani, J.M. Enrico & J.L. Dardanelli. 2011. Main edaphic and climatic variables explaining soybean yield in Argiudolls under no-tilled systems. *Eur. J. Agron.* 35:247-254.
- Bai Y. & Y. Wang. 2011. Spatial Variability of Soil Chemical Properties in a Jujube Slope on the Loess Plateau of China. *Soil Sci.* 176(10):550-558.
- Baigorri, H., I.A. Ciampitti & F.O. García F.O. Manejo del cultivo de soja. 2009. En: García F.O. *et al.* (Eds.). Manual de manejo del cultivo de soja. 1ª ed. International Plant Nutrition Institute. Buenos Aires. Capítulo 2, 17-32 pp.
- Balzarini M., C. Bruno, M. Córdoba & I. Teich. 2015. Herramientas en el Análisis Estadístico Multivariado. Escuela Virtual Internacional CAVILA. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. Disponible en: [http://www.fca.proed.unc.edu.ar/pluginfile.php/7962/mod\\_book/chapter/1128/Compilado%20CAVILA.pdf](http://www.fca.proed.unc.edu.ar/pluginfile.php/7962/mod_book/chapter/1128/Compilado%20CAVILA.pdf) [Acceso: 22/03/2016].
- Barraco M. 2009. Productividad de soja [*Glycine max (L.) Merrill*] según propiedades edáficas de Hapludoles de la Región de la Pampa Arenosa. Magíster de la Universidad de Buenos Aires en Ciencias del Suelo.
- Basso B., M. Bertocco, L. Sartori & E.C. Martin. 2007. Analyzing the effects of climate variability on spatial pattern of yield in a maize-wheat-soybean rotation. *Eur. J. Agron.* 26:82-91.
- Basso B., C. Fiorentino, D. Cammarano, G. Cafiero & J. Dardanelli. 2012. Analysis of rainfall distribution on spatial and temporal patterns of wheat yield in Mediterranean environment. *Eur. J. Agron.* 41:52-65.

- Bell M.A., R.A. Fischer, D. Byerlee & K. Sayre. 1995. Genetic and agronomic contribution to yield gains: A case study for wheat. *Field Crops Res.* 44:55-65.
- Bernardos J.N., E.F. Viglizzo, V. Jouvét, F.A. Lértora, A.J. Pordomingo & F.D. Cid. 2001. The use of EPIC model to study the agroecological change during 93 years of farming transformation in the Argentine pampas. *Agric. Syst.* 69:215-234.
- Bongiovanni R.G., C.W. Robledo & D.M. Lambert. 2007. Economics of site-specific nitrogen management for protein content in wheat. *Comput. Electron. Agr.* 58:13-24.
- Borrás L. & M.E. Otegui. 2001. Maize kernel weight response to postflowering source-sink ratio. *Crop. Sci.* 49:1816-1822.
- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agron. J.* 54:464-465.
- Brown A., U. Martínez Ortiz, M. Acerbi & J. Corcuera (Eds). 2006. *La Situación Ambiental Argentina 2005*. 1a ed. Fundación Vida Silvestre Argentina. Buenos Aires. 587 pp.
- Calviño P.A. & V.O. Sadras. 1999. Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crops Res.* 63:237-346.
- Calviño P.A. & V.O. Sadras. 2002. On-farm assessment of constraints to wheat yield in the south-eastern Pampas. *Field Crops Res.* 74:1-11.
- Calviño P.A., F.H. Andrade & V.O. Sadras. 2003. Maize Yield as Affected by Water Availability, Soil Depth, and Crop Management. *Agron. J.* 95:275-281.
- Cambardella C.A. & E.T. Elliott. 1992. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:777-783.
- Cantarero M.G., S.F. Luque & O.J. Rubiolo. 2000. Efecto de la época de siembra y la densidad de plantas sobre el número de granos y el rendimiento de un híbrido de maíz en la región central de Córdoba (Argentina). *Agriscientia*. XVII:3-10.
- Capristo P.R., R.H. Rizzalli & F.H. Andrade. 2007. Ecophysiological Yield Components of Maize Hybrids with Contrasting Maturity. *Agron. J.* 99:1111-1118.
- Cárcova J., L.G. Abeledo & M.L. Pereira. 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. En: Satorre, E.H. *et al.* (Eds). *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Buenos Aires. Buenos Aires. Capítulo 6, pp 75-98.

- Cárcova J. & M.E. Otegui. 2001. Ear temperature and pollination timing effects on maize kernel set. *Crop. Sci.* 41:1809-1815.
- Cárcova J., M. Uribebarrea, L. Borrás, M.E. Otegui & M.E. Westgate. 2000. Synchronous Pollination within and between Ears Improves Kernel Set in Maize. *Crop. Sci.* 40:1056-1061.
- Caviglia O.P. & F.H. Andrade. 2010. Sustainable Intensification of Agriculture in the Argentinean Pampas: Capture and Use Efficiency of Environmental Resources. *Am. J. Plant Sci. Biotechnol.* 3:1-8.
- Chen J., W. Xu, J. Velten, Z. Xin & J. Stout. 2012. Characterization of maize inbred lines for drought and heat tolerance. *J. Soil Water Conserv.* 67(5):354-364.
- Cicchino M., J.I. Rattalino Edreira, M. Uribebarrea & M.E. Otegui. 2010. Heat Stress in Field-Grown Maize: Response of Physiological Determinants of Grain Yield. *Crop Sci.* 50:1438-1448.
- Cirilo A.G. & F.H. Andrade. 1994. Sowing Date and Maize Productivity: I. Crop Growth and Dry Matter Partitioning. *Crop Sci.* 34:1039-1043.
- Córdova C., S.P. Sohi, R.M. Lark, K.W.T. Goulding & J.S. Robinson. 2012. Resolving the spatial variability of soil N using fractions of soil organic matter. *Agric. Ecosyst. Environ.* 147:66-72.
- Corwin D.L. & S.M. Lesch. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comput. Electron. Agr.* 46:11-43.
- Creus C., M.E. Bazzalo, M. Grondona, F. Andrade & A.J. León. 2007. Disease Expression and Ecophysiological Yield Components in Sunflower Isohybrids with and without *Verticillium dahliae* Resistance. *Crop Sci.* 47:703-710.
- Damiano F. & M.A. Taboada. 2000. Predicciones de agua disponible usando funciones de pedotransferencia en suelos agrícolas de la Región Pampeana. *Ci. Suelo.* 18(2):77-88.
- De Fina A.L. 1992. Aptitud Agroclimática de la República Argentina. Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria. Buenos Aires. 402 pp.
- de Koning G.H.J., H. van Keulen, R. Rabbinge & H. Janssen. 1995. Determination of Input and Output Coefficients of Cropping Systems in the European Community. *Agric. Syst.* 48:485-502.
- Debaeke P. & A. Aboudrare. 2004. Adaptation of crop management to water-limited environments. *Eur. J. Agron.* 21:433-446.

- Di Pietro L.B., L. Marbán de Ravera & V. Richter de Kleber. 1986. Variabilidad espacial de parámetros físicos y químicos de un suelo de Pergamino. *Ci. Suelo*. 2:99-106.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada & C.W. Robledo. 2014. InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Díaz-Zorita M., A. Zamolinski & M. Zaniboni. 1993. Productividad de pasturas de alfalfa en dos suelos de la Región Noroeste Bonaerense. En: XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas. AACCS. Mendoza, 25 al 29 de octubre. 273 pp.
- Díaz-Zorita M., M.L. Pepi, & G.A. Grosso. 1998. Estudio de las precipitaciones en el Oeste Bonaerense. Ediciones INTA. General Villegas. Publicación técnica N°23. 15 pp.
- Díaz-Zorita M., G.A. Duarte & J.H. Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65:1-18.
- Doerge T.A. 1999. Management zone concepts, SSMG-2. Information Agriculture Conference, 9 al 11 de Agosto de 1999, Stewart Center, Purdue, IN.
- Doran, J.W. & A.J. Jones. 1996. Methods for Assessing soil quality. SSSA Special Publication Number 49. SSSA. Madison, Wisconsin.
- Egli D.B. 1993. Cultivar maturity and potential yield of soybean. *Field Crops Res.* 32:147-158.
- Fehr W.R., C.E. Caviness, D.T. Burmood & J.S. Pennington. 1971. Stage of Development Descriptions for Soybeans, *Glycine max* (L.). Merrill. *Crop Sci.* 11: 929-931.
- Ferreyra J.M., O. Valentinuz & S. Arisnabarreta. 2013. Cambios en los componentes numéricos del rendimiento en maíz (*Zea mays*) asociados con distintas eras de mejoramiento. En: Simposio Fertilidad 2013: Nutrición de Cultivos para la Intensificación Productiva Sustentable. IPNI. Rosario. Pp. 210-216.
- Ferreyra R.A., G.P. Podestá, C.D. Messina, D. Letson, J. Dardanelli, E. Guevara & S. Meira. 2001. A linked-modeling framework to estimate maize production risk associated with ENSO-related climate variability in Argentina. *Agric. For. Meteorol.* 107:177-192.
- Fridgen J.J., N.R. Kitchen, K.A. Sudduth, S.T. Drummond, W.J. Wiebold & C.W. Fraisse. 2004. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. *Agron. J.* 96:100-108.

- Fu B., C. Su, Y. Wei, I.R. Willett, Y. Lu & G. Liu. 2011. Double counting in ecosystem services valuation: causes and countermeasures. *Ecol. Res.* 26(1): 1-14.
- Galantini J.A., R.A. Rosell & J.O. Iglesias. 1994. Determinación de materia orgánica empleando el método de Walkley y Black en fracciones granulométricas del suelo. *Ci. Suelo.* 12:81-83.
- Galantini J.A. & L. Suñer. 2008. Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de Argentina. *Agriscientia.* 1:41-55.
- Ghersa C.M., D.O. Ferraro, M. Omacini, M.A. Martínez-Ghersa, S. Perelman, E.H. Satorre & A. Soriano. 2002. Farm and landscape level variables as indicators of sustainable land-use in the Argentine Inland-Pampa. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93:279-293.
- Godfray H.C.J., J.R. Beddington, I.R. Crute, L. Haddad, D. Laurence, J.F. Muir, J. Pretty, S. Robinson, S.M. Thomas & C. Toulmin. 2010. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science.* 327:812-818.
- Golberg A.D., M. de los A. Ruiz, A. Quiroga & O.A. Fernández. 2011. Conceptos generales sobre el estrés en las plantas. En: Golberg A.D. *et al.* (Eds.) ¿Qué le sucede a un cultivo cuando no llueve?. Ediciones INTA. Argentina. Capítulo 3, pp.53-76
- Golden Software. 2012. Surfer V. 11.0.642. Colorado, US.
- Gregoret M.C., M. Díaz-Zorita, J. Dardanelli & R.G. Bongiovanni. 2011. Regional model for nitrogen fertilization of site-specific rainfed corn in haplustolls of the central Pampas, Argentina. *Precis. Agric.* 12:831-849.
- Han T., C. Wu, Z. Tong, R.S. Mentreddy, K. Tan & J. Gai. 2006. Postflowering photoperiod regulates vegetative growth and reproductive development of soybean. *Environ. Exp. Bot.* 55:120-129.
- Haro R.J., J. Baldessari & M.E. Otegui. 2013. Genetic improvement of peanut in Argentina between 1948 and 2004: Seed yield and its components. *Field Crops Res.* 149:76-83.
- Horbe T.A.T., T.J.C. Amado, A.O. Ferreira & P.J. Alba. 2013. Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. *Precis. Agric.* 14:450-465.
- Hu M. & P. Wiatrak. 2012. Effect of Planting Date on Soybean Growth, Yield, and Grain Quality: Review. *Agron. J.* 104(3):785-787.
- Imbellone P.A. & J.E. Giménez. 1998. Parent materials, buried soils and fragipans in Northwestern Buenos Aires Province, Argentina. *Quat. Int.* 51/52:115-126.



- Imbellone P.A., J.E. Giménez & J.L. Panigatti. 2010. Proceso de ilimerización. En: Imbellone P.A. *et al.* (Eds.) Suelos de la Región Pampeana. Procesos de Formación. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires. Capítulo 3, pp. 81-147.
- INTA - RILSAV. 2010. Determinación de pH en suspensión suelo:solución en relación 1:2,5 m/v. Potenciometría.
- Jaramillo D.F. 2012. Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. Revista de la Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 1(1):73-87.
- Justo C. & N. Sueiro. 2013. Suelos predominantes en el Noroeste Bonaerense. En: Mendez, D. & A. Otero (Eds.). Memoria técnica 2012-2013. Estación Experimental Agropecuaria General Villegas. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires. Capítulo Producción Agrícola, pp. 141-143.
- Kay B.D., M.A. Hajabbasi, J. Ying & M. Tollenaar. 2006. Optimum versus non-limiting water contents for root growth, biomass accumulation, gas exchange and the rate of development of maize (*Zea mays* L.). *Soil Till. Res.* 88:42-54.
- Kitchen N.R., K.A. Sudduth, D.B. Myers, S.T. Drummond & S.Y. Hong. 2005. Delineating productivity zones on claypan soils fields using apparent soil electrical conductivity. *Comput. Electron. Agr.* 46:285-308.
- Kölbl A., M. Steffens, M. Wiesmeier, C. Hoffmann, R. Funk, J. Krümmelbein, A. Reszkowska, Y. Zhao, S. Peth, R. Horn, M. Giese & I. Kögel-Knabner. 2011. Grazing changes topography-controlled topsoil properties and their interaction on different spatial scales in a semi-arid grassland of Inner Mongolia, P.R. China. *Plant. Soil.* 340(1):35-58.
- Liu X., J. Jin, S.J. Herbert, Q. Zhang & G. Wang. 2005. Yield components, dry matter, LAI and LAD of soybeans in Northeast China. *Field Crops Res.* 93:85-93.
- López-Lozano R., M.A. Casterad, J. Herrero. 2010. Site-specific management units in a commercial maize plot delineated using very high resolution remote sensing and soil properties mapping. *Comput. Electron. Agr.* 73:219-229.
- Mass E. & G. Hoffman. 1977. Crop Salt Tolerance, Current Assessment. *J. Irrig. Drain. Eng.* 103(2):115-134.
- Mercau J.L., V.O. Sadras, E.H. Satorre, C. Messina, C. Balbi, M. Uribalarrea & A.J. Hall. 2001. On-farm assessment of regional and seasonal variation in sunflower yield in Argentina. *Agric. Syst.* 67:83-103.

- Meyer-Aurich A., T.W. Griffin, R. Herbst, A. Giebel & N. Muhammad. 2010. Spatial econometric analysis of a field-scale site-specific nitrogen fertilizer experiment on wheat (*Triticum aestivum* L.) yield and quality. *Comput. Electron. Agric.* 74:73-79.
- Miranda, W, M. Barraco, C. Justo & A. Lardone. 2013. Resultados de ensayos de sorgo y maíz en Hapludoles Típicos de la campaña 2012-2013. En: Mendez, D. & A. Otero (Eds.). Memoria Técnica 2012-2013. Estación Experimental Agropecuaria General Villegas. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires. Capítulo Producción Agrícola. Disponible en: [http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta\\_mt2013\\_miranda\\_resultados\\_ensayos\\_sorgo.pdf](http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_mt2013_miranda_resultados_ensayos_sorgo.pdf) [Acceso: 11/03/2016].
- Mizzou-ARS 2000. University of Missouri-Columbia & Agricultural Research Service of the United States Department of Agriculture. Management Zone Analyst Version 1.0.1. Disponible en: <http://www.ars.usda.gov/services/software/download.htm> [Acceso: 28/09/2014].
- Moscatelli, G., J.C. Musto, V. Nakama, R. Sobral & I. Puentes. 1990. Provincia de Buenos Aires Escala 1:500.000. En: SAGyP-INTA. Atlas de Suelos de la República Argentina. Escala 1:500.000 y 1:1.000.000. SAGyP-INTA. Buenos Aires. Tomo I, pp. 79-202.
- Nagore M.L., L. Echarte, F.H. Andrade & A. Della Maggiora. 2014. Crop evapotranspiration in Argentinean maize hybrids released in different decades. *Field Crops Res.* 155:23-29.
- Nosetto M.D., E.G. Jobbágy, R.B. Jackson & G.A. Sznaider. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Res.* 113:138-148.
- Ortega R.A. & O.A. Santibáñez. 2001. Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. *Comput. Electron. Agr.* 58:49-59.
- Otegui M.E. & R. Bonhomme. 1998. Grain yield components in maize. I. Ear growth and kernel set. *Field Crops Res.* 56:247-256.
- Otegui M.E., F.H. Andrade & E.E. Suero. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Res.* 40:87-94.
- Ovalles F.A. 2006. Introducción a la agricultura de precisión. Revista Digital CENIAP HOY N°12. Disponible en: [http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas\\_tec/ceniaphoy/articulos/n12/pdf/ovalles\\_f.pdf](http://www.sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_tec/ceniaphoy/articulos/n12/pdf/ovalles_f.pdf). [Acceso: 27/10/2015].

- Papadakis J. 1963. Soils of Argentine. *Soil Sci.* 15(5):356-366.
- Pérez M., L. Pérez & M. Díaz-Zorita. 2002. Producción de cultivos de verano según sistemas de labranza en el noroeste bonaerense. En: XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas. AACCS. Puerto Madryn, 16-19 de abril de 2002. En CD.
- Quiroga A., D. Funaro, E. Noellemeyer & N. Peinemann. 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil Tillage Res.* 90:63–68.
- R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Ramankutty N. & J.A. Foley. 1999. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochem. Cycles.* 13(4):997-1027.
- Rawls W.J. 1983. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Sci.* 135(2):123-125.
- Ritchie S.W. & J.J. Hanway. 1982. How a corn plant develops. Iowa State Univ. Special Report 48.
- Roberts D.C., B.W. Brorsen, J.B. Solie & W.R. Raun. 2013. Is data needed from every field to determine in-season precision nitrogen recommendations in Winter wheat?. *Precis. Agric.* 14:245-269.
- Robertson M., B. Isbister, I. Maling, Y. Oliver, M. Wong, M. Adams, B. Bowden & P. Tozer. 2007. Opportunities and constraints for managing within-field spatial variability in Western Australian grain production. *Field Crops Res.* 104:60-67.
- Rogovska N.P., A.M. Blackmer & A.P. Mallarino. 2007. Relationships between Soybean Yield, Soil pH, and Soil Carbonate Concentration. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71(4):1251-1256.
- Rubio G. & M.A. Taboada. 2013. Árbol de decisión para diagnosticar la capacidad productiva de suelos de la Región Pampeana. *Ci. Suelo.* 32(2):235-243.
- Ruffo M.T., G.A. Bollero, D.S. Bullock & D.G. Bullock. 2006. Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Precis. Agric.* 7:327-342.
- Sadras V.O. & S.P. Milroy. 1996. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review. *Field Crops Res.* 47:253-266.
- Sadras V.O., M. Ferreiro, F. Gutheim & A.G. Kantolic. 2000. Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. En: F.H. Andrade & V.O. Sadras (Eds.).

- Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Editorial Médica Panamericana S.A. Capítulo 2, pp. 29-60.
- SAGYP-INTA. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500.000. Proyecto PNUD ARG 85/019, editado por Secretaría de agricultura, Ganadería y Pesca, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. CIRN. Instituto de Evaluación de Tierras. 472 pp.
- Sainz Rozas H.R., H.E. Echeverría & H.P. Angelini. 2011. Niveles de Carbono Orgánico y pH en suelos agrícolas de las Regiones Pampeana y Extrapampeana Argentina. *Ci. Suelo*. 29(1):29-37.
- Salvatierra, P., C. Milán, E. Bonadeo & S. Olivo. 2013. Ajuste de modelo lineal mixto para estimar conductividad eléctrica 1:1 en suelos. En: Jornadas Argentinas de Conservación de Suelos. AACCS. CIRN. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Buenos Aires. 2 al 4 de julio de 2013.
- Sarlangue T., F.H. Andrade, P.A. Calviño & L.C. Purcell. 2007. Why Do Maize Hybrids Respond Differently to Variations in Plant Density? *Agron. J.* 99:984-991.
- Satorre E.H. 2004. Marco conceptual de la sustentabilidad: El Suelo y la Aplicación de Pronósticos Climáticos en la Región Pampeana. En: Seminario: Sustentabilidad de la Producción Agrícola. Resúmenes Ejecutivos. 29 y 30 de Marzo de 2004. JICA – INTA.
- Saxton K.E. & W.J. Rawls. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:1569-1578.
- Serrano J.M., S. Shahidian & J.R. Marques da Silva. 2013. Apparent electrical conductivity in dry versus wet soil conditions in shallow soil. *Precis. Agric.* 14:99-114.
- SIIA. 2011. Sistema Integrado de Información Agropecuaria. Dirección de Coordinación de Delegaciones. Disponible en: [http://www.sii.gov.ar/sst\\_pcias/estima/estima.php](http://www.sii.gov.ar/sst_pcias/estima/estima.php) [Acceso: 10/10/2011].
- Simmonds M.B., R.E. Plant, J.M. Peña-Barragán, C. van Kessel, J. Hill & B.A. Linqvist. 2013. Underlying causes of yield spatial variability and potential for precision management in rise systems. *Precis. Agric.* 14:512-540.
- Slafer G.A., D.J. Miralles, R. Savin, E.M. Whitechurch & F.G. González. 2004. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en trigo. En: Satorre, E.H. *et al.* (Eds.). Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Capítulo 7, pp. 99-132.

- Sobral R., A. Vignale, A. Alfieri & C. Pecorari. 1993. Suelos overos del Noroeste Bonaerense. Antecedentes, descripción, evaluación y conclusiones. En: Boletín de Divulgación Técnica S/N. INTA. Buenos Aires. 27 pp.
- Soil Survey Staff. 2014a. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Soil Survey Staff. 2014b. Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 2.0. R. Burt and Soil Survey Staff (Ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Stewart S.W. & L.M. Dwyer. 1999. Mathematical Characterization of Leaf Shape and Area of Maize Hybrids. *Crop Sci.* 39(2):422-427.
- Terra J., V. Pravia & A. Roel. 2010. Impacto de la intensidad de uso del Suelo y la variación del terreno sobre la productividad del cultivo de soja. Conference paper, Julio 2010. Taller Internacional Socioedad Uruguay Ciencia Suelo. ISTRO, Colonia, Uruguay. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/264158805\\_Impacto\\_de\\_la\\_intensidad\\_de\\_uso\\_del\\_suelo\\_y\\_la\\_variacion\\_del\\_terreno\\_sobre\\_la\\_productividad\\_del\\_cultivo\\_de\\_soja](https://www.researchgate.net/publication/264158805_Impacto_de_la_intensidad_de_uso_del_suelo_y_la_variacion_del_terreno_sobre_la_productividad_del_cultivo_de_soja) [Acceso: 04/04/2016].
- Teruggi M.E. 1957. The nature and origin of Argentine Loess. *J. Sediment. Petrol.* 27(3):322-332.
- Urricariet S., M. Niborski & C.M. Kvolek. 2011. Atributos del suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ci. Suelo.* 29(1):49-59.
- van Ittersum M.K. & R. Rabbinge. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Res.* 52:197-208.
- Viglizzo E.F. & F.C. Frank. 2006. Ecological interactions, feedbacks, thresholds and collapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century. *Quat. Int.* 158:122-126.
- Viglizzo E.F., F. Lertora, A.J. Pordomingo, J.N. Bernardos, Z.E. Roberto & H. Del Valle. 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agric. Ecosyst. Environ.* 83:65-81.
- Vitharana Y.W.A., M. Van Meirvenne, D. Simpson, L. Cockx & J. De Baerdemaeker. 2008. Key soil and topographic properties to delineate potential management classes for precision agriculture in the European loess area. *Geoderma.* 143:206-215.

- Walkey A. & T.A. Black. 1934. An examination of the method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Wang Y., X. Zhang & C. Huang. 2009. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China. *Geoderma.* 150:141-149.
- Wu Y.H., M.C. Hung & J. Patton. 2013. Assessment and visualization of spatial interpolation of soil pH values in farmland. *Precis. Agric.* 14:565-585.
- Yanai J., C.K. Lee, T. Kaho, M. Iida, T. Matsui, M. Umeda & T. Kosaki. 2001. Geostatistical analysis of soil chemical properties and rice yield in a paddy field and application to the analysis of yield-determining factors. *Soil Sci. Plant Nutr.* 47:291-301.
- Yang J., R.D. Hammer, A.L. Thompson & R.W. Blanchar. 2003. Predicting soybean yield in a dry and wet year using a soil productivity index. *Plant. Soil.* 250:175-182.
- Zaidi P.H., S. Rafique & N.N. Singh. 2003. Response of maize (*Zea mays* L.) genotypes to excess soil moisture stress: morpho-physiological effects and basis of tolerance. *Eur. J. Agron.* 19:383-399.
- Zaidi P.H., S. Rafique, P.K. Rai, N.N. Singh & G. Srinivasan. 2004. Tolerance to excess moisture in maize (*Zea mays* L.): susceptible crop stages and identification of tolerant genotypes. *Field Crops Res.* 90:189-202.
- Zamolinski A. 2000. Experiencias en Recuperación de Suelos Salinizados. En: *Publicación Técnica N°31.* INTA CRBAN EEA General Villegas. Buenos Aires. 16 pp.
- Zamolinski A., R. Casas, & A. Pittaluga. 1994. Manejo de suelos salinos en el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. En: *Publicación Técnica N°15.* EEA INTA General Villegas. Buenos Aires. pp. 28.
- Zaniboni C.M. 2012. Uso del suelo en el territorio agrícola ganadero del Oeste bonaerense. En: Mendez, D. & A. Otero (Eds.). *Memoria Técnica 2011-2012.* Estación Experimental Agropecuaria General Villegas. Buenos Aires. Capítulo Desarrollo, pp. 200-206.
- Zarate M.A. 2003. Loess of southern South America. *Quat. Sci. Rev.* 22:1987-2006.
- Zhang S., V. Sadras, X. Chen & F. Zhang. 2013. Water use efficiency of dryland wheat in the Loess Plateau in response to soil and crop management. *Field Crops Res.* 151:9-18.