



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Campo Experimental Villarino C.C. N° 14
S2125ZAA | Zavalla | Santa Fe | Argentina
Tel/Fax: +54 0341 497-0080
www.fcagr.unr.edu.ar
agro@unr.edu.ar



UNR
Universidad Nacional de Rosario

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

**ESTRATEGIAS DE MANEJO DE MAIZ EN SUELOS CON DIFERENTE APTITUD
PRODUCTIVA DEL NOROESTE BONAERENSE**

NATALIA MARIA PRECE

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN MANEJO Y CONSERVACIÓN
DE RECURSOS NATURALES**

Director de Tesis: Ing. Agr. MSc. Cristian Álvarez

Codirector de Tesis: Ing. Agr. MSc. Laura Ferreras

2013



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

Campo Experimental Villarino C.C. N° 14
S2125ZAA | Zavalla | Santa Fe | Argentina
Tel/Fax: +54 0341 497-0080
www.fcagr.unr.edu.ar
agro@unr.edu.ar

ESTRATEGIAS DE MANEJO DE MAIZ EN SUELOS CON DIFERENTE APTITUD PRODUCTIVA DEL NOROESTE BONAERENSE

Natalia María Prece

Ingeniera Agrónoma – Universidad Nacional de Rosario

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Magister en Manejo y Conservación de Recursos Naturales, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en ésta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en la localidad de Lincoln, provincia de Buenos Aires, durante el período comprendido entre julio 2009 y julio 2011, bajo la dirección del Ing. Agr. MSc. Cristian Álvarez y la co-dirección de la Ing. Agr. MSc. Laura Ferreras.

Natalia María Prece

Cristian Álvarez

Laura Ferreras

Defendida: de 20.....

DEDICATORIA

A mis dos amores Marcelo y Julia, quienes fueron mi motor para el desarrollo del
trabajo de tesis,

A mis padres Susana y Miguel por estar siempre junto a mí y hacerme más fácil la
cursada de la maestría,

A mis hermanos, Paula, Guillermo y Aldana por ser incondicionales amigos y
compañeros.

AGRADECIMIENTOS

A mis directores Cristian y Laura,
a mis compañeros de INTA Lincoln quienes me apoyaron y colaboraron en este
proceso,
a los investigadores y en especial a los ayudantes de campo y técnicos del laboratorio
de la EEA INTA General Villegas,
a Celina Beltrán y especialmente a Patricia Torres de la Facultad de Ciencias Agrarias
de la Universidad Nacional de Rosario, por sus contribuciones en el análisis
estadístico,
a INTA por el financiamiento del presente trabajo y
a Osvaldo y Enrique Saracco por abrirme la tranquera para realizar ciencia en su
establecimiento.

INDICE GENERAL

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivo general	4
1.3 Objetivos específicos	4
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	5
2.1 Diseño del experimento.	5
2.2 Caracterización del sitio experimental.....	6
2.3 Determinaciones en el suelo durante el desarrollo del cultivo.....	11
2.4 Evaluaciones sobre el cultivo de maíz.	11
2.5 Registros climáticos.....	13
2.6 Análisis estadístico	13
CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN EDAFO-CLIMÁTICA	14
3.1 Resultados y Discusión.....	14
3.1.1 Caracterización climática.....	14
3.1.1.1 Temperatura.....	14
3.1.1.2 Precipitaciones	15
3.1.2 Caracterización edáfica.	18
3.1.2.1 Caracterización físico-química.....	18
3.1.2.2 Índice de fertilidad	20
3.1.2.3 Resistencia a la penetración y perfiles de humedad edáfica.....	21
3.1.2.4 Infiltración y agregación del suelo.....	23
3.2 Consideraciones finales de la caracterización edáfica.....	26
CAPÍTULO IV. DINÁMICA DE AGUA	27

4.1	Resultados y Discusión.....	27
4.1.1	Agua total y agua disponible en el perfil efectivo	27
4.1.1.1	Contenido de agua total y agua disponible en el perfil efectivo comparando los ciclos de producción (CP).	28
4.1.1.2	Contenido de agua total y agua disponible en el perfil efectivo comparando los dos suelos.....	29
4.1.1.3	Contenido de agua total y agua disponible en el perfil efectivo comparando los tratamientos de fertilización nitrogenada.	31
4.1.1.4	Consideraciones finales del contenido de agua total y útil de los suelos estudiados.	32
4.1.2	Uso Consuntivo del cultivo de maíz	33
4.1.2.1	Análisis de los usos consuntivos del maíz considerando los ciclos de producción.	33
4.1.2.2	Análisis de los usos consuntivos del maíz considerando los tipos de suelos. 35	
4.1.2.3	Análisis de los usos consuntivos del maíz considerando los tratamientos de fertilización nitrogenada.	36
4.1.3	Eficiencia de uso del agua.....	38
4.1.3.1	Análisis de las eficiencias de uso de agua comparando los ciclos de producción.	38
4.1.3.2	Análisis entre suelos.....	40
4.1.3.3	Análisis entre tratamiento de fertilización nitrogenada.	40
	CAPÍTULO V. DINÁMICA DEL NITRÓGENO	44
5.1	Resultados y Discusión	44
5.1.1	Contenido de nitrógeno a la siembra	44
5.1.2	Contenido de Nitrógeno a cosecha.....	45
5.1.3	Contenido de Nitrógeno en la biomasa aérea.....	46

5.1.4	Balance aparente de Nitrógeno	48
5.1.5	Eficiencia del uso de nitrógeno	49
5.1.5.1	Factor parcial de productividad del nitrógeno	50
5.1.5.2	Eficiencia Agronómica	51
5.1.5.3	Eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado.	52
5.1.5.4	Eficiencia fisiológica de uso del nitrógeno.....	53
CAPÍTULO VI. PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO		55
6.1	Resultados y Discusión.	55
6.1.1	Fenología	55
6.1.2	Materia Seca.....	56
6.1.3	Rendimiento	57
6.1.4	Índice de Cosecha.....	59
6.1.5	Peso de mil granos (PMG)	60
6.1.6	Número de granos.....	61
6.2	Comentarios del capítulo.	63
CAPÍTULO VII. INTEGRADOR		65
7.1	Análisis de Componentes Principales.....	65
7.2	Análisis de correlación de Pearson entre variables de agua, nitrógeno y variables del cultivo.70	
CAPÍTULO VIII. CONSIDERACIONES FINALES		73
BIBLIOGRAFÍA.....		78
ANEXO.....		92

ABREVIATURAS Y SIMBOLOS

Símbolos	Significado
MO	Materia orgánica
HE	Hapludol éntico
HT	Hapludol típico
HTA	Hapludol thapto-árgico
CP	Ciclo de producción
Pe	Fósforo extractable
IMO	Índice de fertilidad
RP	Resistencia mecánica a la penetración
CC	Capacidad de campo
PMP	Punto de marchitez permanente
Dap	Densidad aparente
AD	Agua disponible
ADs	Agua disponible a la siembra
ADpc	Agua disponible en el período crítico
ADc	Agua disponible a cosecha
AT	Agua total
Hg	Humedad gravimétrica
CRA	Capacidad de retención de agua
e	Espesor de suelo
PG	Producción de grano
N	Nitrógeno
PMG	Peso de mil granos

NG	Número de granos por metro cuadrado
IC	Índice de cosecha
UC	Uso consuntivo
MS	Materia seca de la biomasa aérea en floración
UC T	Uso consuntivo total
UC s-fl	Uso consuntivo en el período siembra-floración
UC fl-mf	Uso consuntivo en el período floración-madurez fisiológica
Ns	Contenido de nitrógeno en el suelo a la siembra
Nc	Contenido de nitrógeno en el suelo a cosecha
Nabs	Contenido de nitrógeno absorbido por la biomasa aérea en floración
Nfert	Contenido de nitrógeno agregado como fertilizante
TCC	Tasa de crecimiento del cultivo
FPP _N	Factor parcial de productividad del nitrógeno
EA _N	Eficiencia agronómica del nitrógeno
ER _N	Eficiencia de recuperación del nitrógeno
EF _N	Eficiencia fisiológica del nitrógeno
BAN	Balance aparente de nitrógeno
CN	Curva número
EUA G	Eficiencia en el uso del agua para la producción de grano
EUA MS	Eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca

RESUMEN

Los suelos de la región del noroeste bonaerense argentino (Pampa Arenosa) presentan una gran heterogeneidad en sus aptitudes que condiciona la productividad de los cultivos agrícolas. La hipótesis de trabajo contempla obtener la mayor y más eficiente producción por unidad de recurso y/o insumo involucrado en suelos con y sin limitantes físicas, a los fines de reducir la brecha entre rendimientos alcanzados y potenciales del cultivo de maíz. La experiencia se realizó durante las campañas 2009-10 (año I) y 2011-12 (año II) en un lote productivo de la localidad de Martínez de Hoz, partido de Lincoln, provincia de Buenos Aires (Lat.: 37°15'S; Long.: 61°36'O) sobre un Hapludol típico (HT) y un Hapludol thapto-árgico (HTA). En un diseño en parcelas divididas completamente aleatorizado se probaron en el año I dos niveles de nitrógeno (mínimo: 0N y máxima: 200N) y en el año II, dos fechas de siembras (óptima y tardía) y las mismas estrategias de fertilización nitrogenada. Los suelos difirieron en la profundidad efectiva lo que condicionó la capacidad de almacenaje de agua disponible para el cultivo (CRA) y por lo tanto el régimen hídrico de los suelos fue diferente en cada situación más aun considerando las precipitaciones, las cuales durante la estación de crecimiento (octubre-abril) fueron de 771 mm en el año I y 1077 mm en el año II. Los rendimientos variaron entre 4416 y 10534 kg ha⁻¹ correspondiendo los mayores valores al HT, aunque las diferencias no fueron significativas entre suelos pero sí entre dosis de nitrógeno ($p \leq 0,05$). En años de precipitaciones normales (como lo fue el año I) las diferencias entre los tipos de suelos adquieren mayor importancia. Esta diferencia no se manifestó cuando se produjo un severo estrés hídrico en el período crítico del cultivo (año II, fecha de siembra óptima) donde no se observaron ventajas en suelos profundos ni en cultivos fertilizados para ninguna de las variables analizadas y se obtuvieron los menores valores de productividad del cultivo. Cuando se atrasó la siembra el déficit hídrico ocurrió en la etapa vegetativa por lo que se manifestaron las diferencias entre los suelos y la fertilización ($p \leq 0,05$). El componente del rendimiento más afectado fue el número de grano (NG) el cual mostró una alta correlación positiva con el rendimiento (r^2 : 0,94 y 0,79 para el HT y HTA en ese orden). La materia seca aérea a floración (MS) promedio fue de 9214 y 7684 kg MS ha⁻¹ para el HT y el HTA, respectivamente. El Hapludol típico presentó los mayores valores, sin embargo estas diferencias sólo fueron significativas ($p \leq 0,05$) en el tratamiento sin fertilización. La eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca y para la producción de grano fue mayor en el HT que en el HTA, independientemente del nivel de N pero esta diferencia no fue significativa ($p \leq 0,05$). Asimismo se logró mejorar las eficiencias de uso del agua al aplicar fertilización

nitrogenada. En función de los resultados obtenidos en este trabajo, se concluye que la respuesta del cultivo de maíz está estrechamente condicionada por la disponibilidad de agua, la cual depende de las características edáficas particulares de cada suelo. Asimismo, la respuesta depende de las precipitaciones ocurridas durante el desarrollo del cultivo, factor que determina la eficiencia con que se utiliza el nitrógeno aportado como fertilizante.

Palabras claves: maíz, profundidad efectiva, agua disponible, nitrógeno.

ABSTRACT

MAIZE MANAGEMENT STRATEGIES IN SOIL WITH PRODUCTION CAPACITY DIFFERENT OF THE NORTHWEST FITNESS BONAERENSE

The soils of the Sandy Pampa Argentina are very heterogeneous in their skills. The working hypothesis contemplates obtaining greater and more efficient production per unit of resource and / or input involved in soils with physical limitations, in order to reduce the gap between potential and achieved yields of corn. The experiment was conducted during 2009-10 and 2011-12 campaigns in a production batch of the town of Martinez de Hoz, on a Hapludol typical and Hapludol thapto-argic. In a split plot design completely randomized tested two nitrogen levels (minimum: 0N and maximum: 200N) and two planting dates (optimal and late). The soils differed in the effective depth which conditioned the water storage capacity and therefore the water regime was different in each situation especially considering rainfall. It was concluded that crop response is closely tied to the availability of water, which depends on the particular characteristics of each soil and rainfall during the growing season which determines the efficiency with which nitrogen is used.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Introducción

La actividad agrícola en la región pampeana, orientada fundamentalmente a la producción de los cultivos de soja (*Glycine max* (L.) Merrill), maíz (*Zea mayz* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.) y en menor medida girasol (*Helianthus annuus* L.), ha experimentado profundas transformaciones a partir de la década del noventa, no solo en cuanto a su expansión en superficie en detrimento de la superficie praderizada, sino también a través de un aumento de su productividad debido a un mayor uso de tecnologías (Satorre, 2003).

El noroeste bonaerense (región de la Pampa Arenosa, Argentina) no queda ajeno a estos nuevos escenarios de producción, Díaz-Zorita (1995) observó una tendencia general decreciente en las existencias ganaderas y un crecimiento notable de la superficie destinada a cultivos de cosecha gruesa. El proceso de agriculturización cobra mayor relevancia considerando que los suelos presentan cierta heterogeneidad que resulta de diferencias muy marcadas en las propiedades físicas, químicas y biológicas lo que determina que el manejo por ambientes se constituya en una estrategia de importancia (Justo y Scianca, 2011).

Los ambientes más restrictivos presentan suelos con clases texturales arenosas a franco arenosas en superficie, desarrollados a partir de materiales arenosos recientes de espesor variable y asentados sobre limos arenosos del Pampeano, de origen loésico y textura fina. Se caracterizan por tener bajos a medios contenidos de materia orgánica (MO) entre 18 a 25 g kg⁻¹ y moderada capacidad de almacenaje de agua (100-140 mm por metro de profundidad). Considerando la posición que ocupan en el relieve, se distinguen suelos con diferente aptitud productiva. En las lomas y en áreas donde el relieve es ondulado y el espesor del manto arenoso es profundo se han desarrollado suelos Hapludoles énticos (HE) de textura arenosa y con baja retención de humedad. En posiciones de media loma, se detectan suelos Hapludoles típicos (HT) con mayor capacidad de retención de humedad, con textura franco-arcillo-arenosa (SAGYP-INTA 1989). Los suelos HE y HT en general presentan capacidad de uso II y III, siendo los contenidos de MO de la capa superficial la propiedad edáfica que mejor describe las variaciones en la producción de cultivos en la región (Díaz-Zorita *et al.*, 1999). Cuando el relieve es suavemente ondulado y disminuye el espesor de la cobertura arenosa se encuentran suelos clasificados como Hapludoles thapto-árgicos (HTA), con presencia de un horizonte B textural enterrado. En estos suelos, no sólo varía la profundidad a la cual aparece el

horizonte argílico, sino además el espesor que adquiere, como así también su granulometría, acomplejándose en algunos casos con concentraciones excesivas de sodio o calcio. La acumulación de sodio provoca la dispersión de los coloides, mientras que el exceso de calcio determina la formación de concreciones granuladas o planchas de carbonato de calcio. Los Hapludoles thapto-árgicos son suelos de textura franca, pH débilmente ácido y con bajos contenidos de MO, apoyados en forma abrupta sobre depósitos de materiales finos franco-arcillo-limosos moderadamente alcalinos. Están clasificados con capacidad de uso III, IV o V con moderada capacidad de producción agrícola. En general la presencia de esta capa subsuperficial enriquecida con partículas finas (horizonte thapto) altera el movimiento de agua en el perfil y el consumo de nutrientes y en algunas circunstancias favorece el desarrollo de procesos de salinización y de alcalinización limitando el normal crecimiento de las raíces.

El espesor del suelo por encima del horizonte thapto ha sido identificado como uno de los factores edáficos estrechamente vinculado con la productividad de cultivos tales como trigo, maíz y alfalfa en el noroeste bonaerense (Díaz-Zorita *et al.*, 1993; Díaz-Zorita, 1997; Frye *et al.*, 1983; Sadras y Calviño 2001). La profundidad efectiva ha sido identificada por Fontana *et al.* (2006) como una de las variables de suelo que condiciona la capacidad de almacenaje de agua del perfil en trabajos realizados en la zona con tosca del centro norte de la provincia de La Pampa, Argentina.

Puricelli *et al.* (1997) proponen criterios de clasificación utilitaria de las tierras en función del tamaño de la zona de enraizamiento. Bravo *et al.* (2004) estudiando la variabilidad de las propiedades edáficas tendientes a evaluar el impacto sobre el rendimiento de trigo, han logrado identificar valores críticos de profundidad efectiva del perfil.

Esta influencia ha sido evaluada en un amplio rango de situaciones, comprobándose que los niveles críticos propuestos para clasificar los suelos por su espesor varían entre distintos sitios considerados (Riquier *et al.*, 1970) y entre cultivos (Thompson *et al.*, 1991; Sadras y Calviño, 2001), resultando además condicionado por las características climáticas reinantes (Engelstad *et al.*, 1961). En suelos donde las precipitaciones cubren el uso consuntivo del cultivo, suelos clasificados como condicionantes, suelen no ser limitantes de la productividad (Fontana *et al.*, 2006).

Numerosos estudios confirman, que en ambientes semiáridos existen restricciones de mayor relevancia que la oferta de radiación y de temperatura para maximizar el rendimiento de los cultivos estivales, tales como la disponibilidad hídrica

haciendo necesario considerar la oferta de agua cuando se planifica un cultivo de maíz en secano (Otegui *et al.*, 2002; Jarsún *et al.*, 2003). Trabajos realizados por Gregoret *et al.* (2006) determinaron que la aplicación de fertilizantes nitrogenados en el cultivo de maíz es una de las prácticas de manejo más importantes en ambientes semiáridos, pero la respuesta del cultivo a la fertilización está asociada a la disponibilidad de agua (González Montaner, 1997; Rufo y Parsons, 2004).

Por lo expuesto puede inferirse sobre la necesidad de considerar, en futuros estudios, cierto orden jerárquico entre los factores que inciden sobre la productividad de los cultivos y propiedades de Molisoles de las regiones semiárida y subhúmeda pampeana. No resultaría conveniente realizar estudios sobre nutrición de los cultivos o evaluar los efectos del manejo (como por ejemplo sistemas de labranza, rotaciones, curvas de respuestas a fertilización) sin considerar el régimen hídrico de los suelos. El mismo no sólo varía en la región a través del gradiente de precipitaciones (este - oeste) sino que además está fuertemente condicionado por el espesor y composición granulométrica de los suelos, pudiendo variar significativamente entre lotes de un mismo productor. Estudios de esta naturaleza resultarán básicos e imprescindibles para el desarrollo de una agricultura de precisión y manejo sustentable de los recursos en la región.

En este sentido, numerosos estudios concluyeron que las limitantes al consumo de agua son el principal factor responsable de las pérdidas de rendimiento en los cultivos de secano de la pampa arenosa (Andrade *et al.*, 1996; Dardanelli *et al.*, 2004).

Según Maddoni (2009) la oferta de agua en maíz se basa en las precipitaciones ocurridas durante el período comprendido entre la madurez fisiológica del cultivo precedente y la siembra, y las ocurridas durante el ciclo del cultivo. Fechas de siembra tardías en maíz surge como una estrategia de manejo fundamental. El atraso en la siembra del cultivo implicaría el aprovechamiento de las lluvias primaverales lo que recargaría el perfil del suelo y así en implantación habría mayor cantidad de agua disponible lo que independizaría al cultivo, en parte, de las variaciones en la oferta de agua durante su ciclo (Proot *et al.*, 2011).

Así, la elección de la fecha de siembra de un cultivo es una de las estrategias de manejo de gran impacto sobre la dinámica del agua en producciones en secano. Esta práctica de manejo daría estabilidad al cultivo de maíz en regiones donde son frecuentes los períodos de balance hídrico negativo durante la estación de crecimiento (Duarte, 2002).

La presencia de un horizonte B textural enterrado en los Hapludoles thapto-árgicos determina un comportamiento particular de estos suelos, respecto al resto de los Molisoles de la zona. Tanto el espesor de la capa que se encuentra por encima del horizonte thapto, como la composición granulométrica y espesor del horizonte B textural enterrado, son factores que modifican la capacidad productiva del suelo puesto que impactan sobre la capacidad de almacenaje de agua y el normal crecimiento de las raíces.

Un esquema productivo que permita realizar la siembra del cultivo de maíz en forma tardía de manera que se pueda optimizar el aprovechamiento de agua y nutrientes, acompañado de un programa de fertilización nitrogenada eficiente, permitiría incrementar el rendimiento en grano del cultivo. La hipótesis de trabajo contempla obtener la mayor y más eficiente producción por unidad de recurso y/o insumo involucrado en suelos con y sin limitantes físicas, a los fines de reducir la brecha entre rendimientos alcanzados y potenciales del cultivo de maíz entre ambos ambientes.

1.2 Objetivo general

Evaluar la productividad del cultivo de maíz en suelos Hapludoles con y sin presencia de un horizonte thapto-árgico de la región de la Pampa Arenosa Argentina.

1.3 Objetivos específicos

- Evaluar el impacto de la profundización del horizonte thapto sobre la capacidad de almacenaje de agua y la disponibilidad de nitratos en momentos críticos del cultivo.
- Evaluar la respuesta del cultivo de maíz a diferentes estrategias de fertilización nitrogenada.
- Evaluar si existen modificaciones en la productividad del cultivo de maíz como consecuencia de implementar fechas de siembra tardías.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Diseño del experimento.

La experiencia se realizó en el establecimiento “El Labrador”, durante las campañas 2009-2010 y 2011-2012 y se utilizó un diseño en Parcelas Divididas Completamente Aleatorizado.

En la campaña 2009-10 (año I), la parcela principal fue “tipos de suelos” con dos niveles (Hapludol típico y Hapludol thapto-árgico) y las subparcelas los tratamientos de fertilización nitrogenada (0N y 200N). En la campaña 2011-12 (año II) la parcela principal fue la misma: “tipos de suelos” (HT y HTA), las subparcelas las fechas de siembra (óptima y tardía) y las sub-subparcelas los tratamientos de fertilización nitrogenada (0N y 200N). En ambos años las parcelas midieron 4,2 x 50 m de largo (210 m²) y se realizaron tres repeticiones de cada tratamiento de fertilización (ver planos en el Anexo punto I).

El híbrido comercial utilizado DK 190 MGRR2 de ciclo intermedio fue elegido por su alto rendimiento y su estabilidad según los datos que aporta la Red Nacional de Ensayos Comparativos de Rendimiento de Maíz de INTA.

El primer año de evaluación (año I), el cultivo se sembró en la fecha óptima para la región (3 de noviembre), con una densidad de 8,6 plantas m⁻². El segundo año de evaluación (año II), las fechas de siembra fueron óptima (25 de octubre) y tardía (6 de diciembre) y se conservó la densidad del año I.

Los tratamientos de fertilización nitrogenada se realizaron al voleo en forma manual con urea (46-0-0) en estadios de V6 del cultivo (Ritchie y Hanway, 1982). Los niveles de nitrógeno (N) aplicados fueron:

0N: testigo sin el agregado de fertilizante

200N: fertilizado con 200 kg N ha⁻¹

A continuación se presentan las distintas combinaciones resultantes:

Tabla 1: Combinación de los factores en los dos años evaluados. CP: ciclo de producción, HT: Hapludol típico; HTA: Hapludol thapto-árgico.

CP	Año	Suelos	Fecha de siembra	Fertilización N
I	I	HT	óptima	0N
		HTA		200N
II	II	HT	óptima	0N
		HTA		200N
III	II	HT	tardía	0N
		HTA		200N

2.2 Caracterización del sitio experimental.

El estudio se desarrolló en un establecimiento con un planteo rotacional agrícola ubicado en la localidad de Martínez de Hoz en el Partido de Lincoln, provincia de Buenos Aires (Lat.: 37°15'S; Long.: 61°36'O), durante las campañas 2009-10 y 2011-12. El sitio fue seleccionado en función de sus características edáficas (Unidad Cartográfica: Complejo) que lo dispone como un ambiente representativo de la región. En la Figura 1 se presenta la ubicación geográfica del sitio experimental.



Figura 1. Localización del sitio experimental. Localidad de Martínez de Hoz, Partido de Lincoln, Provincia de Buenos Aires.

Se exponen en la Tabla 2 los datos de precipitaciones medias mensuales (mm) y media anual (mm) correspondientes a un período de 42 años (1969 - 2011) para el partido de Lincoln, donde se observa que la distribución de las precipitaciones es primavero-estivo-otoñal (ver detalles en el Anexo punto II). No obstante, los balances hídricos en la región respecto al nivel de evapotranspiración potencial resultan negativos (Figura 2).

Tabla 2. Precipitaciones medias mensuales y media anual (mm) correspondientes a una serie histórica de 42 años (1969-2011) en el partido de Lincoln. FUENTE: AER INTA Lincoln.

Partido	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Anual
Lincoln	134	117	142	93	52	32	29	29	55	107	103	98	991

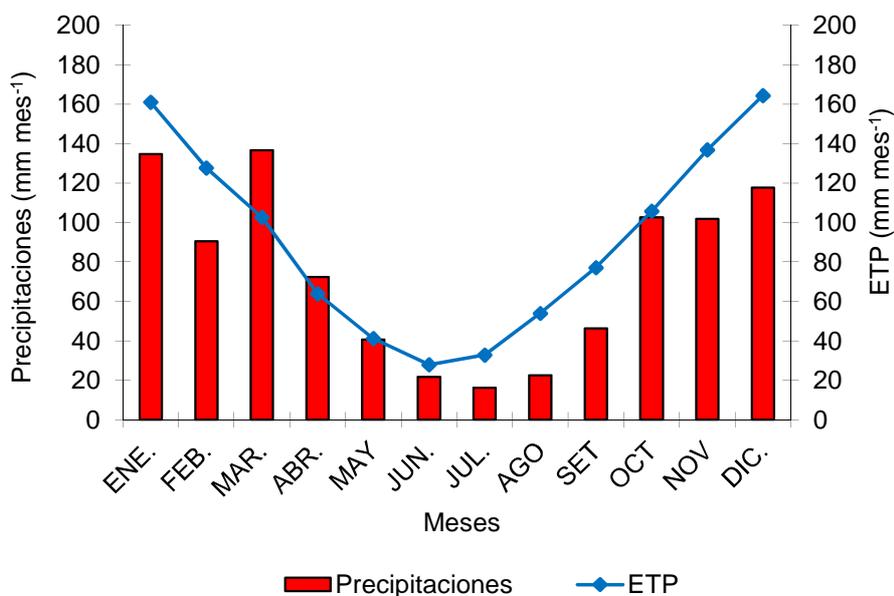


Figura 2. Balance Hídrico del partido de General Villegas. Precipitaciones medias mensuales históricas y evapotranspiración potencial (ETP) medias mensuales del partido de General Villegas. FUENTE: EEA INTA General Villegas.

La caracterización del Complejo y las distintas Series de Suelos que lo componen, como así también la secuencia de horizontes se presentan en las Tablas 3 y 4.

Tabla 3. Caracterización de la Unidad Cartográfica: Complejo (Or24). FUENTE: Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. SAGYP-INTA. 1989.

Símbolo	Or24	
Tipo de Unidad	Complejo	
Paisaje	Lomas extendidas con hasta 2% de cubetas	
Capacidad de Uso	IIs	
Índice de Productividad	75_B. 75_C.	
Componentes Taxonómicos	%	Posición
Ortiz de Rosas	70	Tendidos altos
Norumbega	20	Lomas
Estación Naón	10	Medias lomas bajas

Tabla 4. Secuencia de horizontes en Molisoles del Oeste Bonaerense para las series de suelo que componen el Complejo Or24. FUENTE: Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. SAGYP-INTA. 1989.

Ortiz de Rosas	Norumbega	Estación Naón
Hapludol thapto-árgico	Hapludol éntico	Hapludol típico
(HTA)	(HE)	(HT)
A	A	A
AC	AC	B2
IIB _{2t}	C	B3
IIB ₃		C
IICca		

Se seleccionaron las series Ortiz de Rosas y Estación Naón para llevar a cabo el estudio. En cada suelo seleccionado (HTA y HT) se realizó una calicata de 1,5 m de frente x 1,0 m de ancho y hasta la profundidad efectiva del suelo.

En cada calicata, se tomó una muestra compuesta de tres submuestras a intervalos de 0,20 m hasta la profundidad efectiva (1,2 m y 0,6 m en el Hapludol típico y el Hapludol thapto-árgico, respectivamente). Asimismo, en el horizonte superficial del HT se realizaron en los estratos 0,00 – 0,05; 0,05 – 0,10 y 0,10 – 0,20 m. La extracción de muestras se realizó utilizando un cilindro y eliminando las porciones laterales de suelo y en laboratorio se llevaron a cabo las determinaciones de los contenidos de arcilla, limo y fracciones de arena mediante el método de sedimentación y tamizado en húmedo.

Por otro lado, en laboratorio, las muestras fueron desmenuzadas a mano, se secaron al aire y se tamizaron por un tamiz de 2 mm de malla hasta obtener aproximadamente 100 g. Se determinó el contenido de materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black (1934) que consiste en la oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio en ácido sulfúrico concentrado durante 30 minutos, titulando luego el exceso del agente oxidante con sulfato amónico ferroso (Nelson y Sommers, 1982).

Por el método de Bray y Kurtz (1945) se determinó el contenido de fósforo extractable (Pe), la metodología consiste en utilizar una solución extractiva constituida por fluoruro de amonio y ácido clorhídrico. El fluoruro forma complejos con los iones hierro y aluminio, con la consecuente liberación del fósforo retenido en suelo por estos cationes. Durante la extracción, la presencia de ácido clorhídrico conduce a la disolución de los fosfatos de calcio más activos e impide la reprecipitación del fósforo liberado por acción del fluoruro. La concentración del fósforo se determina en base a la densidad óptica de un heteropoliácido de coloración azul formado por los ácidos fosfórico y molíbdico.

El pH se determinó en solución acuosa (1:2,5) por el método potenciométrico, el cual mide la actividad de los protones a través del potencial que se desarrolla en la interface de la solución de extracto de suelo con la pared de un electrodo reversible de vidrio. La acidez actual expresa la concentración de protones actualmente disociados en la solución del suelo.

Se calculó el cociente IMO (Pieri, 1995) en la capa de los primeros 0,20 m de suelo:

$$\text{IMO} = (\text{MO}) (\text{Limo} + \text{Arcilla})^{-1} (100) \quad (1)$$

Donde IMO es el índice de materia orgánica, MO es el contenido de materia orgánica en %, Limo es el contenido de limo en %, y Arcilla es el contenido de arcilla en %.

En condiciones de campo y en cada ensayo se determinó el perfil de resistencia mecánica a la penetración (RP) (O'Sullivan *et al.*, 1987), utilizando penetrómetro de golpe. El elemento activo presenta una sonda con punta cónica (ángulo 60°) y una capacidad de penetración de un metro. En cada suelo se definieron transectas de 3 m de longitud con evaluaciones de RP equidistantes a 0,30 m (10 puntos). En cada punto se registró la RP a intervalos de 0,05 m hasta los 0,60 m. Sobre cuatro de estos perfiles se determinó el contenido de agua de las distintas capas por el método gravimétrico (Gardner, 1986), mediante secado en estufa a una temperatura de 105°C hasta peso constante.

Se determinaron los contenidos de agua correspondientes a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) por el método de la membrana de Richards (Richards, 1965). Se calculó la capacidad de almacenaje de agua útil (CRA) en el perfil efectivo de los suelos por medio de la siguiente ecuación:

$$CRA = e * (CC - PMP) * Dap \quad (2)$$

Donde CRA es la capacidad de almacenaje de agua útil (mm); e: espesor de suelo explorado (m); CC: humedad de capacidad de campo (mm); PMP: humedad de punto de marchitez permanente (mm), y Dap: densidad aparente (Mg m⁻³).

Se midió densidad aparente (Dap) por el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986), utilizando un cilindro de 53 mm de diámetro y 60 mm de altura (volumen de 240 cm³).

Las determinaciones de infiltración se realizaron en el horizonte superficial de cada suelo y en el horizonte thapto mediante el uso de permeámetro o infiltrómetro de disco que posee un disco de 120 mm de diámetro (Perroux y White, 1988). Se realizaron cuatro repeticiones por cada sitio, teniendo la precaución de eliminar los residuos vegetales y nivelar la superficie del suelo en los lugares donde se ubicaron los infiltrómetros. Entre la base del disco y el suelo se colocó una delgada capa de arena para facilitar el contacto entre ambos.

Se extrajeron tres muestras sin disturbar de cada suelo y mediante fraccionamiento manual se determinó la distribución de agregados entre 8 y 2 mm, se realizaron tres repeticiones por tipo de suelo.

2.3 Determinaciones en el suelo durante el desarrollo del cultivo.

En cada tratamiento se tomaron cuatro muestras compuestas de suelo con barreno a intervalos de 0,20 m hasta la profundidad efectiva del perfil en tres momentos de desarrollo del cultivo: a la siembra, en el período crítico y a madurez fisiológica. Se determinó el contenido de agua por el método gravimétrico (Gardner, 1986), mediante secado en estufa a una temperatura de 105°C hasta peso constante. Posteriormente se calculó el contenido de agua disponible (AD) según la siguiente ecuación:

$$AD = e \times (Hg - PMP) \times Dap \quad (3)$$

Donde AD: agua disponible (mm), e: espesor de suelo (mm), Hg: humedad gravimétrica ($g\ g^{-1}$), PMP: humedad de punto de marchitez permanente ($g\ g^{-1}$) y Dap: densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$).

A la siembra del cultivo y en el estadio de madurez fisiológica, se extrajeron muestras compuestas de suelo a intervalos de 0,20 m hasta los 0,60 m de profundidad para cada uno de los tratamientos. Las muestras frescas fueron llevadas al laboratorio, molidas y homogeneizadas en húmedo y se determinó el contenido de nitratos por colorimetría usando ácido cromotrópico (West y Ramachandran 1966).

2.4 Evaluaciones sobre el cultivo de maíz.

En los tres ciclos de producción y cuando el cultivo alcanzó floración, se tomaron al azar cinco plantas por tratamiento, se cortaron al ras del suelo y se determinó la producción de materia seca aérea y el contenido de nitrógeno en la planta. Las muestras se remitieron al laboratorio para su secado en estufa a 60° hasta peso constante. Para la determinación de N se utilizó la técnica de digestión por el método Kjeldahl.

Además se tomaron al azar otras diez plantas por tratamiento y se determinó la intensidad media de coloración verde de la hoja de la espiga con clorofilómetro SPAD MINOLTA®.

Para la determinación de la producción de grano y componentes de rendimiento, en madurez fisiológica se cosecharon las espigas de una superficie de 4,2 m² y se hicieron tres repeticiones por tratamiento. En el ciclo de producción III se vio imposibilitado realizar el tratamiento de fertilización en el Hapludol thapto-árgico debido a la saturación hídrica del perfil por las intensas y frecuentes precipitaciones sucedidas que ocasionaron inundaciones en las parcelas. Cada una de las muestras cosechadas se trilló individualmente con maquinaria experimental y fueron pesadas

con balanza de precisión. Se les tomó humedad de grano y se corrigió el rendimiento (kg ha^{-1}) al 14,5% de humedad. Se contaron 250 granos por muestra y se los pesó para estimar peso de mil granos (PMG) y número de granos por metro cuadrado (NG).

Se calculó el Índice de Cosecha (IC) de cada tratamiento según la siguiente fórmula:

$$\text{IC} = \text{PG} (\text{MS} + \text{PG})^{-1} \quad (4)$$

Donde PG: Producción de Grano (kg ha^{-1}) y MS: Producción de Materia Seca a floración (kg ha^{-1}).

El Uso Consuntivo (UC) se obtuvo para el total del ciclo (UC T) y por períodos del cultivo, en primer lugar se analizó el UC entre siembra y floración (UC s-fl) y luego UC entre floración y madurez fisiológica (UC fl-mf). Se calculó haciendo la suma del contenido hídrico inicial del suelo y las precipitaciones efectivas obtenidas con el método de la curva número propuesto por USDA SCS (1985). Luego se descontó el contenido hídrico del suelo al momento de finalizar el período considerado, de acuerdo con el procedimiento indicado por López y Arrué (1997).

La eficiencia en la utilización del agua para la producción de grano (EUA G) se calculó haciendo el cociente entre la producción de grano del cultivo de maíz y el UC T.

Además se calculó la eficiencia en la utilización del agua para la producción de materia seca (EUA MS) como el cociente entre la producción de materia seca en floración y el UC s-fl.

En cada año evaluado se calculó el balance aparente de nitrógeno (BAN) como la diferencia entre la cantidad de nitrógeno (N) que entró y que salió del sistema. Se consideró al contenido de N en la biomasa en floración como el total de N absorbido por el cultivo, siendo:

$$\text{BAN} = \text{Ns siembra} + \text{N fert} - \text{N abs} - \text{Ns cosecha} \quad (5)$$

Donde, Ns siembra: es el contenido de nitrógeno en el suelo a la siembra; N fert: nitrógeno agregado como fertilizante; N abs: nitrógeno absorbido por la biomasa aérea en floración y Ns cosecha: contenido de nitrógeno en el suelo a cosecha del cultivo.

Se calcularon las eficiencias de uso del nitrógeno de acuerdo a los términos propuestos por Ladha *et al.* (2005), los cuales se detallan a continuación. Al igual que para el BAN se tomó el contenido de nitrógeno en planta al momento de floración como el N absorbido por el cultivo.

FPP_N - Factor parcial de productividad: $\text{kg de grano producido kg de N aplicado}^{-1}$

EA_N – Eficiencia agronómica: kg de incremento en el rendimiento kg de N aplicado⁻¹

ER_N – Eficiencia de recuperación del fertilizante: diferencia de kg de N absorbido kg de N aplicado⁻¹

EF_N – Eficiencia fisiológica: kg de incremento en el rendimiento kg N absorbido⁻¹

2.5 Registros climáticos

Se tuvieron en cuenta los registros de temperatura media mensual de la Estación Meteorológica de INTA General Villegas durante los dos años evaluados ya que no se dispone de registros oficiales en el partido de Lincoln.

Se llevó un registro de las precipitaciones diarias durante el período octubre-abril de los dos años evaluados con pluviómetro colocado *in-situ*.

Además se utilizaron las series históricas del partido de Lincoln para determinar la probabilidad de ocurrencias de precipitaciones mensuales y periódicas a través del programa Octave 3.0.1 (2008) utilizando la función de gama incompleta.

Las precipitaciones efectivas durante el período octubre-abril de los tres ciclos de producción evaluados fueron calculadas utilizando el método de la Curva Número (CN) propuesto por USDA SCS (1985), donde a través del parámetro CN se determina la precipitación que realmente infiltra en el suelo, el valor de CN es dependiente del uso del suelo, la pendiente, de la humedad previa a la lluvia estudiada, etc. Para este estudio se utilizó la curva número 79 según sugerencias del Ing. Agr. Dardanelli (comunicación personal).

2.6 Análisis estadístico

Los resultados de los ensayos se analizaron estadísticamente mediante ANOVA y las diferencias entre medias a partir del test de Tukey, con el software estadístico InfoStat versión 2008 (Di Rienzo *et al.*, 2008).

Se realizaron análisis de regresión lineal y correlación de Pearson utilizando el software InfoStat versión 2008 (Di Rienzo *et al.*, 2008)

Para el análisis de componentes principales se utilizó el software estadístico PC-ORD versión 6.0 (McCune *et al.*, 2011).

CAPÍTULO III. CARACTERIZACIÓN EDAFO-CLIMÁTICA

3.1 Resultados y Discusión.

3.1.1 Caracterización climática.

3.1.1.1 Temperatura.

Las temperaturas medias históricas (serie 1974-2010) y las registradas durante las dos campañas agrícolas analizadas corresponden a la Estación Meteorológica de INTA EEA General Villegas ya que localmente no se disponen de datos oficiales (Anexo punto III).

Se observó que en general durante los dos años evaluados se registraron temperaturas similares o superiores al promedio histórico (serie 1974-2010). La mayor diferencia con el promedio histórico se observó durante el período estival en el año II.

Los registros térmicos, arrojaron máximas medias de 24,2 y 25,7 °C en el mes de enero y mínimas medias en el mes de julio 8,2 y 8,5 °C para las campañas 2009-10 y 2011-12 , respectivamente (Figura 3). Durante la estación de crecimiento del cultivo los valores registrados oscilaron entre 17,7 y 24,2 °C en el año I y 16,7 a 25,7 °C en el año II. Los registros térmicos que se sucedieron en los dos años de evaluación son característicos de la zona y si bien se observó un aumento de las temperaturas máximas en el año II, estos registros no fueron significativos como para afectar el desarrollo de los cultivos.

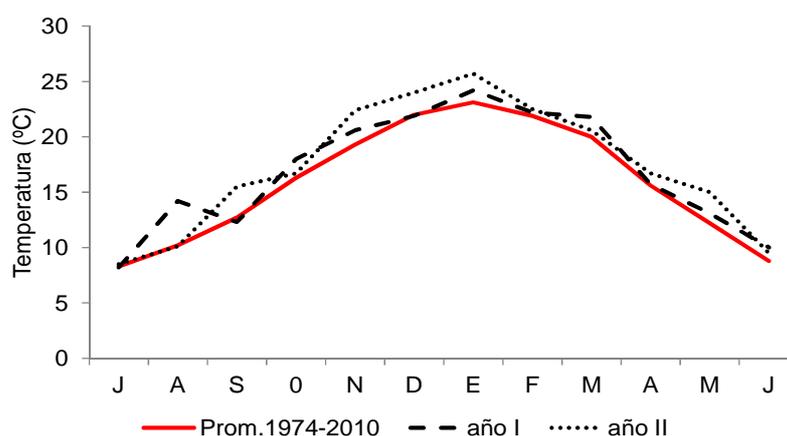


Figura 3. Temperaturas medias mensuales (°C) de los dos años evaluados y de la serie histórica (1974-2010) registradas en la Estación Meteorológica en la EEA INTA General Villegas. FUENTE: INTA General Villegas.

3.1.1.2 Precipitaciones

La probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones durante el período octubre–marzo en el partido de Lincoln, se presentan en la Figura 4. Para su mejor interpretación, se indicó con una línea el 80% de probabilidad de ocurrencia de precipitaciones y se observó que la misma alcanzó los 550 mm, cantidad suficiente para cubrir los requerimientos hídricos del cultivo de maíz. Algunos autores han comprobado que para obtener una producción máxima el maíz, requiere en su ciclo entre 400 y 700 mm dependiendo del clima (Doorenbos y Pruitt, 1977).

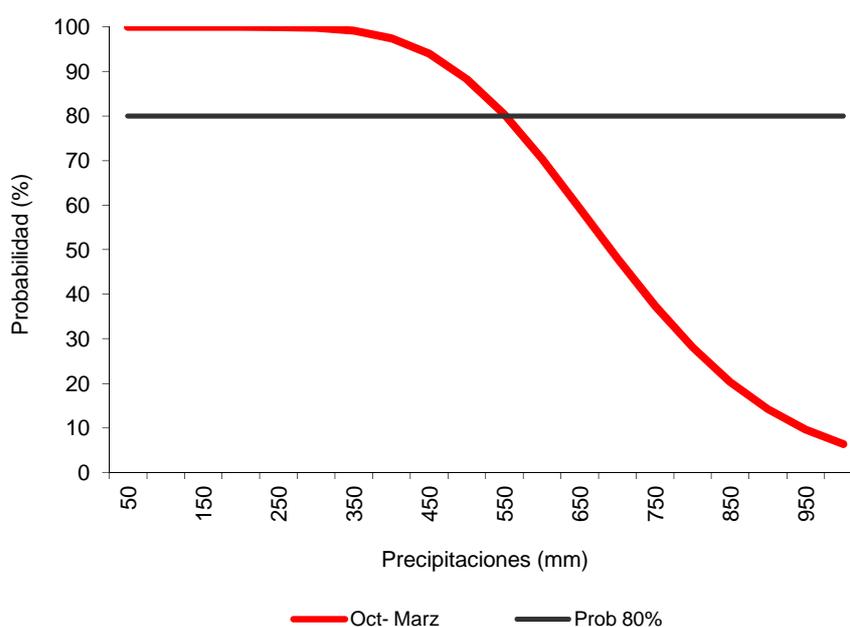


Figura 4. Probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones (%) durante el período comprendido entre octubre y marzo, en el partido de Lincoln. La línea horizontal indica el 80% de probabilidad de ocurrencia.

Los requerimientos hídricos del maíz varían entre 530 a 575 mm según datos publicados por Andrade *et al.* (1996) para ambientes de Balcarce y Pergamino. Estudios realizados por Proot *et al.* (2011) determinaron usos consuntivos (mm de agua consumidos durante el ciclo) para maíces tardíos entre 566 y 602 mm en Hapludoles de General Villegas, mientras que Scianca *et al.* (2010) proponen valores promedio de 530 mm. El uso consuntivo normalmente resulta superior a las precipitaciones, es decir que la cantidad y distribución de éstas no logran cubrir los requerimientos hídricos, limitando la productividad, sin embargo para la zona en

estudio existe un 80% de probabilidad de ocurrencia de precipitaciones de 550 mm durante la estación de crecimiento del cultivo.

Las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo (octubre-abril) variaron entre 771 mm en el año I y 1077 mm en el año II (Figura 5) siendo el promedio histórico de 794 mm de agua durante la estación de crecimiento.

El año I se caracterizó por tener similar cantidad y distribución que el promedio histórico, con picos en diciembre y febrero (Figura 5), llegando al momento crítico del maíz con una buena cantidad de agua acumulada en el perfil; sin embargo en el año II la situación fue muy diferente, durante el mes de diciembre y hasta fines de enero no se registraron lluvias y es en ese momento donde se centró el período crítico del cultivo sembrado en fecha óptima, el cual dependió únicamente del agua almacenada en el perfil. Cuando la siembra se atrasó se pudo eludir esta deficiencia hídrica de la etapa crítica del cultivo.

Diciembre fue un mes contrastante para los dos años, ya que en el año I las precipitaciones superaron en un 110% a la media histórica, mientras que en el año II fueron inferiores al promedio en un 93%. A partir de enero se observó un aumento significativo de las precipitaciones siendo similar a la media histórica en el año I y muy por encima de la media histórica en el año II (Figura 5).

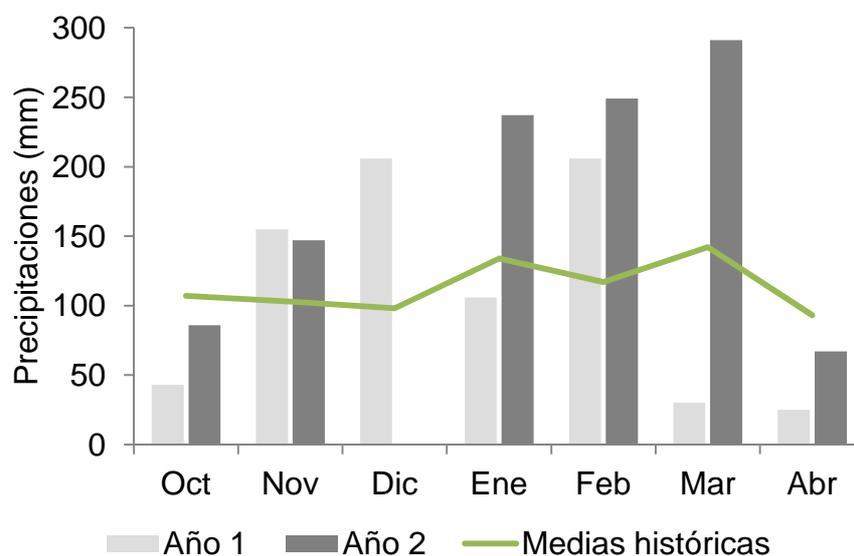


Figura 5. Precipitaciones (mm) del período octubre-abril para los dos años evaluados en el sitio experimental (Martínez de Hoz) y medias históricas (serie 1969-2011) registradas en el partido de Lincoln. FUENTE: AER INTA Lincoln.

Del análisis de las precipitaciones acumuladas por períodos decádicos se dedujo que el aumento de las mismas dado en el mes de enero del año II comenzó en la última década de dicho mes (Figura 6). Además se observó con claridad la disparidad del período diciembre-enero entre los dos años, donde en el año II las precipitaciones acumuladas estuvieron por debajo del promedio histórico a diferencia del año I que fueron superiores.

En el año II, a partir de enero se observó un exceso de precipitaciones acumuladas que imposibilitaron la fertilización y posterior cosecha de las parcelas del Hapludol thapto-árgico del ciclo de producción III.

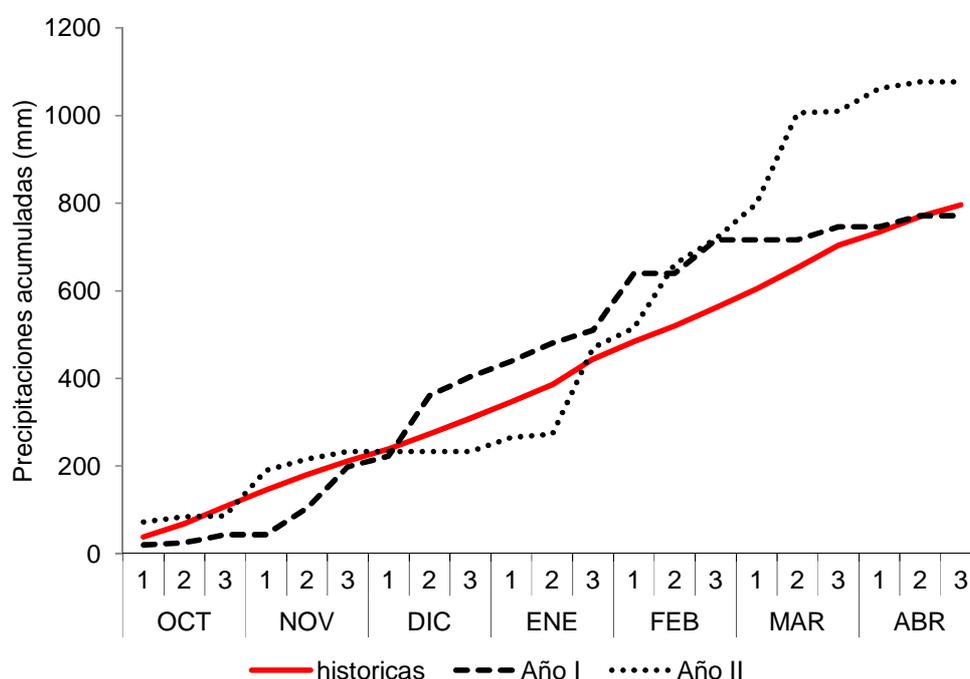


Figura 6. Precipitaciones acumuladas (mm) del período octubre-abril presentadas por décadas para los dos años evaluados en el sitio experimental y medias históricas (serie 1969-2011) del partido de Lincoln.

En general los cultivos estivales están expuestos a sequías erráticas, de intensidad y duración variables que se originan por una combinación de factores atmosféricos (ej. lluvias, altas temperaturas) o edáficos (ej. tosca o pan de arcilla cercanos a la superficie). Dependiendo de la intensidad, duración y el momento de ocurrencia las sequías pueden tener efectos variables desde positivos hasta devastadores (Andrade y Sadras, 2000).

3.1.2 Caracterización edáfica.

3.1.2.1 Caracterización físico-química

Para la comparación estadística en el Hapludol típico (HT) se promediaron los valores de los espesores de suelo que componen la profundidad de los primeros 0,20 m de suelo. Los valores hallados (Tabla 5) son representativos de los suelos y se corresponden con los encontrados por otros autores en la región de estudio (Barraco y Díaz-Zorita, 2005; Zubillaga *et al.*, 2006; Barraco *et al.*, 2010a; Álvarez *et al.*, 2006; López de Sabando, 2005; Quiroga *et al.*, 2005).

Las fracciones texturales del estrato 0,00 – 0,20 m mostraron diferencias significativas entre los suelos ($p \leq 0,05$). El Hapludol thapto-árgico (HTA) presentó mayor contenido de arcilla y limo pero menor contenido de arena que el Hapludol típico (Tabla 5). Esta relación fue similar para la profundidad de 0,40 - 0,60 m. En la profundidad de 0,20 – 0,40 m el HTA fue el que presentó mayor contenido de arena y menor proporción de arcilla y limo con respecto al HT.

Cuando se evaluó materia orgánica (MO) en todas las profundidades de suelo se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) a favor del HTA. Los contenidos de materia orgánica en los primeros 0,20 m de suelo variaron entre 22,1 y 23,9 g kg⁻¹ para el Hapludol típico y Hapludol thapto-árgico, en ese orden. Similares resultados fueron encontrados por diversos autores en Hapludoles de la región de la pampa arenosa (Zubillaga *et al.*, 2006; Barraco y Díaz-Zorita, 2005). Sin embargo existen otros trabajos en los cuales se reportaron valores promedios superiores (Díaz-Zorita *et al.*, 2004; Álvarez *et al.*, 2006; Barraco *et al.*, 2010a).

No se encontraron diferencias significativas entre los suelos para pH, pero sí para contenido de fósforo extractable (Pe) en la capa de 0,00-0,20 m y 0,40-0,60 m ($p \leq 0,05$). El pH promedio en el estrato de 0,00 - 0,20 m fue de 5,7 y 6,0 para el Hapludol thapto-árgico y Hapludol típico, respectivamente, estando en el rango de niveles promedios observados en la Pampa Arenosa (Barraco *et al.*, 2010b; Álvarez *et al.*, 2006; y López de Sabando, 2005). El nivel promedio de Pe fue de 11,6 y 6,1 mg kg⁻¹, correspondiendo el mayor valor al HT y el menor al HTA. Estos valores son similares a los encontrados por Álvarez *et al.* (2006). Sin embargo, otros autores hallaron niveles superiores de Pe en HTA y HT de la región (Díaz-Zorita *et al.*, 2004; Barraco *et al.*, 2010; Barraco *et al.*, 2007; López de Sabando, 2005).

Al analizar la densidad aparente (Dap) se observaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre los suelos en la capa de 0,40 – 0,60 m, notándose un aumento de la misma en el HTA lo cual significaría la presencia del horizonte thapto. Estos resultados

se explicarían por el mayor contenido de arena del HT que le confiere una elevada porosidad de origen textural.

Las constantes hídricas determinan la capacidad de almacenar agua (CRA) de los suelos, siendo el Hapludol típico el suelo que mayor agua CRA presentó (180 mm) comparado con el Hapludol thapto-árgico (41 mm). Estos valores se condicen con lo hallado por Quiroga *et al.* (2005) quienes reportaron un rango entre 50 – 200 mm en la región semiárida pampeana.

Tabla 5. Caracterización físico-química del sitio experimental. Textura (arcilla, limo, arena), materia orgánica (MO), pH, fósforo extractable (Pe), densidad aparente (Dap), contenido de humedad a capacidad de campo (CC) y contenido de humedad a punto de marchitez permanente.

Profundidad	Arcilla	Limo	Arena	MO	pH	Pe	Dap	CC	PMP
m	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹		mg kg ⁻¹	Mg m ⁻³	mm	mm
Hapludol típico									
0,00-0,05	81 b	346 b	573 a	25,5 b	6,1 a	17,1 a	1,35 a	172	114
0,05-0,10	89 b	348 b	563 a	21,9 b	5,9 a	10,2 a	1,35 a	213	88
0,10-0,20	149 b	338 b	513 a	18,8 b	6,0 a	7,6 a	1,35 a	199	96
0,20-0,40	249 a	360 a	391 b	12,4 b	6,4 a	5,8 a	1,31 a	243	100
0,40-0,60	189 b	218 b	593 a	07,0 b	6,4 a	4,5 b	1,31 b	162	73
0,60-0,80	179	208	613	04,6	6,8	4,5	1,31	181	58
0,80-1,00	179	198	623	02,6	7,1	3,2	1,32	213	88
1,00-1,20	139	188	673	02,1	7,4	3,2	1,36	199	96
Hapludol thapto-árgico									
0,00-0,20	141 a	381 a	478 b	23,9 a	5,7 a	6,1 b	1,33 a	208	157
0,20-0,40	189 b	380 a	431 a	14,7 a	6,9 a	6,1 a	1,30 a	248	206
0,40-0,60	294 a	363 a	343 b	08,6 a	6,8 a	5,8 a	1,45 a	273	215

Letras distintas en sentido vertical y para la misma profundidad indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre suelos. A los fines estadísticos para la comparación entre suelos se promediaron los valores correspondientes a las profundidades entre 0,00 – 0,20 m del Hapludol típico.

3.1.2.2 Índice de fertilidad (IMO)

El índice de materia orgánica o de fertilidad (IMO), dado por el cociente entre la materia orgánica y el contenido de partículas finas (Limo + Arcilla) se relaciona con la fertilidad potencial de los suelos. Es un indicador del nivel de degradación de los suelos, menores valores indican en general suelos más degradados (Pieri, 1995 y Quiroga *et al.*, 2006a).

El IMO se evaluó a intervalos de 0,20 m (En el Hapludol típico se promediaron los valores de las profundidades que componen este intervalo). Se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre los suelos para todas las profundidades evaluadas (Tabla 6). El Hapludol thapto-árgico presentó valores significativamente menores que el Hapludol típico en todas las profundidades evaluadas excepto en el estrato de 0,20 - 0,40 m.

Tabla 6. Índice de fertilidad (IMO) a intervalos de 0,20 m en los dos suelos estudiados.

Profundidad (m)	Hapludol típico	Hapludol thapto-árgico
0,00-0,20	4,95 a	4,58 b
0,20-0,40	2,04 b	2,58 a
0,40-0,60	1,72 a	1,31 b

Letras distintas en sentido horizontal indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

Del análisis de correlación de Pearson entre el IMO y el resto de las variables edáficas (Tabla 7) se observó que el Índice de fertilidad se correlacionó fuertemente y en forma positiva con el contenido de MO (0,97; $p < 0,0001$), Pe (0,86; $p = 0,0007$) y Limo (0,65; $p = 0,0298$) y se asoció negativamente con el pH (-0,85; $p = 0,0009$) y el contenido de Arcilla (-0,66; $p = 0,0274$). La fuerte asociación positiva entre el IMO y la MO también fue observada por López de Sabando (2005) en tres lotes de producción de la Pampa Ondulada Argentina, sin embargo, Bagnato *et al.* (2010) obtuvieron valores inferiores en los primeros 0,20 m del perfil y similares para el resto de las profundidades en ambientes de loma de un Hapludol éntico de La Pampa (Buenos Aires).

Tabla 7. Análisis de Correlación de Pearson para la variable Índice de fertilidad (IMO) en relación con las demás variables de suelo evaluadas en la caracterización. Se presentan los coeficientes y sus probabilidades.

Variables	IMO	
	Pearson	p-valor
Arcilla	-0,66	0,0274
Limo	0,65	0,0298
Arena	-0,11	0,7579
MO	0,97	<0,0001
pH	-0,85	0,0009
Pe	0,86	0,0007
Dap	-0,01	0,9822
CC	-0,22	0,5096
PMP	0,19	0,583

3.1.2.3 Resistencia a la penetración y perfiles de humedad edáfica

Las medidas de resistencia a la penetración del suelo son altamente dependientes de la humedad edáfica, por lo que requieren ser determinadas en forma conjunta (Cerana *et al.*, 2005; Paredes *et al.*, 2009). Se encontró que la RP osciló entre 0,34 y 1,72 MPa en el HT y entre 0,44 y 3,64 MPa en el HTA. En el Hapludol thapto-árgico a los 0,35 m la RP empieza a incrementarse llegando a valores de 2,15 MPa a la profundidad de 0,45 m, alcanzando el máximo valor de 3,64 MPa a los 0,60 m (Figura 7).

Se observó que en ambos suelos la humedad edáfica siempre estuvo cercana a capacidad de campo (CC) (Figura 8). Numerosos investigadores han estudiado en la relación que existe entre la resistencia a la penetración y el contenido hídrico. Ayers y Perumpral (1982) encontraron una relación inversa entre el índice de cono y el contenido de humedad, similares resultados fueron hallados por Ehlers *et al.* (1983). Como las diferencias en el contenido de humedad entre los suelos no fueron significativas, no se corrigió los valores de RP por humedad.

Los valores de RP obtenidos en el Hapludol típico se encuentran por debajo del umbral crítico de 2 MPa, sugerido por Letey (1985) para el crecimiento de las raíces, siendo el valor máximo de 1,72 MPa a la profundidad de 0,20 m a partir de la cual el suelo ofreció menor RP. En el HTA, hasta los primeros 0,30 m de profundidad, los valores de RP fueron similares.

Existen experiencias realizadas por Taylor y Burnet (1964), quien halló umbrales de 2,5 MPa para la detención del crecimiento de raíces de algodón. Este umbral fue ampliado luego a otros cultivos (Glinski y Lipiec, 1990; Gupta y Allmaras, 1987).

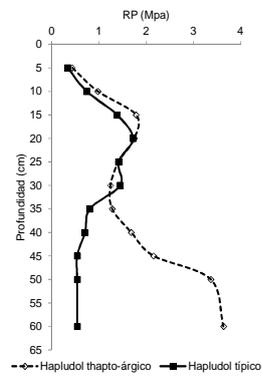


Figura 7. Perfil de Resistencia mecánica a la Penetración (RP) medida como índice de cono (MPa) en profundidad, para el Hapludol típico y el Hapludol thapto-árgico.

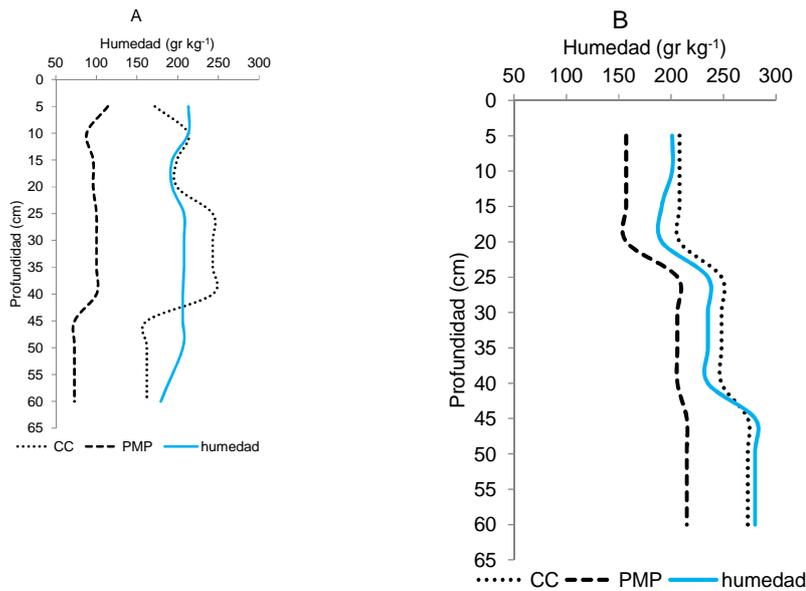


Figura 8. Perfiles de humedad gravimétrica (gr kg^{-1}) de los dos suelos evaluados A: Hapludol típico y B: Hapludol thapto-árgico, con sus correspondientes constantes hídricas. CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente.

3.1.2.4 Infiltración y agregación del suelo

Se determinó velocidad de infiltración e infiltración acumulada en los dos suelos y en el horizonte thapto. En los tres casos la velocidad de infiltración decrece en el tiempo rápidamente, siendo elevada al comenzar el proceso, pero a medida que transcurre el tiempo se estabiliza (tramo asintótico de la curva) alcanzando una velocidad constante o “estacionaria” llamada Infiltración Básica y que se aproxima al valor de conductividad hidráulica (Quiroga *et al.*, 2012), en cambio, la infiltración acumulada es una función creciente del tiempo

Se encontraron mayores valores de velocidad de infiltración en el Hapludol típico en comparación con el Hapludol thapto-árgico, resultando en valores inferiores en el caso del horizonte thapto propiamente (Figura 9). La infiltración acumulada a la hora de evaluación promedio osciló entre 9,6 y 20,8 cm h^{-1} ; correspondiendo los mayores valores al Hapludol típico y los menores al horizonte thapto. El Hapludol thapto-árgico en superficie presentó un valor intermedio de infiltración acumulada a la hora de evaluación (14,4 cm h^{-1}) (Figura 10).

Ambos suelos tienen en el estrato superficial la mayor proporción de agregados mayores a 8 mm, responsables de la conducción del agua, aunque no se encontraron diferencias significativas en la agregación de los suelos (Figura 11).

Los datos de velocidad de infiltración e infiltración acumulada obtenidos, son representativos de la región y coinciden con los hallados por numerosos investigadores (Álvarez *et al.*, 2010; Varela *et al.*, 2010). Autores como Álvarez (2007) atribuyó los mayores valores de infiltración encontrados a la mayor porosidad total y proporción de macroporos de los suelo.

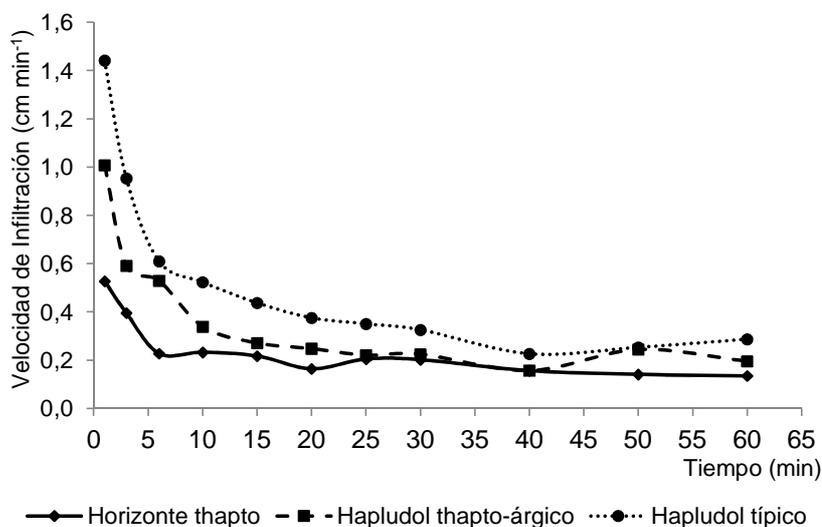


Figura 9. Velocidad de Infiltración (cm m-1) de los suelos evaluados. Horizontes superficiales del Hapludol típico y del Hapludol thapto-árgico y sobre el horizonte thapto.

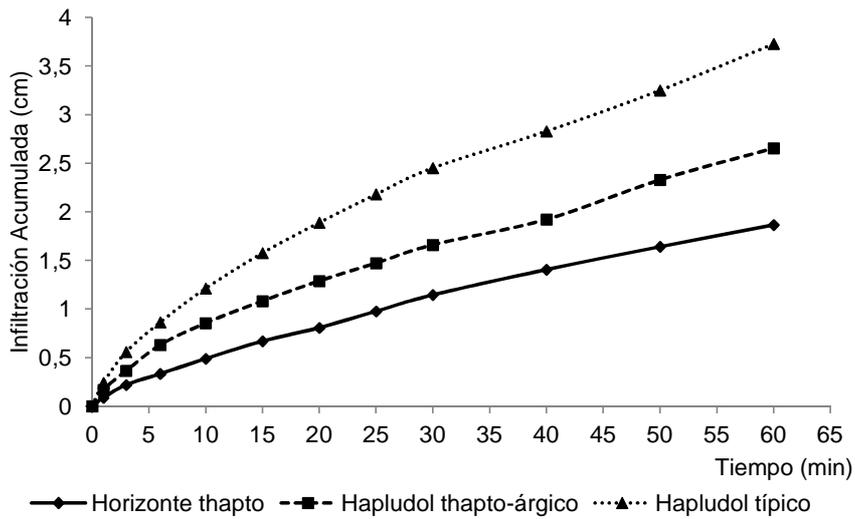


Figura 10. Infiltración acumulada (cm) de los suelos evaluados. Horizontes superficiales del Hapludol típico y del Hapludol thapto-árgico y sobre el horizonte thapto.

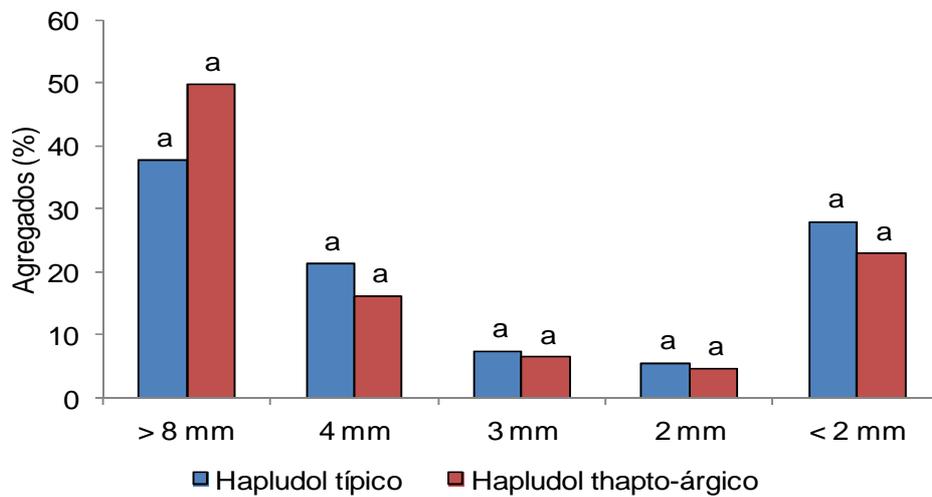


Figura 11. Agregados discriminados por tamaño de los suelos Hapludol típico y Hapludol thapto-árgico. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre suelos para cada tamaño de agregados.

3.2 Consideraciones finales de la caracterización edáfica.

A raíz de los resultados obtenidos en la caracterización edáfica se definió el perfil efectivo del Hapludol thapto-árgico como los primeros 0,60 m de profundidad; dado que a profundidades mayores se vería afectado físicamente la penetración de las raíces de los cultivos. La limitación física se funda en la presencia del horizonte thapto, el cual se expresa por los valores de densidad aparente ($1,45 \text{ Mg m}^{-3}$) y resistencia mecánica a la penetración (2,15 a 3,64 MPa). Los datos obtenidos de capacidad de almacenaje de agua e infiltración refuerzan esta decisión.



Ilustración 1. Fotos tomadas durante la caracterización de los suelos. Barreno con muestras del horizonte thapto.



Ilustración 2. Foto tomada durante la caracterización de los suelos. Determinación de Infiltración en el horizonte thapto

CAPÍTULO IV. DINÁMICA DE AGUA

4.1 Resultados y Discusión.

4.1.1 Agua total y agua disponible en el perfil efectivo

La cantidad de agua que dispone un cultivo para su crecimiento vegetativo y posterior producción de granos depende en forma directa de la reserva de agua del suelo al momento de la siembra y de las precipitaciones que ocurren durante el ciclo de crecimiento (Micucci y Álvarez., 2003). La cantidad de agua disponible (AD) almacenada a la siembra genera mayor o menor autonomía, o dependencia de las lluvias. El agua acumulada durante el período de barbecho afecta el crecimiento en los primeros estadios de los cultivos, y puede asegurar la disponibilidad de agua en el período crítico del cultivo, donde el déficit hídrico afecta los procesos de generación y definición de rendimiento (Andrade y Sadras, 2000). El manejo de la reserva hídrica de agua en el perfil del suelo es esencial en los cultivos de verano en regiones áridas y semiáridas. Las situaciones de escasa profundidad efectiva (profundidad de exploración radical), impactan negativamente en la autonomía hídrica para soportar sequías estacionales. Estos problemas se vuelven críticos en suelos someros, por ejemplo por presencia de tosca en el sudeste de Buenos Aires (Sadras y Calviño, 2001) y en La Pampa (Bono, 2010) o en situaciones con un elevado contenido de arcilla (>30-35%) en horizontes subsuperficiales en la zona norte de Buenos Aires (Taboada y Micucci, 2002).

Para analizar los datos de agua total y agua disponible se discriminó teniendo en cuenta los ciclos de producción; los tipos de suelos; y los tratamientos de fertilización nitrogenada. La faltante de datos en el suelo Hapludol thapto-árgico, durante el ciclo de producción III (en período crítico y cosecha) es consecuencia de la saturación hídrica del perfil por las intensas y frecuentes precipitaciones sucedidas (Ilustración 3).



Ilustración 3. Cultivo de maíz en el Hapludol thapto-árgico del ciclo de producción III.

4.1.1.1 Contenido de agua total y agua disponible en el perfil efectivo comparando los ciclos de producción (CP).

En todos los ciclos de producción estudiados y para los dos tipos de suelos, los contenidos de agua total se encontraron siempre por encima del PMP (Figura 12 y 13).

En el Hapludol típico, a la siembra del cultivo de maíz, el CP III presentó mayor agua disponible que los ciclos I y II con valores de 251, 134 y 180 mm de agua, respectivamente. Esta diferencia a favor de la fecha de siembra tardía fue estadísticamente significativa ($p < 0,05$).

Además se observó que en el período crítico del cultivo el agua disponible del CP I fue significativamente mayor que en los CP II y III, con valores de 196, 88 y 48 mm, respectivamente.

A cosecha, no se evidenciaron diferencias significativas en el contenido de agua disponible en los tres CP evaluados en el Hapludol típico con valores que oscilaron entre 151 y 177 mm de agua (Figura 12) (Anexo, punto IV)

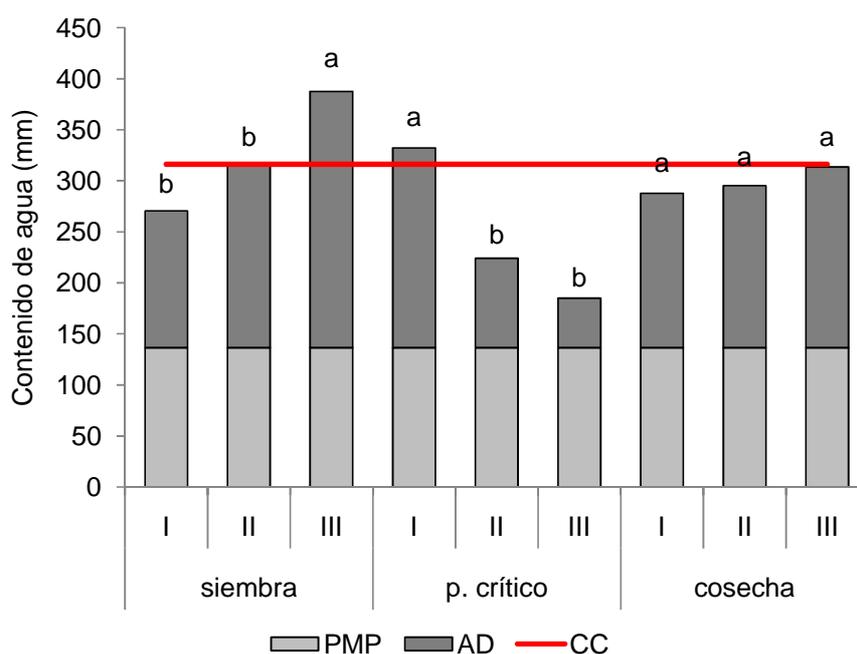


Figura 12. Contenido de agua total en el perfil efectivo del Hapludol típico en tres momentos (siembra, período crítico y cosecha) en los tres ciclos de producción (I, II y III). PMP: humedad en punto de marchitez permanente; AD: agua disponible; CC: humedad en capacidad de campo. *Letras distintas indican diferencias significativas entre los ciclos en el contenido de agua disponible ($p < 0,05$).*

En cambio, en el Hapludol thapto-árgico durante todo el ciclo del cultivo no hubo diferencias estadísticamente significativas en el contenido de agua disponible entre los CP evaluados. Los valores extremos encontrados fueron de 86 mm de AD a la siembra en el CP III y de 10 mm a cosecha en el CP I.

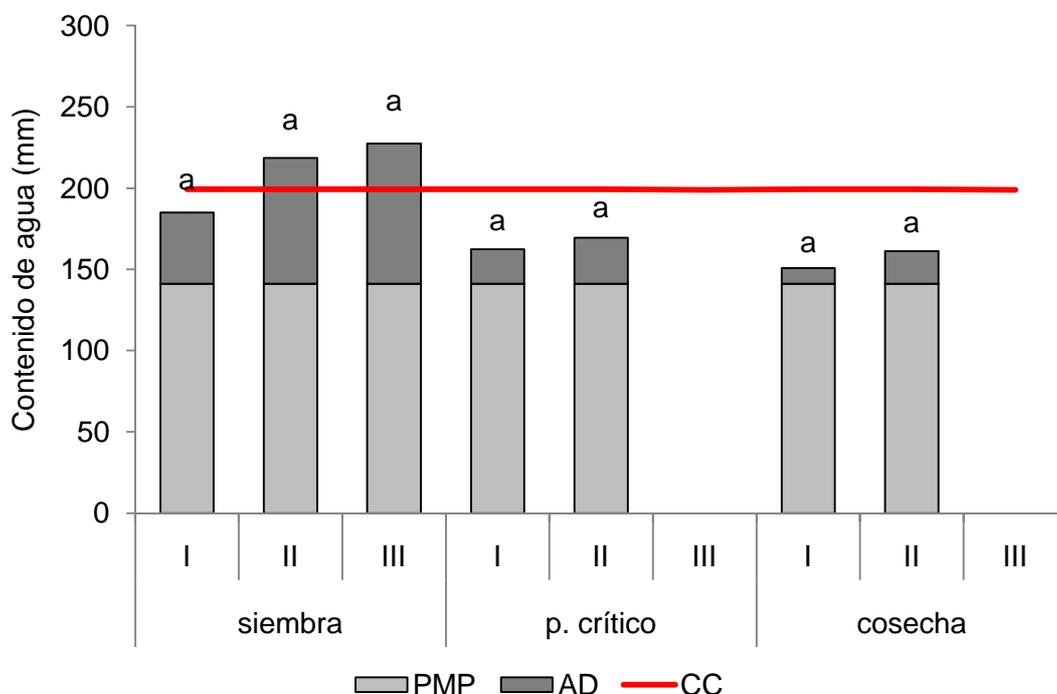


Figura 13. Contenido de agua total en el perfil efectivo del Hapludol thapto-árgico en tres momentos (siembra, período crítico y cosecha) en los tres ciclos de producción (I, II y III). PMP: humedad en punto de marchitez permanente; AD: agua disponible; CC: humedad en capacidad de campo. Letras distintas dentro de cada momento evaluado indican diferencias significativas entre los ciclos en el contenido de agua disponible ($p \leq 0,05$).

4.1.1.2 Contenido de agua total y agua disponible en el perfil efectivo comparando los dos suelos.

Las variaciones en las precipitaciones y en la capacidad de retención de agua de los suelos condicionan el uso consuntivo de los cultivos, tanto en la región semiárida como en la subhúmeda (Quiroga *et al.*, 2005). Sin embargo, la misma no resulta suficiente para la necesidad total del cultivo. Así para un consumo cercano a los 600mm, cerca de la mitad provendría del agua útil del suelo a la siembra dependiendo de la capacidad de retención de agua (CRA) del suelo, y el resto de las lluvias durante

el ciclo. Es por ello que es muy frecuente encontrar perfiles de suelo cercanos al punto de marchites permanente en floración (Cárcova *et al.*, 2000; Otegui *et al.*, 1995), con lo cual la cantidad de lluvias caídas alrededor de este período explican gran parte de las diferencias interanuales y espaciales del rendimiento alcanzado (Calviño *et al.*, 2003).

Las diferencias en el contenido de agua entre los tipos de suelo fueron significativas en los tres momentos evaluados (Figura 14) siendo el HT el suelo que presentó los valores más elevados. Esta situación era esperable debido a la diferencia de profundidades en el perfil efectivo y en las características texturales que condicionan la capacidad de retención de agua.

En ningún momento el contenido de agua total fue inferior al PMP (137 y 141 mm de agua para HT y HTA, respectivamente).

A la siembra del cultivo de maíz ambos suelos superaron los valores de CC (316 y 199 mm para HT y HTA, respectivamente). Sin embargo se registraron diferencias significativas en el agua disponible con valores que alcanzaron los 187 mm para el Hapludol típico y 69 mm en el Hapludol thapto-árgico. Estas diferencias en AD establecieron que el cultivo en el suelo HTA tuviera una menor cantidad de agua disponible a la siembra, situación que determina una mayor dependencia de las precipitaciones que ocurren durante el desarrollo del cultivo. Gregoret *et al.* (2006) reportaron que la dinámica de agua de Hapludoles de la zona de Manfredi (Córdoba) mostró diferentes patrones según la productividad de cada zona y la dosis de N aportadas en estadios avanzados del cultivo. Autores como Siquiera *et al.* (2006) y Vieira *et al.* (2006) en estudios sobre el manejo sitio-específico obtuvieron diferencias en el almacenamiento de agua de suelo asociadas con características propias de cada lote.

Tanto en el período crítico como a cosecha, se repitió la tendencia entre los suelos con diferencias significativas ($p \leq 0,05$) aunque con menor cantidad de agua disponible para el cultivo (Anexo, punto V)

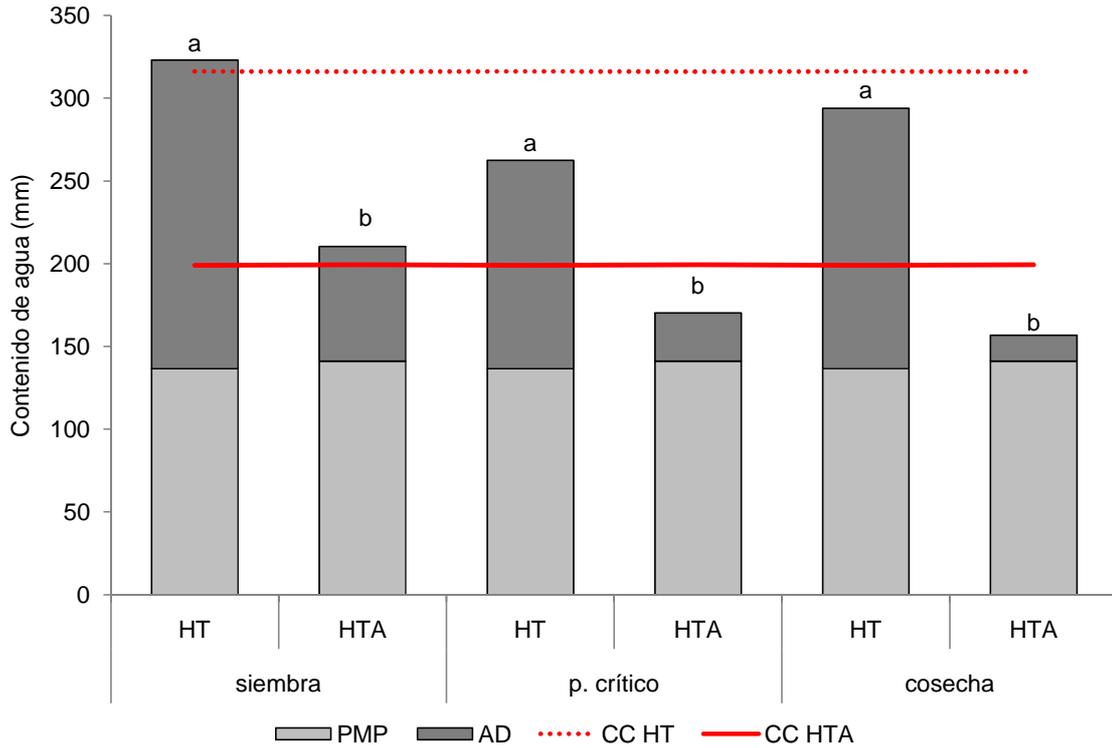


Figura 14. Contenido de agua total en el perfil efectivo en tres momentos del ciclo del cultivo (siembra, período crítico y cosecha) en los dos suelos evaluados (Hapludol típico y Hapludol thapto-árgico). PMP: humedad en punto de marchitez permanente, AD: agua disponible, CC HT: humedad en capacidad de campo del Hapludol típico; CC HTA: humedad en capacidad de campo del Hapludol thapto-árgico. *Letras distintas dentro de cada periodo evaluado indican diferencias significativas en el contenido de agua disponible ($p \leq 0,05$).*

4.1.1.3 Contenido de agua total y agua disponible en el perfil efectivo comparando los tratamientos de fertilización nitrogenada.

Al analizar el contenido hídrico del suelo teniendo en cuenta los tratamientos de fertilización nitrogenada, no se encontraron diferencias significativas entre las dos dosis de N en ninguno de los dos suelos (Figura 15) (Anexo, punto VI).

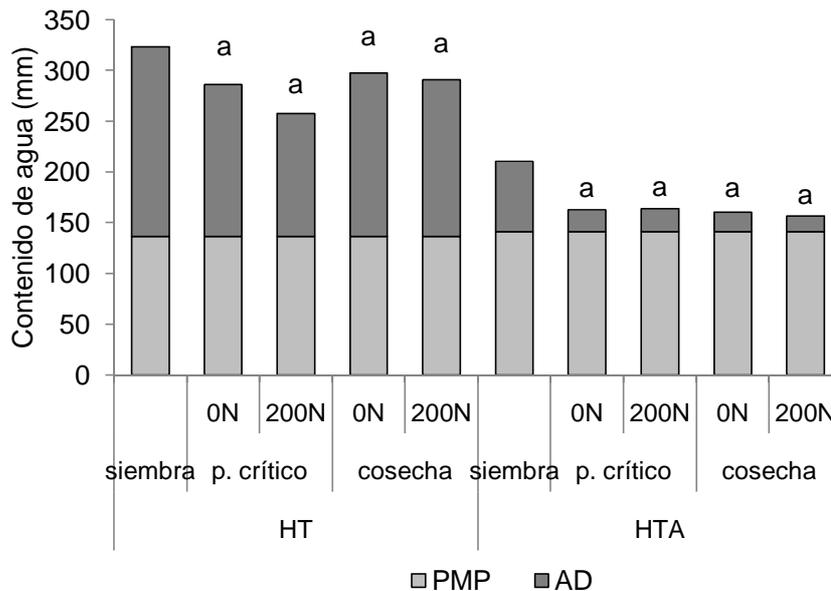


Figura 15. Contenido de agua total en tres momentos del ciclo del cultivo (siembra, período crítico y cosecha) en los dos suelos discriminado por tratamiento de N. *Letras distintas dentro de cada suelo y por período analizado indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).*

4.1.1.4 Consideraciones finales del contenido de agua total y útil de los suelos estudiados.

Se comprobó que los contenidos de agua total al momento de la siembra del maíz en el Hapludol típico estuvieron cercanos a capacidad de campo (CC) a excepción del ciclo de producción I (Figura 12). Las condiciones de humedad del suelo al momento de la implantación del cultivo de maíz fueron más propicias en el CP III (fecha de siembra tardía) debido a que el perfil contó con mayor cantidad de agua disponible (46,6 y 28,3% más que en los CP I y II, respectivamente).

En el Hapludol thapto-árgico la tendencia fue similar, acercando las diferencias entre los ciclos de producción (Figura 13). En este suelo, también el agua total se aproximó o bien superó al contenido de agua a capacidad de campo.

En concordancia con lo hallado por numerosos investigadores que realizaron estudios en la Pampa arenosa, determinaron que efectuar la siembra tardía de maíz es más beneficiosa debido a que la implantación del cultivo se realiza cuando el perfil del suelo tiene mayor cantidad de agua disponible (Proot *et al.*, 2011; Barraco *et al.*, 2011, Miranda *et al.*, 2012).

En el período crítico del cultivo (15 días antes y 15 días después de floración), a excepción del Hapludol típico del CP I, los contenidos de agua total se encontraron por debajo de la CC (Figuras 12 y 13). El agua disponible para el cultivo en este período fue inferior en el suelo Hapludol thapto-árgico con respecto al Hapludol típico (Figura 14), en promedio para los tres ciclos productivos el HT almacenó 262 mm y el HTA 170 mm de agua total, de los cuales 126 y 29 mm estuvieron disponibles para el cultivo en el HT y HTA, respectivamente. Un estrés hídrico en floración reduce la eficiencia de conversión en biomasa de la radiación interceptada, y posiblemente la interceptación de radiación y la partición de materia seca a espigas. Como consecuencia, aumenta el aborto de estructuras reproductivas y disminuye la producción final de grano. En este contexto, el hecho de contar con mayor cantidad de agua disponible durante el ciclo del cultivo reduce el impacto de períodos de sequía, atenuando su efecto sobre la producción (Lorenzatti, 2001).

4.1.2 Uso Consuntivo del cultivo de maíz

Para la interpretación de los resultados se siguió el criterio anterior, se discriminó el análisis comparando los usos consuntivos (UC) entre ciclos de producción, entre tipos de suelos y entre tratamientos de fertilización nitrogenada.

4.1.2.1 Análisis de los usos consuntivos del maíz considerando los ciclos de producción.

El consumo de agua de los cultivos está directamente influenciado por las condiciones ambientales que se dan en cada campaña. Entre las variables que más influyen están la temperatura, radiación solar, humedad relativa y viento (Caviglia y Papparotti., 1999).

En la Figura 16 pueden observarse los UC del maíz en el Hapludol típico durante los tres ciclos productivos analizados.

En el período siembra – floración los usos consuntivos (UC s-fl) fueron similares entre los ciclos de producción I y II (234,8 y 242,3 mm, respectivamente), sin embargo el

cultivo en el ciclo III consumió mayor cantidad de agua (415 mm). Esta diferencia fue estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$).

En el caso del UC del período floración – madurez fisiológica (UC fl-mf), el maíz que mayor agua consumió fue el del CP II (con 483,5 mm) a diferencia del resto donde se observaron valores menores de 260,3 y 284,5 mm para el CP I y III en ese orden.

Durante el CP II el maíz consumió mayor cantidad de agua en la segunda mitad de su ciclo, a diferencia del CP III que el mayor consumo se dio en las etapas vegetativas del cultivo coincidiendo con la mayor cantidad de agua disponible en este período. Sin embargo el uso consuntivo total en estos dos ciclos no mostraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$), aunque sí se diferenciaron del primer ciclo de producción evaluado.

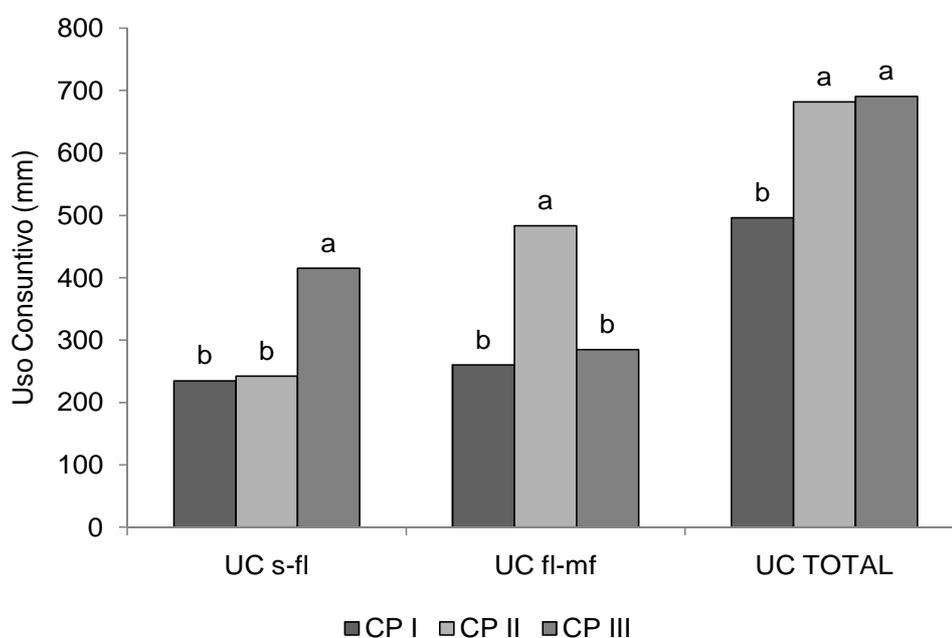


Figura 16. Usos consuntivos del maíz en tres períodos: siembra y floración (UC s-fl), floración y madurez fisiológica (UC fl-mf) y total (UC TOTAL) para los tres ciclos de producción (CP I; CP II; CP III) en el Hapludol típico. Letras distintas dentro de cada UC indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre ciclos de producción.

Cuando se analizaron los valores de UC de los cultivos de maíz sembrados en el Hapludol thapto-árgico se vio que entre el CP I y II hubo diferencias significativas en

todos los períodos analizados ($p \leq 0,05$), incluyendo el UC Total (Figura 17). En la etapa vegetativa del maíz los mayores valores se observaron en el CP I (325 mm) sin embargo esta tendencia no se repitió en la etapa reproductiva ya que los mayores valores se presentaron en el CP II, situación que se reiteró al analizar el UC Total (555 y 717 mm para el CP I y II, respectivamente).

En general los valores de UC de maíz varían entre 400 y 700 mm (Andrade y Ferreiro, 1996), y en ensayos realizados en la región semiárida pampeana se encontraron valores de UC entre 640 y 680 mm para rendimientos de maíz entre 8.000 y 12.000 Kg ha-1 (Quiroga *et al.*, 2006b).

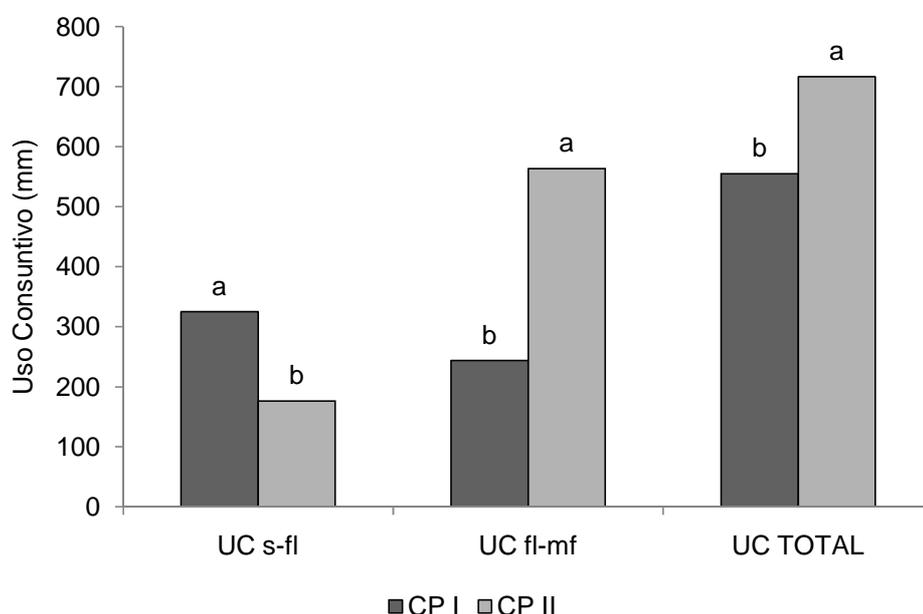


Figura 17. Usos consuntivos del maíz en tres períodos: siembra y floración (UC s-fl), floración y madurez fisiológica (UC fl-mf) y total (UC TOTAL) para dos ciclos de producción (CP I; CP II) en el Hapludol thapto-árgico. *Letras distintas dentro de cada UC indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre ciclos de producción.*

4.1.2.2 Análisis de los usos consuntivos del maíz considerando los tipos de suelos.

Cuando se analizaron los UC entre los dos tipos de suelo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$) en ninguno de los tres períodos del cultivo de maíz (Figura 18). Los valores de UC Total variaron entre 591 y 609 mm

para el Hapludol típico y Hapludol thapto-árgico en ese orden. En ambos suelos, los mayores consumos de agua se produjeron durante la etapa floración-madurez fisiológica.

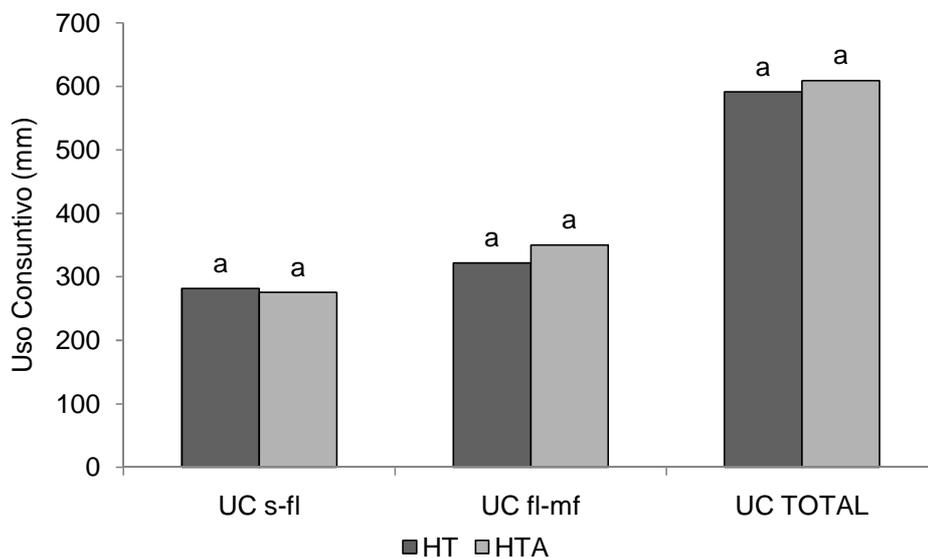


Figura 18. Usos consuntivos del maíz en tres períodos: siembra y floración (UC s-fl), floración y madurez fisiológica (UC fl-mf) y total (UC TOTAL) para los dos tipos de suelos: Hapludol típico (HT y Hapludol thapto-árgico (HTA). *Letras distintas dentro de cada UC indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tipos de suelos.*

4.1.2.3 Análisis de los usos consuntivos del maíz considerando los tratamientos de fertilización nitrogenada.

No se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en el consumo de agua del maíz, entre los tratamientos de fertilización nitrogenada en ninguna etapa del cultivo. Como así tampoco hubo diferencias entre tipos de suelos (Figura 19).

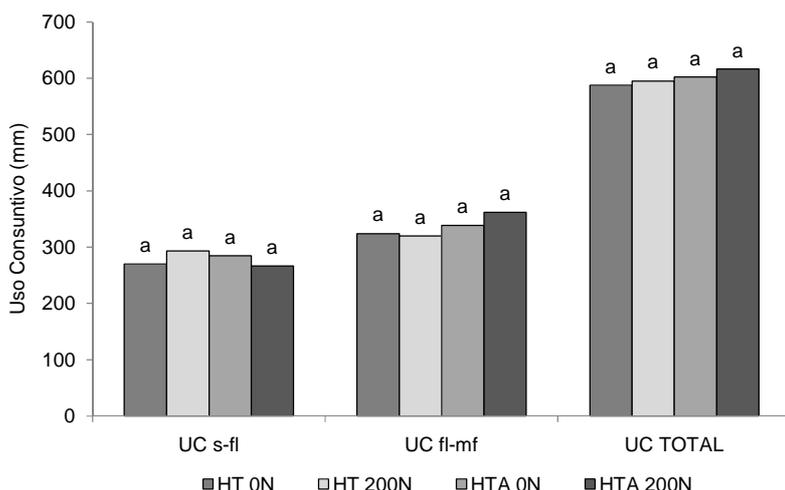


Figura 19. Usos consuntivos del maíz en tres períodos: siembra y floración (UC s-fl), floración y madurez fisiológica (UC fl-mf) y total (UC TOTAL) para los dos tipos de suelos Hapludol típico (HT) y Hapludol thapto-árgico (HTA) y las dos dosis de nitrógeno (0N y 200N). *Letras distintas dentro de cada UC indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tipos de suelos y dosis de N.*

Los usos consuntivos fueron dependientes de cada ciclo de producción y no del tipo de suelo ni de tratamiento. El uso consuntivo total promedio fue de 599 mm. Datos similares fueron encontrados en Balcarce por Otegui (1992), quien calculó un valor promedio de 542 mm (± 50 mm). Proot *et al.* (2011) obtuvieron valores de 582 mm en maíces tardíos en General Villegas. Andrade y Gardiol (1995) obtuvieron en Balcarce un consumo de 530 mm y en Pergamino, Totis de Zeljkovich y Rebella (1980) obtuvieron 575 mm para maíces sembrados en octubre y Rivetti (2006) halló en promedio 575 mm para maíces en Río Cuarto.

4.1.3 Eficiencia de uso del agua

La eficiencia en el uso del agua (EUA) se estimó como el cociente entre el rendimiento en granos (EUA G) total o materia seca total (EUA MS) y el UC total de los cultivos.

4.1.3.1 Análisis de las eficiencias de uso de agua comparando los ciclos de producción.

En el Hapludol típico los valores de EUA MS variaron entre 60,7 y 16,6 kg MS ha⁻¹ mm⁻¹ para el cultivo de maíz en el CP I y CP III, respectivamente (Figura 20). Estas diferencias fueron significativas ($p < 0,05$), mientras que entre el CP II y el CP III no hubo significancia ($p \leq 0,05$). Estos resultados coinciden con los registrados por (Pedrol *et al.*, 2004) con respecto a los requerimientos hídricos del cultivo de maíz, con adecuado manejo (densidades, fertilización, fechas de siembra) es factible alcanzar eficiencias en la producción de materia seca aérea desde 20 kg mm⁻¹ en suelos degradados, hasta 40 kg mm⁻¹ en ambientes de alta productividad.

En la misma figura se presenta la EUA G. Los valores hallados fueron de 16,1; 8,2 y 12,3 kg grano ha⁻¹ mm⁻¹ para los CP I, II y III, respectivamente, con diferencias significativas entre CP I y CP II, pero no entre CP III y los otros dos ciclos productivos.

En el Hapludol thapto-árgico (Figura 21) no se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en la EUA MS entre los dos ciclos, siendo los valores de 36 y 33 kg MS ha⁻¹ mm⁻¹ para los ciclos de producción I y II, respectivamente. En cambio, las diferencias se manifestaron en la EUA G, encontrándose el mayor valor en el CP I (12,7 kg grano ha⁻¹ mm⁻¹) en contraste con el CP II (8,4 kg grano ha⁻¹ mm⁻¹).

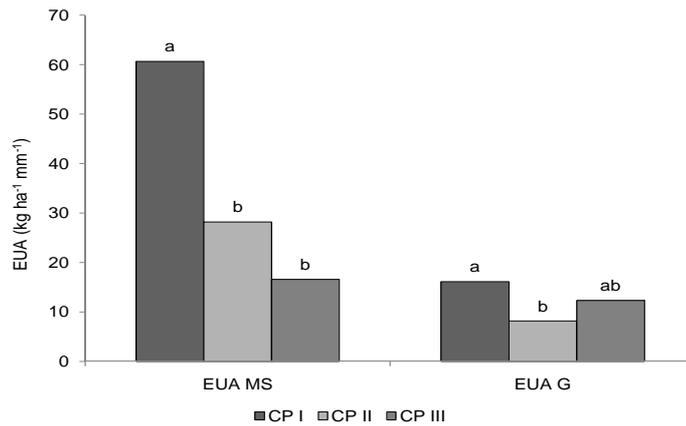


Figura 20. Eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca (EUA MS) y para la producción de grano (EUA G) en $\text{kg MS ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ y $\text{kg grano ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$, respectivamente en el Hapludol típico durante los tres ciclos de producción evaluados (CP I; CP II y CP III). Letras distintas dentro de cada EUA indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre ciclos de producción.

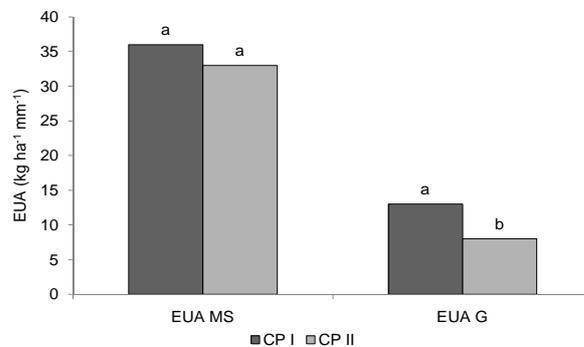


Figura 21. Eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca (EUA MS) y para la producción de grano (EUA G) en $\text{kg MS ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ y $\text{kg grano ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$, respectivamente en el Hapludol thapto-árgico durante los dos ciclos de producción evaluados (CP I; CP II). Letras distintas dentro de cada EUA indican diferencias significativas entre ciclos productivos ($p \leq 0,05$).

4.1.3.2 Análisis entre suelos.

Si bien el maíz desarrollado en el Hapludol típico tuvo mejor eficiencia de producción de materia seca y de grano que el Hapludol thapto-árgico, no se encontraron diferencias significativas entre los suelos ($p \leq 0,05$) (Figura 22). La EUA MS promedio en el HT fue de $41,6 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, y para el HTA fue de $35,2 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Los valores promedio de EUA G encontrados fueron de $13,2$ y $11,3 \text{ kg grano ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ para el HT y HTA, respectivamente.

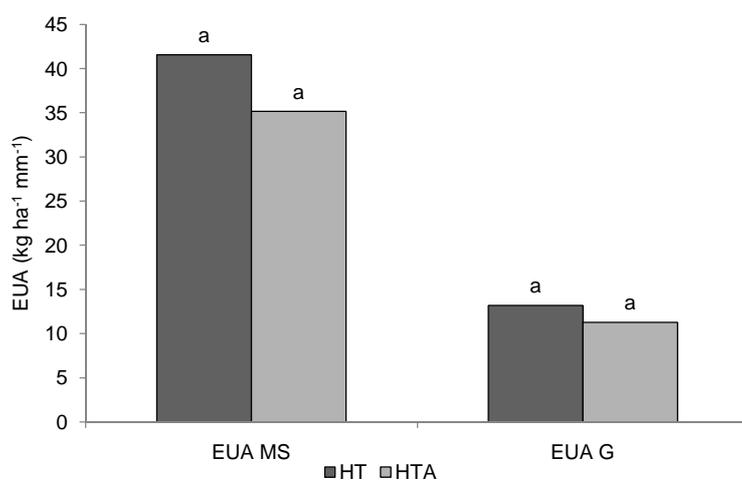


Figura 22. Eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca (EUA MS) y para la producción de grano (EUA G) en $\text{kg MS ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ y $\text{kg grano ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, respectivamente en los suelos Hapludol típico (HT) y Hapludol thapto-árgico (HTA). *Letras distintas dentro de cada EUA indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tipos de suelos.*

4.1.3.3 Análisis entre tratamiento de fertilización nitrogenada.

Numerosos estudios respaldan la hipótesis que una adecuada nutrición del cultivo presenta un impacto positivo en la EUA atribuido a una mejora en el crecimiento y en el rendimiento. En la Tabla 8 se presentan resultados de trabajos llevados a cabo en

nuestro país en los cuales se ha determinado la EUA en el cultivo de maíz, en suelos con diferentes características y programas de fertilización.

Caviglia y Sadras (2001) atribuyeron el aumento de la EUA debido a la fertilización nitrogenada a un incremento en el uso de la radiación (EUR) por incremento de la concentración de N en las plantas que incrementa a su vez la capacidad fotosintética del cultivo de maíz.

Tabla 8. Eficiencias de uso del agua en función del tipo de suelo y fertilización nitrogenada del cultivo de maíz.

Autor	Tipo de suelo	Fertilización	EUA
INTA Oliveros Pedrol (Citado por Micucci)	Argiudol Típico	SI	9,7
		NO	20,7
CREA Sur de Santa Fé (Citado por Micucci)	Argiudol Típico	SI	11,5
		NO	18,1
INTA Paraná (Citado por Micucci)	Argiudol acuico	SI	28
		NO	30
Gral. Villegas Álvarez C.	Hapludol Típico	SI	15
		NO	20
Dorila Álvarez C.	Haplustol Típico	SI	14
		NO	19
INTA Marcos Juárez Cazorla C.	Argiudol Típico	SI	13
		NO	23
Gral. Villegas *Prott et al., 2011	Hapludol típico	SI	16,7
		NO	17,9

*maíces tardíos

En esta experiencia, no se encontraron diferencias significativas en las EUA MS entre tratamientos de fertilización en los distintos tipos de suelos. Sin embargo en la EUA G se obtuvieron valores extremos de 16,2 y 8,8 kg grano ha⁻¹ mm⁻¹ para el HT con 200N y el HTA 0N en ese orden. La fertilización nitrogenada mejoró la eficiencia de uso del agua para la producción de grano en los dos tipos de suelos (Figura 23).

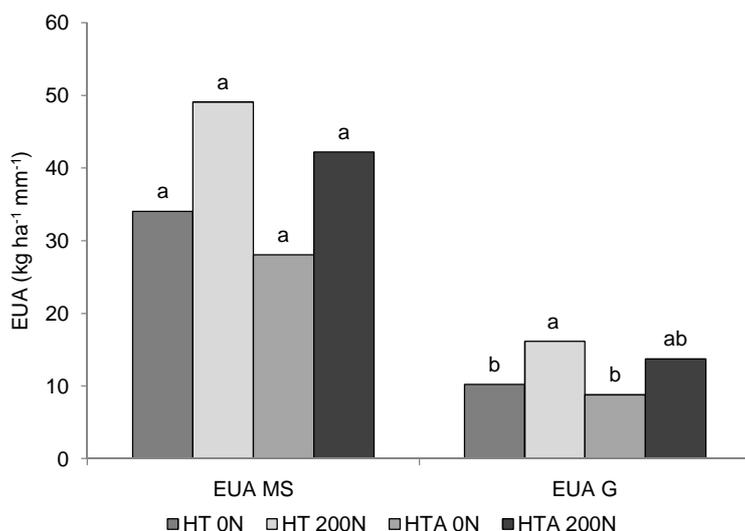


Figura 23. Eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca (EUA MS) y para la producción de grano (EUA G) en kg MS ha⁻¹ mm⁻¹ y kg grano ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente en los suelos Hapludol típico (HT) y Hapludol thapto-árgico (HTA) con los dos tratamientos de fertilización nitrogenada (0N y 200N). Letras distintas dentro de cada EUA indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tipos de suelos y dosis de nitrógeno.

La eficiencia en el uso del agua para la producción de grano promedio fue de 12,3 kg MS ha⁻¹ mm⁻¹, similares valores fueron hallados por Caviglia *et al.* (2012), en los suelos de Paraná y Balcarce con maíces bajo diferentes manejos agronómicos. También fueron similares a los reportadas por Pedrol *et al.* (2008) en maíces bajo riego y en secano (15,5 kg grano ha⁻¹ mm⁻¹) quienes atribuyeron el bajo valor de EUA G al aumento de la temperatura (principalmente de la máxima) durante el período crítico del cultivo de maíz. Las EUA para la producción de grano fueron dependientes del ciclo y del tratamiento de fertilización nitrogenada. Estos resultados concuerdan con numerosos autores y fue reportado para varios cultivos, así Álvarez *et al.* (2008) en trigo observaron que integrando prácticas de fertilización nitrogenada con prácticas de manejo del agua se mejoraba la eficiencia de uso de agua entre un 11 y un 51 % según sitio y variedad. Proot *et al.* (2011) en maíces tardíos sembrados en un Hapludol éntico de General Villegas reportaron mejoras en la EUA G ante agregados

de nitrógeno, a iguales conclusiones arribaron Bacigaluppo *et al.* (2000) en maíces en Oliveros (Santa Fe) sobre un suelo Argiudol típico.

Los valores de eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca obtenidos son superiores a los valores hallados por Caviglia *et al.* (2012) en maíces de Balcarce y Paraná. Pérez (1994), también obtuvo diferencias en la EUA MS en sojas desarrolladas en Hapludoles. Gregoret *et al.* (2006) atribuyeron las diferencias en las EUA MS encontradas a la disponibilidad de agua inicial y a la mayor precipitación efectiva durante el desarrollo del cultivo. (Anexo, VII, VIII y IX)

CAPÍTULO V. DINÁMICA DEL NITRÓGENO

5.1 Resultados y Discusión

5.1.1 Contenido de nitrógeno a la siembra

La disponibilidad de nitrógeno (N) en la región de la Pampa Arenosa es uno de los factores que con mayor frecuencia, y en condiciones de adecuada disponibilidad hídrica, restringe el logro de altos rendimientos en los cultivos de maíz. En fechas de siembra tempranas (mediados de setiembre-mediados de octubre), Barraco y Díaz-Zorita, (2005) describieron que los mayores rendimientos del cultivo se obtienen con una oferta de N (N suelo + N del fertilizante) de 140 kg ha^{-1} y con una eficiencia de uso del N de alrededor de $30 \text{ kg grano kg}^{-1}$ de N aplicado. En general en esta época de siembra la disponibilidad de N de nitratos en el suelo es baja, con valores de entre 30 y 80 kg N ha^{-1} (capa de 0-0,6 m) y las respuestas al agregado de N son significativas con prolongada historia agrícola. Sin embargo en la medida que las fechas de siembra se atrasan la oferta de N del suelo en general se incrementa por mineralización (mayores temperaturas y precipitaciones) y podría realizar mayores aportes a la nutrición de los cultivos. A la siembra de los ensayos la oferta de N (0-0,6 m) de los dos suelos mostró diferencias significativas para cada año evaluado (Tabla 9). El contenido de N varió entre años y entre tipos de suelos, esta variación estuvo comprendida entre $22,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ en el Hapludol típico en el año I y $171,2 \text{ kg N ha}^{-1}$ en el Hapludol thapto-árgico para el año II. En ambos años, los mayores valores corresponden al Hapludol thapto-árgico.

Tabla 9. Contenido de nitrógeno (kg N ha^{-1}) a la siembra de los ensayos en los dos suelos evaluados.

	año I	año II
Hapludol típico	22,63 a	155,30 a
Hapludol thapto-árgico	88,50 b	171,17 b

Letras diferentes en sentido vertical indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre los suelos.

A la siembra del año I la oferta de nitrógeno en el suelo resultó en promedio de $55,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ y en el año II de $163,2 \text{ kg N ha}^{-1}$. Estos valores se consideran normales para los lotes de producción de la zona, pudiendo deberse las diferencias a la elevada disponibilidad hídrica que podría haber generado lixiviación de N en el año I. Barraco

et al. (2011) en un Hapludol éntico de Drabble (Buenos Aires) obtuvieron niveles de 91,3 kg N ha⁻¹ y Proot *et al.* (2011) en los primeros 0,60 m de suelo de 53 kg N ha⁻¹ en suelos Hapludoles de la región en estudio.

5.1.2 Contenido de Nitrógeno a cosecha

El nitrógeno a cosecha del año I fluctuó entre 13,4 a 23,3 kg N ha⁻¹. Los mayores valores se obtuvieron en el año II, variando entre 54,2 y 70,6 kg N ha⁻¹ (Figura 24).

En el año I los mayores niveles se encontraron en el Hapludol thapto-árgico aunque no se registraron diferencias significativas entre los suelos ni entre los tratamientos de fertilización nitrogenada. En el año II el Hapludol típico fue el suelo que mayor contenido de N presentó a la cosecha independientemente del tratamiento de fertilización nitrogenada, encontrándose diferencias significativas ($p \leq 0,05$) sólo con el tratamiento de HTA-200N (Anexo, X)

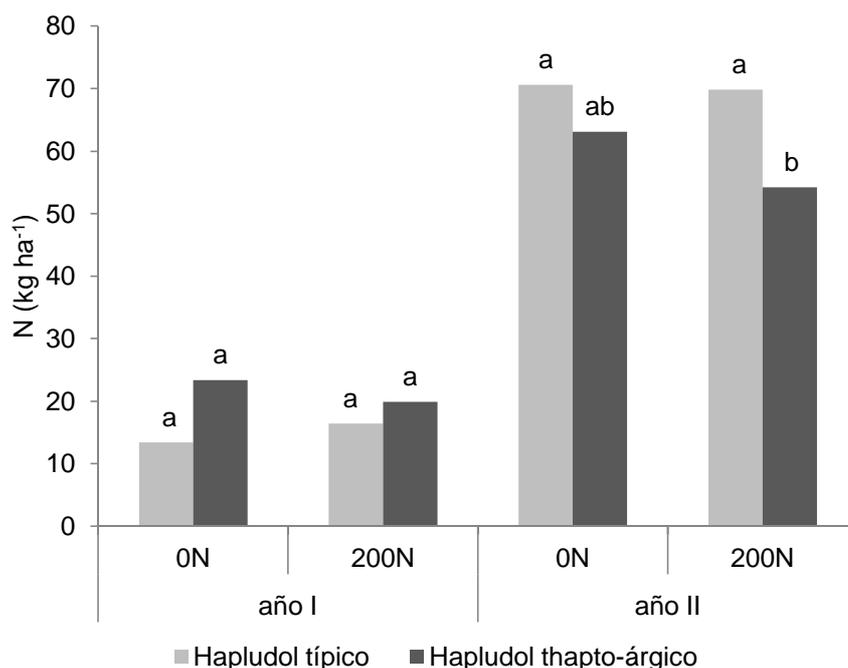


Figura 24. Contenido de nitrógeno (N) en kg ha⁻¹ al momento de la cosecha en los dos años evaluados y para cada tratamiento de fertilización evaluados en los suelos Hapludol típico y Hapludol thapto-árgico. Letras diferentes en cada año indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

5.1.3 Contenido de Nitrógeno en la biomasa aérea

Al evaluar el contenido de N en la biomasa aérea en floración del maíz, se observaron diferencias significativas entre las dosis de N para todos los años evaluados (Tabla 10) a excepción del ciclo productivo II.

El contenido de N en plantas que no fueron fertilizadas varió entre 33 y 74 kg N ha⁻¹. Los menores valores corresponden al Hapludol thapto-árgico en los tres CP evaluados.

En los tratamientos con 200N los valores extremos hallados fueron 56 y 205 kg N ha⁻¹. Correspondiendo los mayores valores al ciclo de producción I.

Los contenidos de N en la biomasa aérea en floración dependieron de la dosis de N aplicadas y no del tipo de suelo. Este comportamiento fue reportado por Shafi *et al.* (2006) aunque Caviglia *et al.* (2012) no encontraron esta tendencia en suelos de Paraná y Balcarce.

Tabla 10. Contenido de Nitrógeno en plantas de maíz en floración (kg N ha⁻¹). CP: Ciclo de producción.

CP	Suelos	dosis N		<i>promedio</i>
		0N	200N	
I	Hapludol típico	74 b	190 a	132 a
	Hapludol thapto-árgico	65 b	205 a	135 a
	<i>promedio</i>	70 b	197 a	
II	Hapludol típico	55 a	89 a	72 a
	Hapludol thapto-árgico	53 a	56 a	54 a
	<i>promedio</i>	54 a	72 a	
III	Hapludol típico	44 a' b	97 a	71
	Hapludol thapto-árgico	33 a'		
	<i>promedio</i>	39		

Letras distintas en cada ciclo de producción indican diferencias significativas (p<=0,05).

Los valores de SPAD observados en R2 sobre la hoja de la espiga variaron entre tratamientos de fertilización ($p \leq 0,05$) entre 34,07 y 37,89 (HTA y HT, respectivamente) en el cultivo no fertilizado, a 50,09 y 49,71 (HTA y HT, respectivamente) en los maíces con el agregado de nitrógeno (Figura 25). Se puede observar una estrecha correlación entre los contenidos de nitrógeno a la siembra y el índice SPAD. En este sentido, Sainz Rozas *et al.*, (1998) encontraron una estrecha relación entre el medidor de clorofila (SPAD) y el contenido de nitrógeno en estadios avanzados del cultivo. Estos mismos autores encontraron altas correlaciones entre los valores de lectura del SPAD al estadio de R3-R4 y el rendimiento del cultivo de maíz, lo mismo fue hallado por Piekielek *et al.*, (1995).

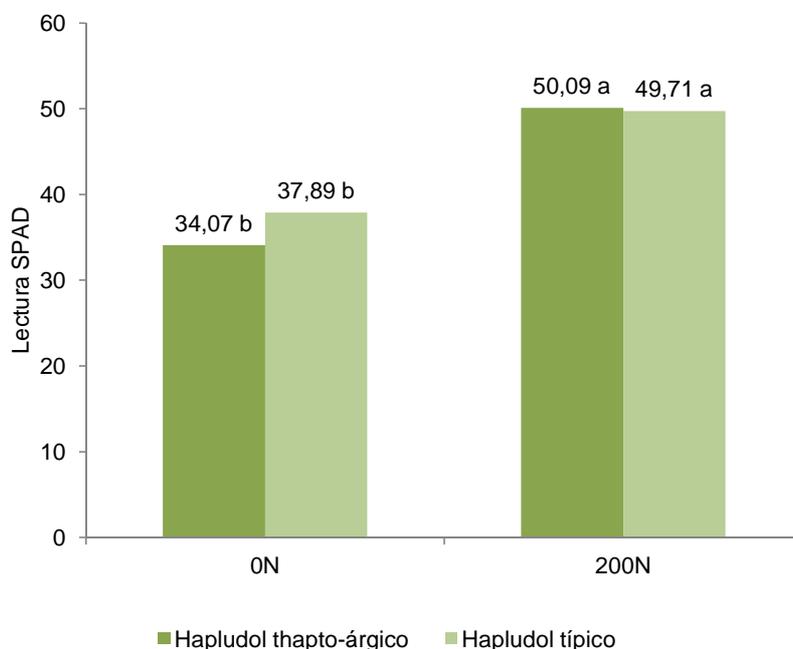


Figura 25. Intensidad media de coloración verde en las hojas del cultivo de maíz, en los dos suelos evaluados y bajo las dos dosis de N. (en valores absolutos). *Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).*

5.1.4 Balance aparente de Nitrógeno

El balance aparente de nitrógeno (BAN) es la diferencia entre la cantidad de N que entra y que sale de un sistema definido en tiempo y en espacio. El balance es aparente, lo que implica que no se consideran las transformaciones del nutriente en el sistema suelo-planta-atmosfera, las pérdidas gaseosas, por lavado o erosión, ni los ingresos por deposiciones atmosféricas, por lo que posiblemente subestime el resultado en muchas condiciones (Ernst, 2012). En su forma más sencilla el balance puede plantearse como la diferencia entre entradas y salidas de nutrientes a un sistema, permitiendo su resultado estimar si el sistema gana o pierde nutrientes. En la porción semiárida de la región no se han planteado balances de nitrógeno hasta el momento, ni se cuenta con estimaciones de la capacidad de los suelos de mineralizar nitrógeno (Bono, 2010). Por tal motivo, generar información al respecto redundará en beneficios para elaborar un correcto diagnóstico del sistema productivo y determinar la mejor estrategia de fertilización nitrogenada.

En este estudio se observó que en los dos años y para los dos suelos (HT y HTA) en los tratamientos con 200N el BAN resultó en valores positivos, claramente debido al agregado del fertilizante que aumentó los ingresos del nutriente al suelo (Figura 26). En el año I, el tratamiento que no fue fertilizado en el Hapludol típico tuvo un BAN negativo ($-64,8 \text{ kg N ha}^{-1}$) y el Hapludol thapto-árgico neutro ($0,18 \text{ kg N ha}^{-1}$); situación que no se repitió en el año II, ya que todos los tratamientos dieron un BAN positivo con valores que oscilaron entre $29,7$ y 261 kg N ha^{-1} para el HT-0N y HTA-200N (Anexo, XI).

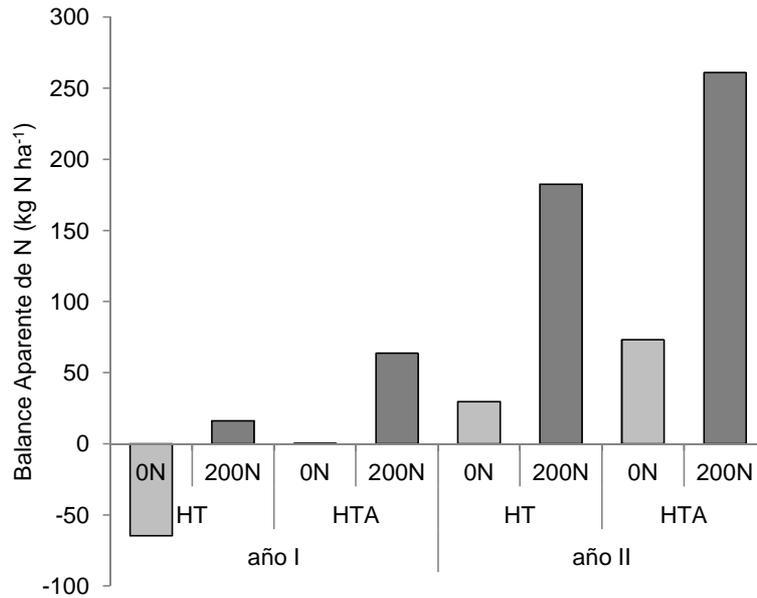


Figura 26. Balance Aparente de Nitrógeno (BAN) en kg N ha^{-1} . HT: Hapludol típico, HTA: Hapludol thapto-árgico.

Las diferencias generadas en el balance aparente entre años podrían explicarse por el mayor contenido de N en el suelo al momento de la siembra de los cultivos en el año II lo que aumentaría el N de ingreso y por los mayores contenidos de nitrógeno en planta en el año I, lo que representó un egreso superior.

5.1.5 Eficiencia del uso de nitrógeno

Las eficiencias de uso del nitrógeno se analizaron de acuerdo a los términos propuestos por Ladha *et al.* (2005) y se detallan a continuación. Para los cálculos se tomó el contenido de nitrógeno en planta al momento de floración como el N absorbido por el cultivo (Anexo, XII)

FPP_N - Factor parcial de productividad: $\text{kg de grano producido kg}^{-1}$ de N aplicado

EA_N – Eficiencia agronómica: $\text{kg de incremento en el rendimiento kg}^{-1}$ de N aplicado

ER_N – Eficiencia de recuperación del fertilizante: diferencia de $\text{kg de N absorbido kg}^{-1}$ de N aplicado

EF_N – Eficiencia fisiológica: $\text{kg de incremento en el rendimiento kg}^{-1}$ N absorbido

5.1.5.1 Factor parcial de productividad del nitrógeno

El FPP_N promedio hallado fue de 41,5 kg de grano producido kg^{-1} de N aplicado, con valores extremos que fluctuaron entre 52,7 y 26,4 en los CP I y II, respectivamente correspondientes al Hapludol típico (Figura 27).

No hubo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tipos de suelos, pero sí entre CP, resultando el CP II con valores más bajos de FPP_N . Los menores valores de FPP_N hallados en el CP II pueden explicarse porque los rendimientos obtenidos en ese ciclo fueron más bajos en los dos tipos de suelos.

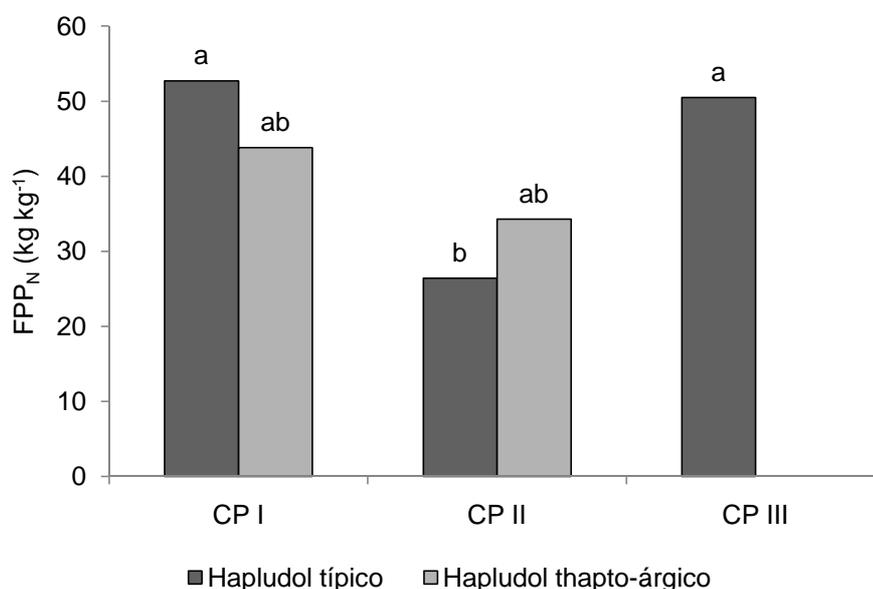


Figura 27. Factor Parcial de Productividad de N (kg de grano producido kg^{-1} de N aplicado) en los dos suelos bajo y en los tres ciclos de producción evaluados. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

Similares valores a los hallados fueron encontrados por Witt *et al.*, (2006) en maíces sembrados en Indonesia en lotes donde el nitrógeno no fue limitante, sin embargo son inferiores a los reportados por numerosos autores, Ladha *et al.*, (2005) informaron 72 $kg\ kg^{-1}$, Dobermann *et al.*, (2006) en suelos bajo riego de Nebraska 94 $kg\ kg^{-1}$ y Cassman *et al.*, (2002) 61 $kg\ kg^{-1}$. A nivel nacional, Fontanetto *et al.*, (2001) en suelos de la provincia de Santa Fe hallaron valores promedios de 35,8 $kg\ kg^{-1}$ y Pedrol *et al.* (2008) encontraron distintas FPP_N según el nivel hídrico de los suelos y distintas dosis de N, variando entre 21,6 y 31,1 $kg\ kg^{-1}$ en suelos bajo riego y seco,

respectivamente. En Paraná y Balcarce (Argentina), Caviglia *et al.* (2012) obtuvieron FPP_N muy superiores a los resultados obtenidos en esta tesis, con valores entre 78 y 132 $kg\ kg^{-1}$ según el manejo agronómico, estos autores atribuyen el menor valor de FPP_N a que las dosis de N aplicadas fueron mayores en relación al incremento logrado.

5.1.5.2 Eficiencia Agronómica

La EA_N promedio fue de 17,6 kg de incremento en el rendimiento kg^{-1} de N aplicado, sin embargo los valores fueron muy extremos, la mayor EA_N se obtuvo en el Hapludol típico en el ciclo de producción I (32,2 $kg\ kg^{-1}$) y la menor EA_N en el Hapludol típico del ciclo de producción II (2,5 $kg\ kg^{-1}$) (Figura 28).

Las EA_N del Hapludol típico en los tres CP fue diferentes ($p \leq 0,05$). Sin embargo en el Hapludol thapto-árgico no se encontraron diferencias significativas entre los ciclos de producción.

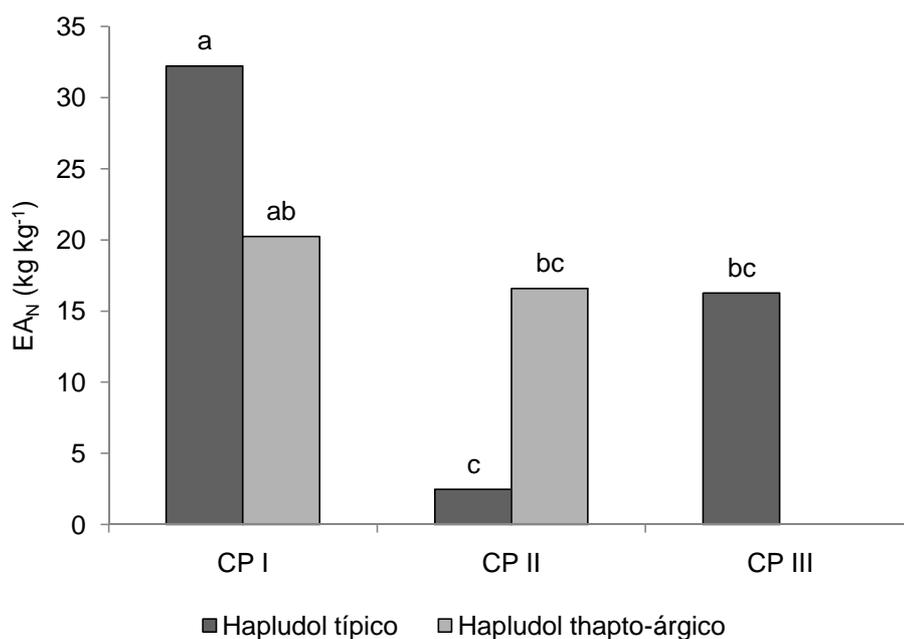


Figura 28. Eficiencia agronómica del nitrógeno (kg de incremento en el rendimiento kg^{-1} de N aplicado) de los dos suelos en los tres ciclos de producción (CP). *Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).*

Los valores de EA_N hallados en este estudio fueron coincidentes con los reportados por diversos autores para el cultivo de maíz, Dobermann *et al.*, (2006) en maíces bajo riego en Estados Unidos y Cassman *et al.* (2002) en 52 lotes de maíces durante tres años de evaluación. Siendo que las diferencias se manifestaron entre los ciclos de producción, queda explícito que la EA_N es altamente dependiente de la disponibilidad de recursos que tiene el cultivo a lo largo de su ciclo (radiación, temperatura, agua, factores bióticos, etc.). En este sentido, Otegui *et al.* (2006) determinaron que la eficiencia agrónoma en ambientes con buena oferta hídrica triplicaba el valor encontrado en situaciones de sequía.

5.1.5.3 Eficiencia de recuperación del fertilizante nitrogenado.

Puede interpretarse como la sincronía entre la liberación del fertilizante y la demanda del cultivo. Se encontraron valores extremos de 0,02 y 0,70 $kg\ kg^{-1}$ correspondientes al Hapludol thapto-árgico para el CP II y CP I, respectivamente. La ER_N promedio fue de 0,35 $kg\ kg^{-1}$

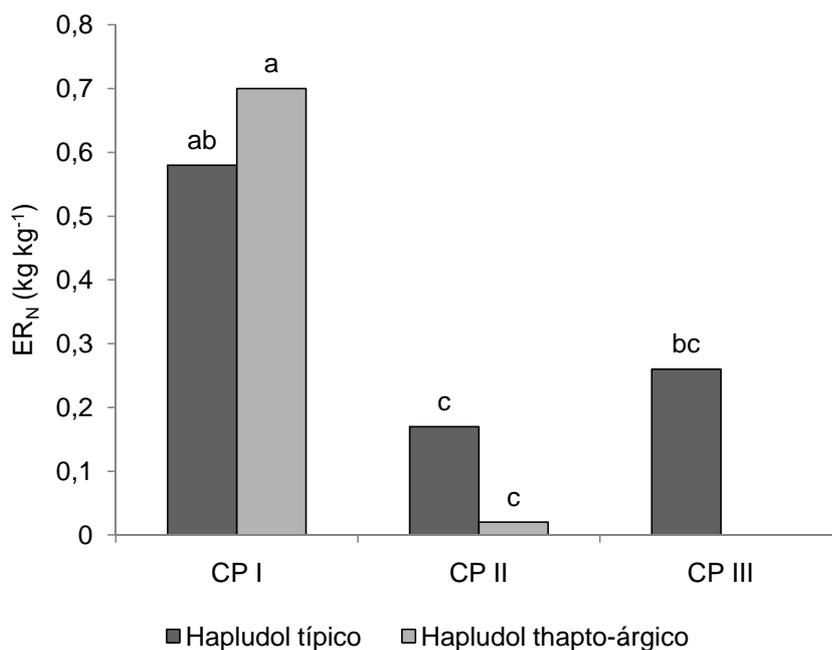


Figura 29. Eficiencia de Recuperación de Nitrógeno (ER_N) en los dos suelos evaluados y en los tres ciclos de producción. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

Las ER_N obtenidas fueron similares a los valores hallados por Cassman *et al.*, (2002) en lotes de maíces del cordón maicero de Estados Unidos y Witt *et al.*, (2006) maíces en secano y bajo riego de Indonesia. Sin embargo, Fontanetto *et al.* (2001) reportaron valores muy superiores a los presentados en este trabajo (entre 0,74 y 0,78 $kg\ kg^{-1}$) atribuibles a la mejor captación de recursos de maíces sembrados con densidades poblacionales medias. Esta eficiencia depende de la sincronía entre la liberación del fertilizante y la demanda de N del cultivo.

5.1.5.4 Eficiencia fisiológica de uso del nitrógeno.

La eficiencia fisiológica de uso del nitrógeno (EF_N) puede interpretarse como la capacidad o habilidad del cultivo de transformar los nutrientes derivados del fertilizante en rendimiento. Los valores variaron entre 44,5 y 160,1 $kg\ kg^{-1}$. En general, las mejores eficiencias se obtuvieron en los tratamientos sin fertilizar, sin embargo en el HTA la mayor EF_N se observó en el CP II con el tratamiento de 200N (Figura 30).

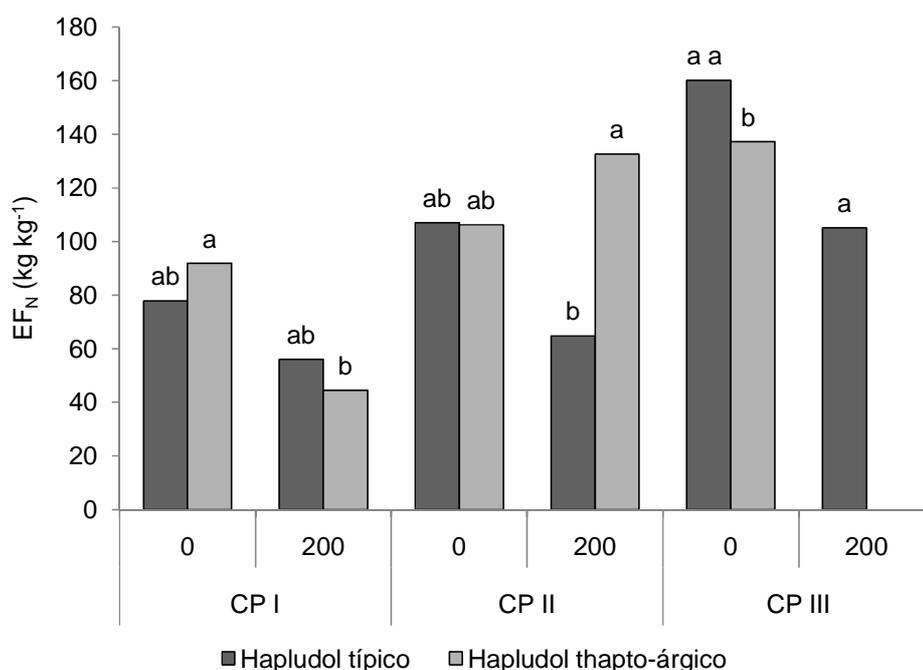


Figura 30. Eficiencia fisiológica de uso del nitrógeno (EF_N) en $kg\ kg^{-1}$ para los dos suelos en los tres ciclos de producción (CP) y bajo los dos niveles de fertilización nitrogenada. Letras distintas dentro de cada ciclo de producción indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

La EF_N promedio fue de 95,2 kg kg⁻¹ para el HT y de 102,5 kg kg⁻¹ para el HTA. Varios autores encontraron EF_N menores en el cultivo de maíz (Ladha *et al.*, 2005; Cassman *et al.*, 2002) posiblemente porque el cultivo estuvo sometido a condiciones sub-óptimas para el crecimiento. Dobermann (2006) se refiere a un rango de 30-90 kg kg⁻¹ siendo de 55-65 kg kg⁻¹ el rango óptimo de EF_N para un buen balance nutricional en cultivos de alto potencial de rendimiento. Fontanetto *et al.* (2001) hallaron valores similares al mínimo encontrado en esta tesis. En tanto la EF_N es muy dependiente del clima y de las condiciones para el crecimiento del cultivo. Además una EF_N alta sugiere deficiencia de otro nutriente, por lo que habría que seguir evaluando la condición nutricional de estos suelos.

CAPÍTULO VI. PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO

6.1 Resultados y Discusión.

Entre los factores ambientales que reducen el rendimiento de los cultivos, se encuentra la disponibilidad hídrica (Soriano, 1980). El efecto que produce un estrés hídrico en el maíz dependerá del momento de ocurrencia, de la intensidad y de la duración de la sequía (Andrade y Sadras, 2000).

El rendimiento en maíz es mayormente afectado cuando la sequía tiene lugar durante el período crítico que está comprendido entre los 15 días antes y 15 días después de la floración del cultivo (Shaw, 1974; Gómez 1991). Un déficit hídrico en esta etapa restringe el rendimiento afectando principalmente el número de granos por unidad de superficie (Otegui, 1992).

A continuación se presentan los resultados referidos a la productividad del cultivo de maíz. Cabe aclarar que las parcelas fertilizadas del Hapludol thapto-árgico en la fecha de siembra tardía no pudieron ser fertilizadas en V6 ni cosechadas por las excesivas precipitaciones que ocasionaron inundaciones en las parcelas. Para estos casos se realizaron dos análisis de la varianza evaluando por un lado, el efecto del Hapludol típico para los dos niveles de N y por el otro, el efecto del tratamiento sin fertilizar en los dos tipos de suelos.

6.1.1 Fenología

La ocurrencia de los eventos fenológicos de los cultivos difirió entre los ciclos de producción, en correspondencia con las diferentes fechas de siembra (Tabla 11). La duración del período siembra-floración fue más estable entre los tres ciclos de producción variando entre 65 a 70 días, posiblemente porque las temperaturas en este período fueron bastante estables (Figura 3). Las mayores diferencias sucedieron en el período floración-madurez fisiológica ya que la duración osciló entre 61 y 90 días, acortándose con fechas tardías, pudiendo deberse a la ocurrencia de heladas tempranas que provocaron la culminación de dicha etapa y en consecuencia el final del ciclo del cultivo.

Tabla 11. Fechas de los momentos de siembra, floración y madurez fisiológica de los cultivos de maíz en los distintos ciclos de producción.

Ciclo de Producción	Fechas		
	Siembra	Floración	Madurez fisiológica
I	3/11/2009	8/1/2010	8/4/2010
II	25/10/2011	4/1/2012	23/3/2012
III	6/12/2011	15/2/2012	16/4/2012

6.1.2 Materia Seca

Los contenidos de materia seca en floración (MS) variaron entre 3781 y 16632 kg MS ha⁻¹, siendo los promedios 9214 y 7684 kg MS ha⁻¹ para el Hapludol típico y el Hapludol thapto-árgico en ese orden (Figura 31).

En el ciclo de producción I se observan los mayores contenidos de materia seca aérea de maíz.

En todos los ciclos de producción el Hapludol típico presentó mayores valores de MS que el Hapludol thapto-árgico, sin embargo estas diferencias sólo fueron significativas ($p \leq 0,05$) en el tratamiento sin fertilizar del ciclo de producción I y III.

En el CP II no se observaron diferencias significativas entre suelos ni entre dosis de nitrógeno.

La mayor producción de materia seca del cultivo de maíz en el Hapludol típico podría explicarse por la mayor cantidad de agua disponible en el perfil efectivo de estos suelos durante el período crítico ($r=0,43$; $p \leq 0,05$). Estos resultados son coincidentes con lo descrito por Barraco (2009) quien concluyó que la profundidad efectiva de los suelos condicionó el contenido de agua disponible afectando la producción de biomasa aérea en el cultivo de soja. La disminución de la producción de biomasa en el cultivo de maíz sometido a estrés hídrico pudo deberse a una reducción en la radiación interceptada y/o disminución en la eficiencia de conversión de la radiación interceptada en biomasa; lo que afectó la tasa de crecimiento del cultivo (TCC). Andriani *et al.* (1991) observaron una reducción del 15% en la TCC de maíz sometidos a sequías prolongadas en suelos profundos. La reducción del área foliar

ante situaciones de estrés hídrico ha sido documentada por muchos autores en maíz (Eck, 1986; Frederick *et al.*, 1989) y en otros cultivos como girasol y soja (Cox y Joliff, 1986; Blanchet *et al.*, 1990; Pandey *et al.*, 1984) (Anexo, XIII).

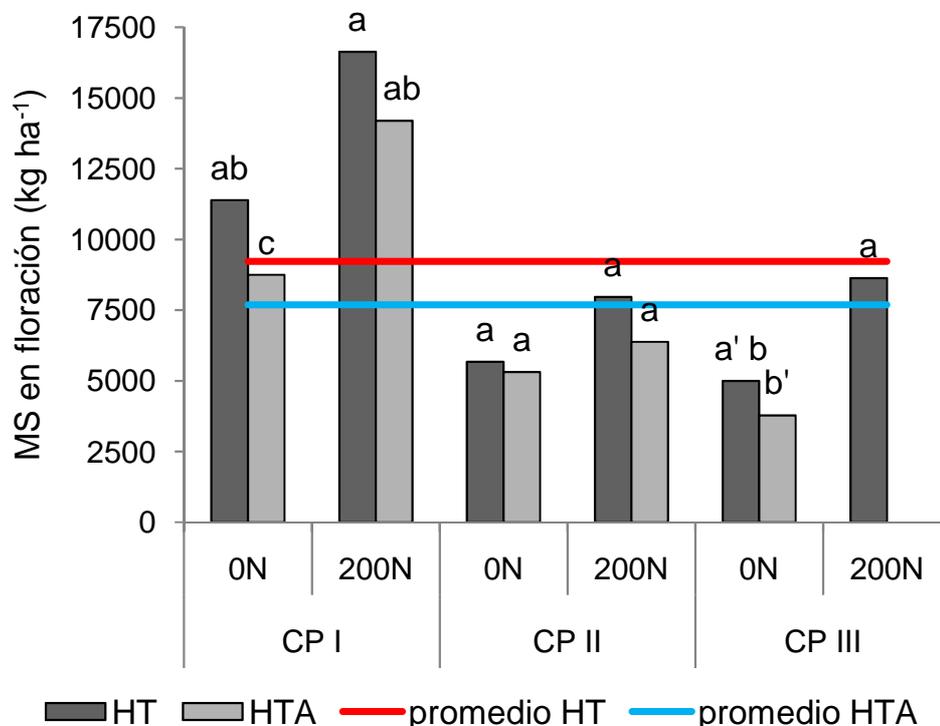


Figura 31. Contenido de materia seca en floración (kg MS ha⁻¹) en los distintos ciclos de producción y tipos de suelos y bajo los dos tratamientos de fertilización nitrogenada. Letras distintas en cada ciclo de producción indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

6.1.3 Rendimiento

En las últimas décadas, la selección y adopción de materiales genéticos con mayor potencial de rendimiento y el uso de diferentes tecnologías, han incrementado el rendimiento y la calidad del cultivo de maíz. Sin embargo, la producción de granos de este cultivo está principalmente limitada por el uso de fertilizantes nitrogenados y la disponibilidad de agua en el suelo (Maddonni, 2009).

El rendimiento en grano promedio fue de 6786 kg ha⁻¹, con valores extremos de 4416 y 8755 kg ha⁻¹ en el Hapludol thapto-árgico y 5282 y 10534 kg ha⁻¹ en el Hapludol típico (Figura 32).

Si bien el rendimiento promedio del Hapludol típico fue superior al Hapludol thapto-árgico, no se encontraron diferencias significativas entre los suelos, excepto en el ciclo de producción III con dosis 0N. En la región pampeana, en varias localidades bajo una secuencia trigo/soja – maíz – soja durante seis años, el incremento de rendimiento en el cultivo de maíz por el agregado de N varió entre el 7 – 45% (Dibb et al., 2004) (Anexo XIV).

Las diferencias de rendimiento se debieron a los niveles de nitrógeno aplicados, siendo el cultivo fertilizado el de mayor productividad en todos los casos, la excepción es el ciclo de producción II donde no se observaron diferencias entre suelos ni entre tratamiento de fertilización. Martínez *et al.* (2006), en el centro sur de Santa Fe, al analizar la combinación de híbridos por dosis de N y capacidad de uso del suelo, encontraron que no hubo interacción híbrido por nivel de N aplicado, pero los mayores incrementos en los rendimientos por el agregado de N se obtuvieron en los suelos con menores limitaciones (mayor capacidad productiva).

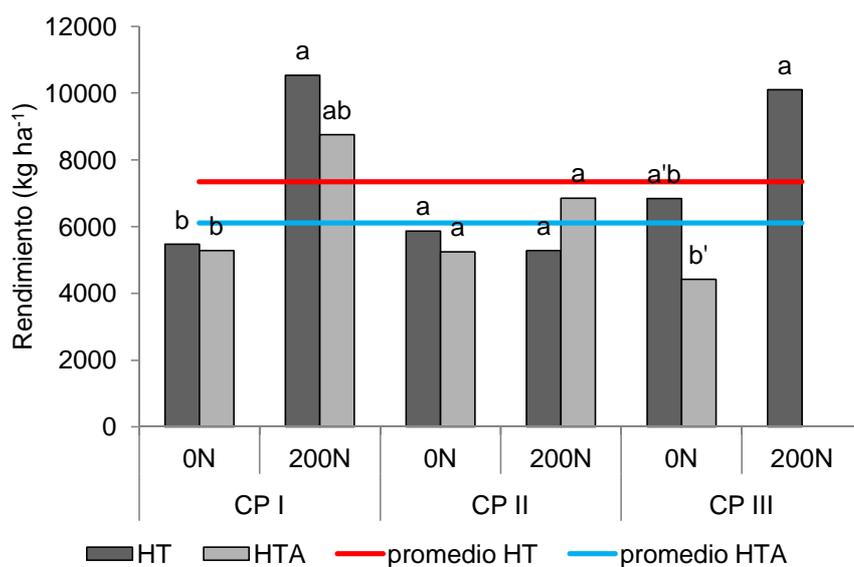


Figura 32. Rendimiento (kg ha⁻¹) del cultivo de maíz para los tres ciclos de producción, en los dos suelos (HT: Hapludol típico y HTA: Hapludol thapto-árgico) y bajo los dos tratamientos de fertilización nitrogenada (0N y 200N). *Letras distintas dentro de cada ciclo de producción indican diferencias significativas (p<=0,05).*

Según Baccini *et al.* (1980) las diferencias de rendimiento observadas entre años en la zona de Balcarce, para las mismas condiciones de manejo, pueden atribuirse a la disponibilidad hídrica, dado que los mayores rendimientos se producen en los años más húmedos y los menores en los más secos. Asimismo, Delpech y Darwich (1980) establecieron una asociación significativa entre el número de días con estrés hídrico y el rendimiento. Frye *et al.* (1983) atribuyen la reducción de los rendimientos de maíz en suelos someros, al menor contenido de agua disponible que puede ser almacenada en el perfil efectivo.

La respuesta del rendimiento a la disponibilidad de N varió en relación con la disponibilidad hídrica de los suelos. Diversos autores (Shafi *et al.*, 2006; Justo y Scianca, 2011; Proot *et al.*, 2011; Otegui *et al.*, 2002) reportaron diferencias en el rendimiento de maíz sometidos a distintas dosis de nitrógeno.

Respecto a la fecha de siembra tardía, los resultados mostraron que la respuesta al agregado de N fue significativa en el Hapludol típico. Estos resultados son similares a los encontrados por Barraco *et al.* (2011) donde si bien observaron una tendencia a incrementos del rendimiento por el agregado de N, estas no fueron significativas para maíces y sorgos tardíos de suelos profundos.

6.1.4 Índice de Cosecha

El índice de cosecha varió entre 0,34 y 0,58 (Figura 33). El promedio entre los suelos fue de 0,46 y 0,47 para el Hapludol típico y Hapludol thapto-árgico, respectivamente. No se encontraron diferencias significativas entre suelos y entre dosis de N en ningún ciclo de producción. Los menores valores observados en el CP I podrían atribuirse a la mayor cantidad de biomasa aérea producida comparada con los otros ciclos productivos (Figura 31) (Anexo XV).

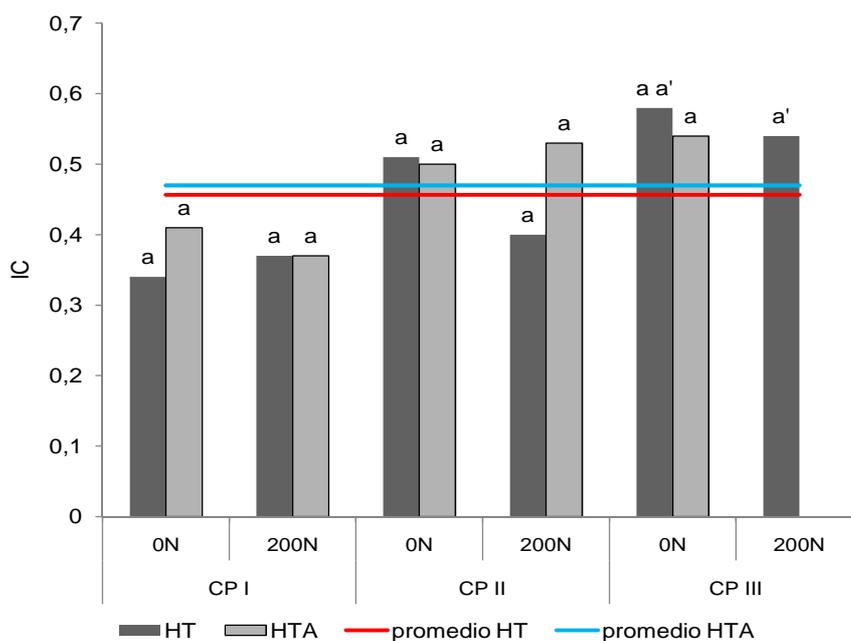


Figura 33. Índice de cosecha (IC) del cultivo de maíz en los tres ciclos de producción, comparando tipos de suelos (HT: Hapludol típico y HTA: Hapludol thapto-árgico) y niveles de nitrógeno aplicado (0N y 200N). Letras distintas dentro de cada CP indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

6.1.5 Peso de mil granos (PMG)

El PMG promedio fue de 313 g variando entre 264 y 342 g. Esta variable mostró diferencias significativas entre suelos en el ciclo productivo I a favor del Hapludol típico en el tratamiento fertilizado, en el resto de los ciclos no se evidenciaron diferencias significativas según tipo de suelo (Figura 34). Sin embargo en el CP III se observó que la fertilización nitrogenada aumentó el peso de granos en el suelo Hapludol típico en forma significativa ($p \leq 0,05$) (Anexo, XVI).

Las similitudes en los valores hallados entre los CP II y III podrían deberse a la gran cantidad de precipitaciones ocurridas durante la etapa post-floración de los cultivos.

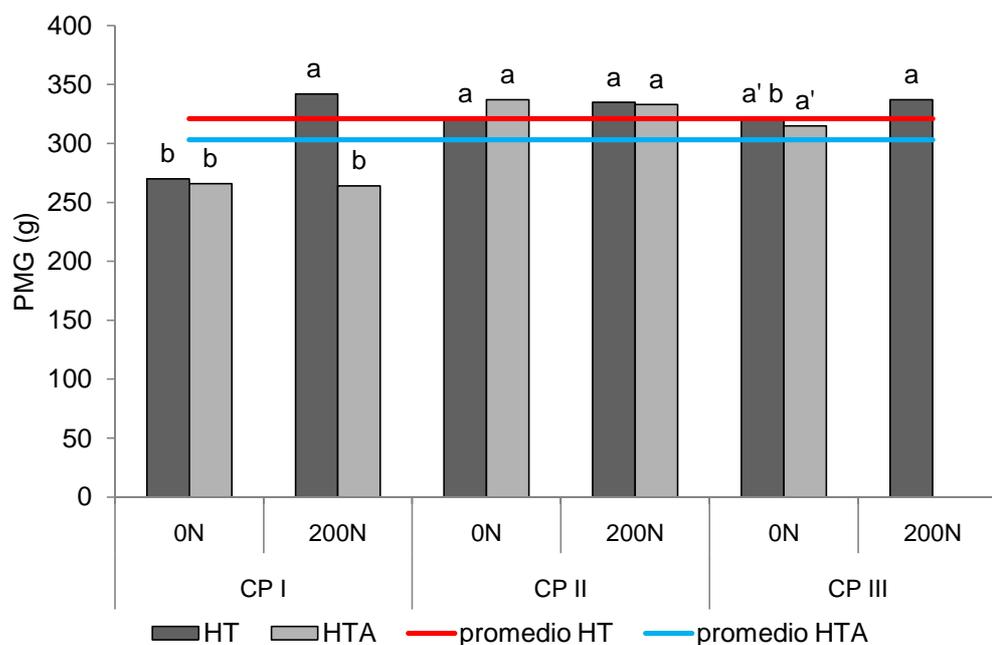


Figura 34. Peso de mil granos (PMG) del cultivo de maíz en los tres ciclos de producción, comparando tipos de suelos (HT: Hapludol típico y HTA: Hapludol thapto-árgico) y niveles de nitrógeno aplicado (0N y 200N). *Letras distintas dentro de cada ciclo productivo indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).*

6.1.6 Número de granos

El número de granos por unidad de superficie (NG) varió entre 1403 y 3094 granos m^{-2} . En el ciclo productivo I se encontraron diferencias entre dosis de nitrógeno aplicada en el Hapludol thapto-árgico, pero no entre tipos de suelos dentro de cada tratamiento de fertilización (Figura 35).

En el CP II no se observaron diferencias significativas entre tipos de suelos ni entre niveles de nitrógeno aplicado.

En el CP III hubo diferencias significativas entre tipos de suelo cuando no fue fertilizado, y entre tratamiento de fertilización nitrogenada en el Hapludol típico ($p \leq 0,05$) (Anexo, XVII).

El número de granos estuvo estrechamente vinculado a la condición hídrica imperante en el período crítico del maíz y en consecuencia está directamente relacionado con el rendimiento en grano (Figura 36).

Pedrol *et al.* (2008) obtuvieron incrementos en todos los componentes del rendimiento del maíz ante aumentos del nivel de N. Asimismo, esta respuesta fue encontrada en otros cultivos, Rasmussen *et al.* (1997) y Tejada y González (2003) hallaron aumentos en el número de granos de trigo cuando se lo fertilizó con una fuente nitrogenada.

Se atribuye un menor número de granos en cultivos con deficiencias en nitrógeno al menor desarrollo de las plantas que condiciona la radiación interceptada y por ende la tasa de crecimiento del cultivo durante el período crítico. Según Bellow (2002) la suplementación de N afecta substancialmente la proporción de granos abortados o de granos que detienen su desarrollo. Uhart y Andrade (1995) sugieren que la deficiencia de N afecta el rendimiento al alterar la interceptación de luz y la fotosíntesis de las hojas.

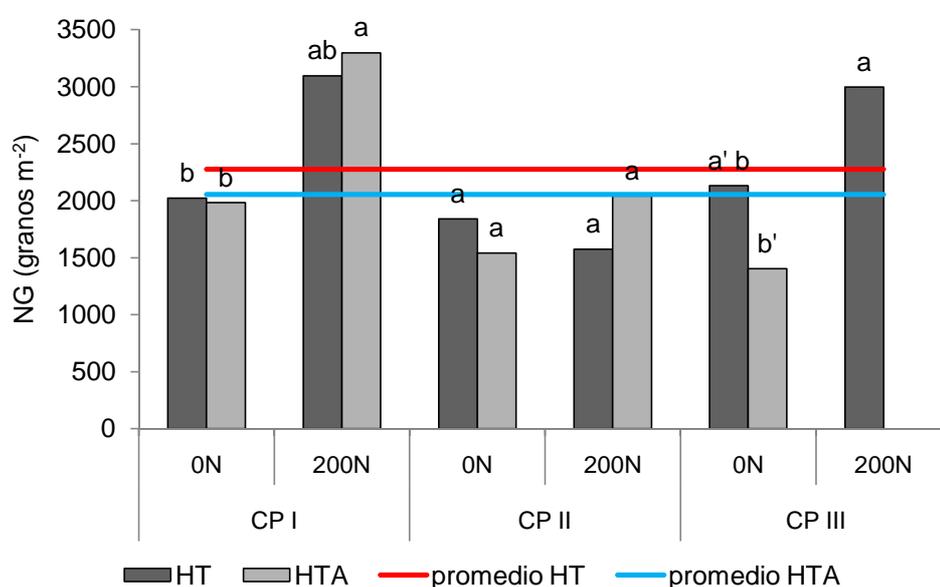


Figura 35. Número de granos por unidad de superficie (NG: granos m⁻²) en los tres ciclos de producción en los dos suelos (HT: Hapludol típico y HTA: Hapludol thapto-árgico) y niveles de nitrógeno aplicado (0N y 200N). Letras distintas dentro de cada ciclo productivo indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

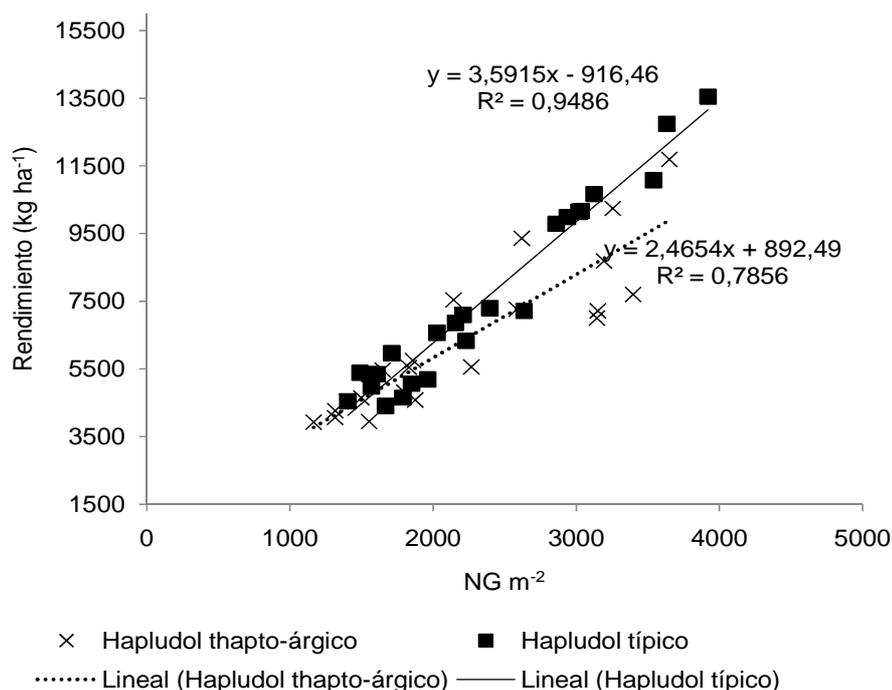


Figura 36. Relación entre el rendimiento (kg ha⁻¹) y el número de granos por unidad de superficie (NG m⁻²) en los dos tipos de suelos.

Estos resultados son coincidentes con numerosos autores (Andrade *et al.*, 1996; Rhoads y Bennett, 1990; Doorenbos y Kassam, 1979, Echarte *et al.*, 1998) quienes demostraron que la ocurrencia de deficiencias hídricas severas durante la floración produce importantes reducciones en el rendimiento manifestadas principalmente por el menor número de granos. Coincidente con los resultados obtenidos, Otegui (1992) halló una fuerte relación entre el rendimiento de maíz y el número de granos ($r=0,88$), siendo el componente más afectado por deficiencias hídricas en el período crítico del cultivo.

6.2 Comentarios del capítulo.

Según los resultados que se presentan, en años de precipitaciones normales (como lo fue el ciclo de producción I) las diferencias entre los tipos de suelos adquieren mayor importancia. Esta diferencia entre suelos no se manifestó cuando se produjo un severo

estrés hídrico en el período crítico del cultivo (ciclo productivo II) donde no se observaron ventajas en suelos profundos ni en cultivos fertilizados.

Al atrasar la fecha de siembra, la sequía ocurrió durante el período vegetativo del cultivo, en este caso volvieron a remarcar las diferencias entre suelos y dosis de nitrógeno aplicada. La fecha de siembra tardía permitió eludir el estrés hídrico de la floración del maíz para hacerlo coincidir con la etapa vegetativa, si bien se resintió la producción de materia seca, no se afectaron los componentes del rendimiento.

Ante un déficit hídrico en el período vegetativo en los suelos someros las raíces se ven impedidas para explorar zonas profundas y así extraer agua desde estos estratos.

En el ciclo de producción II, parecería que el severo déficit hídrico en el período crítico del cultivo enmascaró las diferencias entre los suelos y el efecto positivo de la aplicación de fertilizante nitrogenado. Esto se reflejó en la menor producción de materia seca, y de rendimiento en grano y sus componentes. En este sentido, en ninguna de las variables analizadas se reportaron diferencias significativas entre los suelos.

CAPÍTULO VII. INTEGRADOR

A los fines de explicar la participación y ponderación de cada variable original en la variabilidad total de los datos obtenidos se realizó un análisis multivariado mediante componentes principales (ACP). De esta forma se obtuvo una nueva expresión mediante vectores que compusieron los ejes de componentes principales (Axis). Luego se realizó un análisis de correlación de Pearson, para obtener los coeficientes de correlación (r^2) y sus significancias, de modo de ver el sentido, la dirección y el grado de asociación entre las variables.

7.1 Análisis de Componentes Principales

Las primeras tres componentes explicaron el 76% de la varianza total observada (Anexo, XVIII y XIX)

La componente principal 1 (Axis 1) explicó el 43,3% de la variancia. Esta componente mostró una alta correlación negativa con la materia seca a floración ($r = -0,935$) el contenido de N en planta ($r = -0,802$), la EUA MS ($r = -0,830$) y la EUA G ($r = -0,755$), con menor grado se correlacionó negativamente con el NG ($r = -0,657$), el agua disponible en el período crítico (ADpc) ($r = -0,533$) y el rendimiento ($r = -0,520$). La componente principal 1 mostró correlaciones positivas con el contenido de N en el suelo a la siembra ($r = 0,859$), N a cosecha ($r = 0,828$), con el UC total ($r = 0,830$), el IC ($r = 0,703$) y la EF_N ($r = 0,692$). De manera tal que a mayor valor de la componente principal 1, corresponden cultivos con menor desarrollo de biomasa y bajo nivel nutricional sumado a una menor cantidad de agua disponible en el período crítico. Bajo esta condición se logran menores eficiencias de uso del agua, lo que repercute directamente en un menor número de granos y por ende se resiente el rendimiento. Las correlaciones positivas entre esta componente y las variables de suelo y del cultivo, aparentemente se contradicen con las correlaciones negativas citadas anteriormente. Sin embargo, estas relaciones podrían ser resultantes de efectos adversos climáticos que ocasionaron que el potencial de rendimiento dado por las condiciones de disponibilidad de agua y N en el suelo (UC, Ns, Nc) no se expresaron en el desarrollo vegetativo (MS) o en el rendimiento.

La segunda componente principal (Axis 2) explicó el 18,3% de la variancia. Mostró correlaciones negativas con las variables PMG ($r = -0,814$), el ADs ($r = -0,722$), el ADC ($r = -0,702$) y con el rendimiento ($r = -0,615$). De manera tal que a mayor valor de la componente 2 el agua disponible a la siembra y a cosecha serían menor, afectándose el PMG y el rendimiento.

La tercer componente principal (Axis 3) explicó el 14,5% de la varianza y se correlacionó positivamente con el NG ($r= 0,641$), con el rendimiento ($r= 0,573$) y en forma negativa con el ADpc ($r= -0,629$); de manera que al aumentar los valores del Axis 3 corresponden aumentos del NG y del rendimiento pero disminuciones del agua disponible en el período crítico.

En las Figuras 37 y 38 se presentan los gráficos de las variables en los tres componentes analizados.

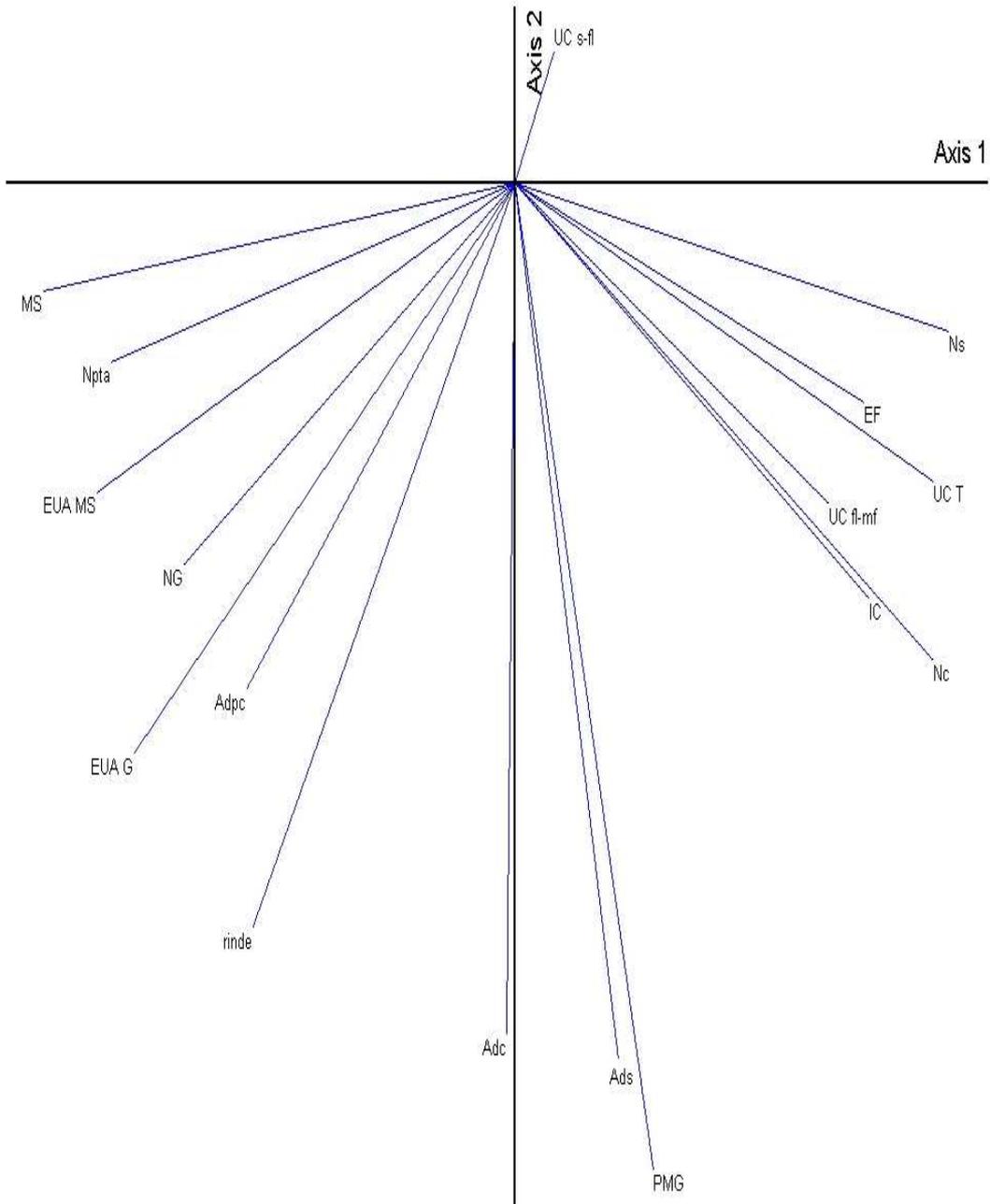


Figura 37. Análisis de Componentes Principales. Se representan las componentes principales Axis 1 y Axis 2, para las variables físicas, químicas y del cultivo de maíz.

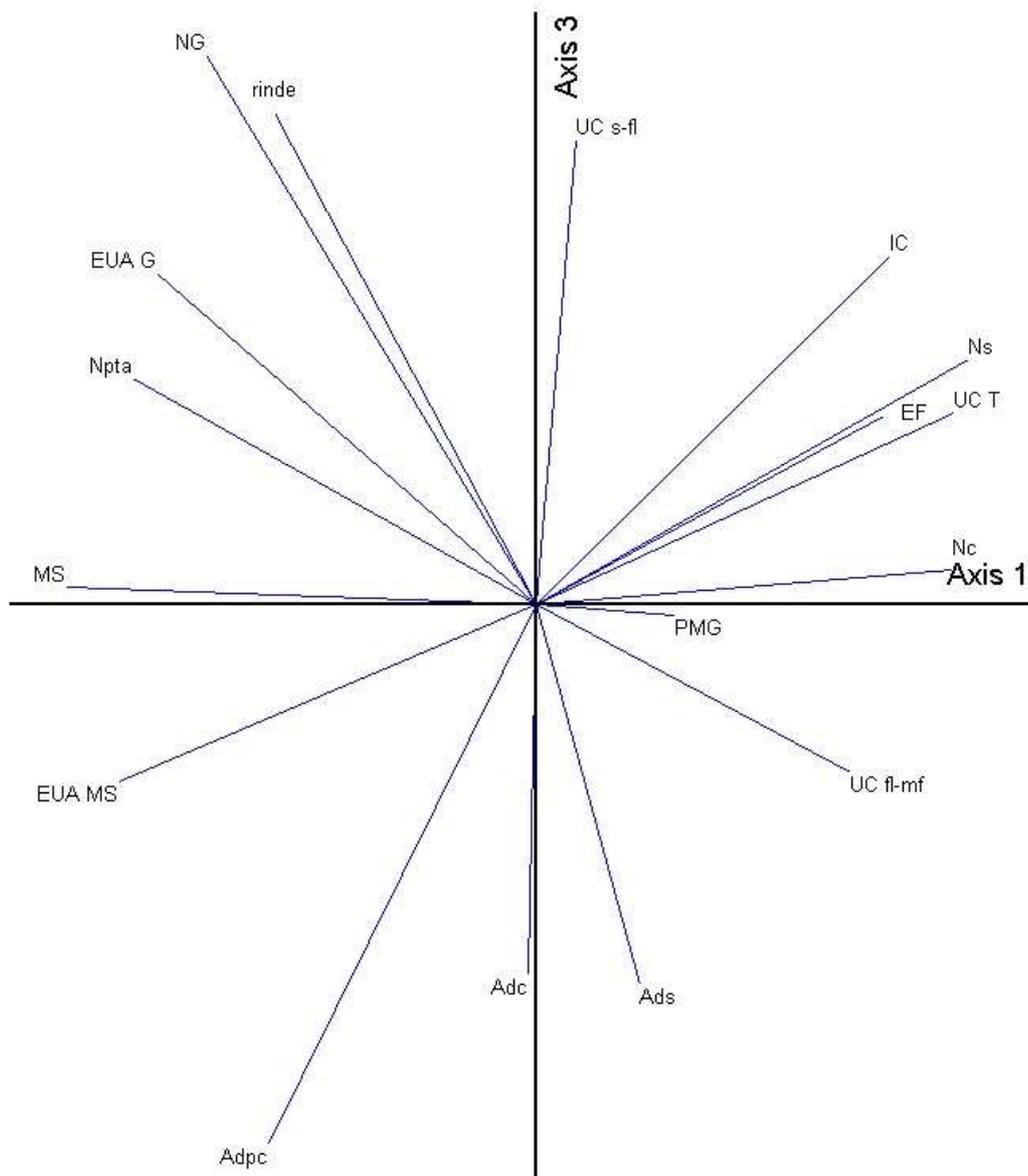


Figura 38. Análisis de Componentes Principales. Se representan las componentes principales Axis 1 y Axis 3, para las variables físicas, químicas y del cultivo de maíz.

En la Figura 39 se graficaron los puntos-muestras (p) en los dos primeros componentes y se observan dos grupos definidos que corresponden a los dos años evaluados. A su vez, en el año I se pueden identificar dos grupos contrastantes, el HTA-0N en el extremo superior y el HT-200N en el extremo inferior.

En el año II no hubo un patrón de agrupamiento entre suelos ni entre dosis de N en ninguno de los ciclos de producción correspondientes (II y III).

Al representar la tercer componente con la primera (Axis 1 y Axis 3) en la Figura 40, vuelven a identificarse dos grandes grupos pertenecientes a los dos años evaluados.

En el año I el tipo de suelo y las dosis de N están bien discriminadas, situación que no sucede en el ciclo productivo II.

En el ciclo III pueden distinguirse los tratamientos de fertilización nitrogenada en el HT, no observándose agrupamiento de los suelos que no fueron fertilizados.



Figura 39. Análisis de Componentes Principales. Se representan las componentes principales Axis 1 y Axis 2, para los puntos-muestras. En la figura 38-A se presenta el gráfico de puntos sin discriminar por grupos, en la figura 38-B se resaltan los grupos detectados.

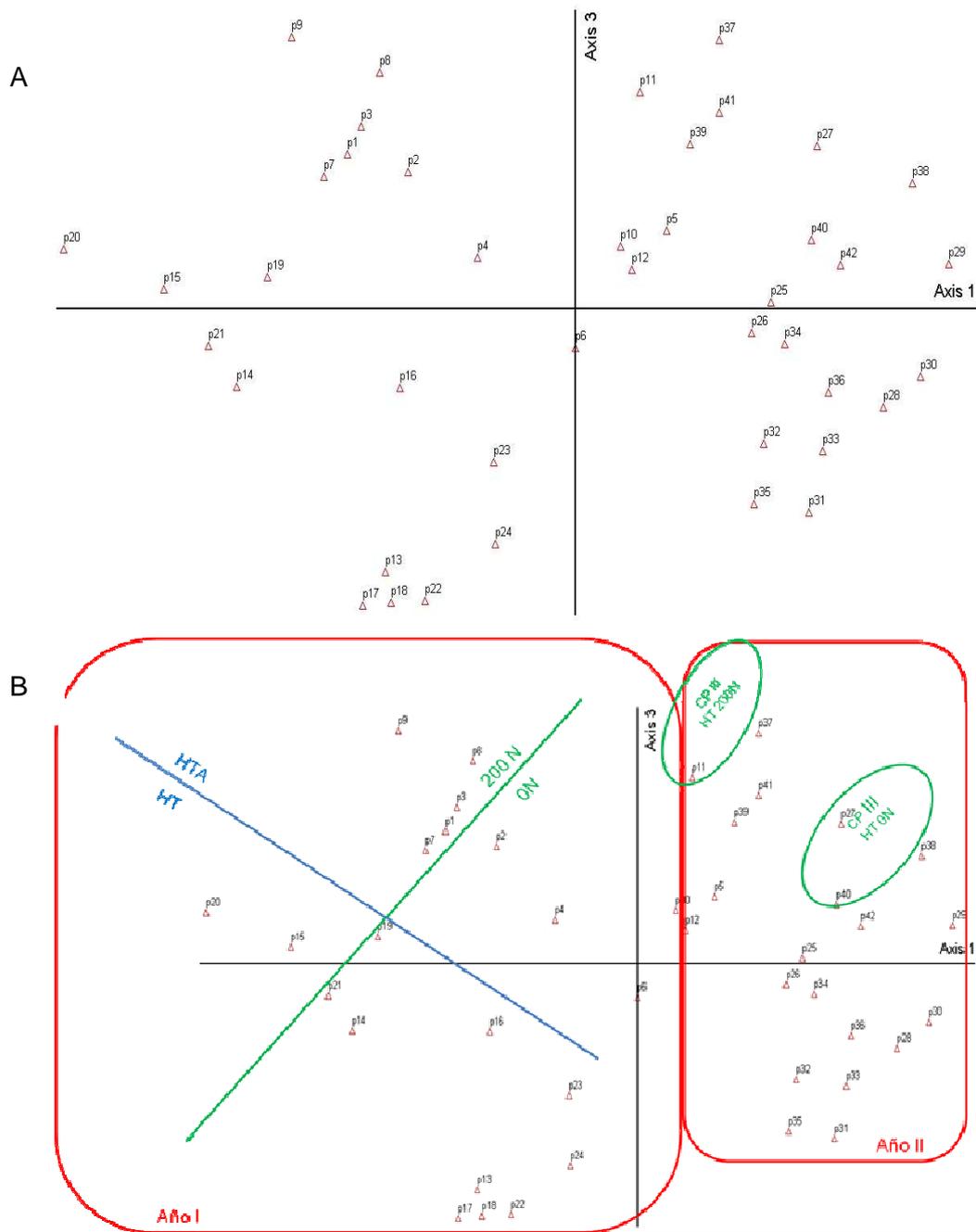


Figura 40. Análisis de Componentes Principales. Se representan las componentes principales Axis 1 y Axis 3, para los puntos-muestras. En la figura 39-A se presenta el gráfico de puntos sin discriminar por grupos, en la figura 39-B se resaltan los grupos detectados.

7.2 Análisis de correlación de Pearson entre variables de agua, nitrógeno y variables del cultivo.

En general las variables referidas al contenido de agua disponible en el perfil del suelo (ADs, ADpc y ADc) se asociaron con los componentes del rendimiento (Tabla 12), así el agua disponible a la siembra se correlacionó positivamente con el PMG (0,54; $p < 0,05$) al igual que el agua disponible a cosecha (0,42; $p < 0,05$), mientras que el contenido de agua disponible en el período crítico se asoció positivamente con la materia seca a floración (0,43, $p < 0,05$). Otegui *et al.* (2002) concluyeron que el agua a la siembra puede condicionar fuertemente el rendimiento a través de una baja cobertura que afectaría principalmente la determinación del número de granos. Estos autores reportaron caídas de un 30% del rendimiento si se parte de un perfil con sólo el 30% de agua disponible a la siembra. Sin embargo, en este estudio no se encontró relación significativa entre el ADs y el NG.

Los contenidos de nitrógeno en el suelo a la siembra (Ns) y a cosecha (Nc) tuvieron asociación significativa con el rendimiento y con todos sus componentes, siendo positiva con el índice de cosecha (IC) y el PMG, y negativa con el rendimiento, el contenido de nitrógeno en plantas a floración (Nabs) y el número de granos (NG). Sin embargo, no se observaron relaciones positivas entre estas variables y los contenidos hídricos del suelo, mientras que Otegui *et al.* (2002) obtuvieron una fuerte asociación del Ns con el ADs y observaron una mayor respuesta en todos los niveles de N cuando el suelo parte de un perfil húmedo en superficie.

En este sentido se encontró una fuerte asociación entre el contenido de nitrógeno en planta (Nabs) y la producción de materia seca a floración (MS) (0,89; $p < 0,05$), la misma relación fue reportado por Uhart y Andrade (1995) quienes obtuvieron una ecuación exponencial ($r^2 = 0,91$) al relacionar ambas variables en maíces con y sin limitaciones hídricas y nutricionales de Balcarce.

Al analizar el rendimiento y sus componentes, se observó una fuerte asociación y positiva entre el rendimiento y el número de granos (0,91; $p < 0,05$) y en menor medida con el resto de las variables. Otegui (1992) explica esta relación por la disminución de la polinización y el aumento del aborto de granos. Así mismo el NG mostró una fuerte asociación y positiva con el Nabs (0,73; $p < 0,05$) y la MS (0,64; $p < 0,05$). Estos resultados se condicen con lo encontrado por Álvarez *et al.* (2006), quienes explicaron la fuerte asociación entre estas variables por la mayor radiación interceptada a

floración que repercute directamente en el rendimiento. Similares resultados fueron reportados por Pérez *et al.* (2011) para el cultivo de soja.

El uso consuntivo total (UC T) presentó correlación significativa con los componentes del rendimiento y con el contenido de nitrógeno en suelo, siendo positiva con el índice de cosecha (0,63; $p < 0,05$), el peso de mil granos (0,40, $p < 0,05$), el contenido de nitrógeno a la siembra (0,93; $p < 0,05$) y a la cosecha (0,88; $p < 0,05$).

Además el UC T se asoció negativamente con la materia seca a floración (-0,63; $p < 0,05$), el contenido de N en plantas a floración (-0,43; $p < 0,05$), el número de granos (-0,31; $p < 0,05$) y el contenido de agua disponible durante el período crítico (-0,56; $p < 0,05$).

La eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca (EUA MS) se correlacionó positivamente con el rendimiento (0,49; $p < 0,05$), la materia seca del cultivo (0,87; $p < 0,05$), el contenido de N en planta (0,71; $p < 0,05$), el NG (0,50; $p < 0,05$), el agua disponible en el período crítico (0,63; $p < 0,05$) y con la EUA G (0,66; $p < 0,05$).

En forma negativa se asoció la EUA MS al índice de cosecha (-0,61; $p < 0,05$), el Ns (-0,65; $p < 0,05$), el Nc (-0,57; $p < 0,05$) y el uso consuntivo total (-0,55; $p < 0,05$).

La eficiencia en el uso del agua para la producción de grano (EUA G) mostró una fuerte relación positiva con el rendimiento del cultivo (0,93; $p < 0,05$), la MS (0,69; $p < 0,05$), con el N en planta (0,70; $p < 0,05$), el NG (0,89; $p < 0,05$), el ADpc (0,39; $p < 0,05$) y en forma negativa con el UC T (-0,50; $p < 0,05$) y el UC fl-mf (-0,42; $p < 0,05$).

La eficiencia fisiológica de uso del nitrógeno (EF_N) se asocio de forma positiva con el índice de cosecha (0,87; $p < 0,05$), el uso consuntivo total (0,50; $p < 0,05$), el Ns y Nc (0,47; $p < 0,05$); y en forma negativa con la materia seca a floración (-0,76; $p < 0,05$), Nabs (-0,72; $p < 0,05$) y la EUA MS (-0,61; $p < 0,05$).

Tabla 12. Correlación de Pearson, se presentan los coeficientes de Pearson (en fondo blanco) y sus probabilidades (en fondo grisáceo). Referencias: PG: rendimiento, MS: materia seca a floración, Nabs: contenido de N en planta, IC: Índice de cosecha, PMG: peso de mil granos, NG: número de granos; Ns: contenido de N en suelo a la siembra; Nc: contenido de N en suelo a cosecha; ADs: agua disponible a la siembra; ADpc: agua disponible en el período crítico; ADc: agua disponible a cosecha, UC s-fl: uso consuntivo entre siembra y floración; UC fl-mf: uso consuntivo entre floración y madures fisiológica; UC T: uso consuntivo total; EUA G: eficiencia de uso del agua para la producción de grano; EUA MS: eficiencia de uso de agua para la producción de materia seca; y EF_N: eficiencia fisiológica del nitrógeno.

	PG	MS	Nabs	IC	PMG	NG	Ns	Nc	ADs	ADpc	ADc	UC s-fl	UC fl-mf	UC T	EUA G	EUA MS	EF _N
PG	1,00	0,00	0,00	0,54	0,02	0,00	0,16	0,22	0,76	0,24	0,36	0,43	0,13	0,32	0,00	0,00	0,56
MS	0,53	1,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,44	0,00	0,79	0,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nabs	0,62	0,89	1,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,30	0,22	0,72	0,96	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
IC	0,1	-0,73	-0,56	1,00	0,00	0,67	0,00	0,00	0,36	0,02	0,61	0,28	0,02	0,00	0,35	0,00	0,00
PMG	0,37	-0,17	-0,08	0,43	1,00	0,86	0,03	0,00	0,00	0,42	0,01	0,23	0,00	0,01	0,20	0,83	0,07
NG	0,91	0,64	0,73	-0,07	-0,03	1,00	0,03	0,01	0,26	0,48	0,80	0,18	0,00	0,05	0,00	0,00	0,14
Ns	-0,22	-0,69	-0,43	0,63	0,33	-0,34	1,00	0,00	0,37	0,00	0,39	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nc	-0,19	-0,66	-0,45	0,59	0,52	-0,40	0,88	1,00	0,00	0,01	0,09	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ADs	0,05	-0,12	-0,16	0,14	0,54	-0,18	0,14	0,49	1,00	0,00	0,00	0,97	0,16	0,11	0,82	0,88	0,65
ADpc	0,19	0,43	0,19	-0,35	0,13	0,11	-0,70	-0,39	0,44	1,00	0,00	0,01	0,18	0,00	0,01	0,00	0,14
ADc	0,14	0,04	-0,06	0,08	0,42	-0,04	-0,14	0,27	0,85	0,64	1,00	0,60	0,66	0,96	0,39	0,52	0,60
UC s-fl	0,12	-0,07	0,01	0,17	-0,19	0,21	0,11	0,11	-0,01	-0,40	0,08	1,00	0,00	0,56	0,94	0,00	0,47
UC fl -mf	-0,24	-0,46	-0,32	0,36	0,49	-0,43	0,70	0,65	0,22	-0,21	-0,07	-0,56	1,00	0,00	0,01	0,27	0,10
UC T	-0,16	-0,63	-0,43	0,63	0,40	-0,31	0,93	0,88	0,25	-0,56	-0,01	0,09	0,71	1,00	0,00	0,00	0,00
EUA G	0,93	0,69	0,70	-0,15	0,20	0,89	-0,53	-0,49	-0,04	0,39	0,13	0,01	-0,42	-0,50	1,00	0,00	0,09
EUA MS	0,49	0,87	0,71	-0,61	0,03	0,50	-0,65	-0,57	-0,02	0,63	0,10	-0,46	-0,17	-0,55	0,66	1,00	0,00
EF _N	-0,09	-0,76	-0,72	0,87	0,29	-0,23	0,47	0,47	0,07	-0,23	0,08	0,12	0,26	0,50	-0,27	-0,61	1,00

CAPÍTULO VIII. CONSIDERACIONES FINALES

El agua fue considerada desde siempre, como el factor que más incide en la producción de alimentos en el mundo. El desafío constante es conocer cómo el clima, el suelo, la genética vegetal y el manejo cultural pueden ser combinados para aumentar la eficiencia del uso del agua por los cultivos (Micucci y Álvarez, 2003).

Otegui *et al.* (2002), aseveran que si bien las fechas de siembras tempranas presentan la mayor cantidad de radiación solar capturada al final del ciclo por lo que se esperaría mayores rendimientos, el aprovechamiento de la luz es bajo dado el lento crecimiento inicial del cultivo asociado a temperaturas frescas, por lo que las pérdidas de captación de luz fueron mayores (Otegui *et al.* 1996). En siembras tardías es más rápida la cobertura del suelo lo que permitiría lograr altos niveles de radiación interceptada durante el período crítico. En la región en estudio, la temperatura y la luz no disminuyen tan abruptamente en los meses de febrero-marzo lo cual aseguraría una condición más favorable durante el llenado de los granos. Estas consideraciones, ponen de manifiesto la importancia de priorizar el factor “agua” a la hora de planificar un cultivo de maíz a secano en la región de la Pampa Arenosa Argentina.

El cultivo de maíz en esta región, está expuesto a sequías erráticas, de duración e intensidad variable producto de una combinación de factores: escasa cantidad de precipitaciones, distribución variable de los eventos de lluvias, altas temperaturas, suelos con limitaciones físicas (horizonte thapto) y/o de texturas gruesas en los primeros estratos del perfil.

Diversos autores (Otegui *et al.*, 2002; Dardanelli *et al.*, 2004; Andrade *et al.*, 1996) sugieren priorizar la disponibilidad hídrica del perfil a la siembra del cultivo en lugar de la disponibilidad de radiación solar y temperatura para la definición del rendimiento en los ambientes semiáridos y súbhumedos; ya que el AD es considerada el principal factor que limita el crecimiento y rendimiento del maíz.

Mermas en el rendimiento por deficiencias hídricas durante el período crítico del cultivo fueron reportadas por innumerables autores (Andrade *et al.*, 1996; Rhoads y Bennett, 1990; Doorenbos y Kassam, 1979). Las máximas reducciones del rendimiento es este teso produjeron cuando la sequia ocurrió alrededor de la floración del maíz. En concordancia con los resultados obtenidos, Andrade y Sadras (2000) señalan la alta correlación entre la tasa de crecimiento del cultivo en el período crítico con el número de granos fijados y ante un

severo déficit hídrico reportaron una reducción del rendimiento, el índice de cosecha y la materia seca aérea. Shaw (1974), demostró que cuando el estrés se produce en etapas vegetativas o en el llenado de granos, el efecto sobre el rendimiento es sensiblemente menor.

A través del manejo apropiado se podría alcanzar un rendimiento satisfactorio eludiendo el estrés hídrico en los estados críticos del cultivo.

El régimen hídrico incide significativamente sobre la productividad del cultivo, por lo tanto conocer las variaciones en la capacidad de almacenar agua disponible de los Hapludoles de la región conjuntamente con los datos de precipitaciones resulta indispensable a la hora de tomar decisiones de manejo.

Se evidencia la importancia de la profundidad efectiva de los suelos dado que condiciona la capacidad de retención hídrica y por ende el agua disponible para los cultivos. Ante condiciones de sequía las raíces del maíz tienen la habilidad de explorar el perfil hacia capas más profundas para la absorción de agua y disminuyen así los efectos negativos sobre el crecimiento (Dardanelli *et al.*, 2004, Otegui, 1992). Por lo tanto, la situación se vuelve más crítica en los suelos con limitaciones físicas en el perfil ya que provocan la pérdida de la autonomía del cultivo en relación a las precipitaciones.

Respecto a la respuesta del cultivo de maíz al agregado de nitrógeno está estrechamente vinculada con la disponibilidad de agua. Numerosos estudios avalan esta relación (Díaz-Zorita y Duarte, 1997; Ferrari *et al.*, 2001) basados en el mejor aprovechamiento del nutriente en condiciones sin limitaciones hídricas.

Los resultados de la presente tesis muestran una mayor influencia del año dado por la distribución de las precipitaciones, que por el tipo de suelo, sobre la productividad del cultivo de maíz. Por otra parte la respuesta del maíz a la fertilización nitrogenada, si bien varió entre suelos, resultó dependiente de la disponibilidad de agua alcanzándose los mayores rendimientos en el HT. Estos resultados confirman la hipótesis planteada, respecto a cierta interacción entre la condición del sitio y el manejo que afectan la productividad.

A fin de analizar con mayor detalle lo expuesto se presenta a continuación una síntesis de los principales resultados obtenidos.

En lo referido a las variables de calidad física del suelo también se hallaron diferencias debido a las características ambientales entre el HT y HTA. Los mayores

contenidos de agua útil se registraron en el HT, que durante todo el ciclo del cultivo se mantuvo por encima del punto de marchitez permanente. Esto podría explicar también los menores valores de RP en el suelo HT respecto del HTA.

El estado de agregación no difirió entre HT y HTA. Este último tuvo menor proporción de agregados > 8 mm. Este resultado se podría relacionar con el mayor contenido de MO del HTA con respecto al HT. La infiltración fue mayor en el HT, lo que se correlacionó con la menor Dap registrada en este suelo. También se observó comportamiento diferencial, según los horizontes evaluados, siendo la infiltración mayor en HTA en el horizonte A respecto del B textural.

El UC del maíz no mostró diferencias entre suelos, si entre años y entre momentos dentro del desarrollo del cultivo. Al evaluar la influencia del sitio sobre el cultivo de maíz se observó que lo más afectado resultó ser la cantidad de materia seca aérea a floración y el rendimiento en grano, a través de los componentes evaluados (peso de granos en el HTA y número de granos en el HT).

Los valores de RP hallados fueron mayores en el HTA, variable que se asocio con la Dap registrada. Si bien la RP se asocia negativamente con la humedad del suelo, los valores registrados en la profundidad de 0,40-0,60 m del HTA aún cuando el suelo estuvo con contenidos de humedad cercanos a la CC fueron superiores a lo considerado restrictivo para el desarrollo de la raíces. Estos valores según data la bibliografía son restrictivos para el desarrollo normal de las raíces, generando en este caso que el cultivo solo pueda acceder al agua de los primeros 0,60 m.

Con respecto a la productividad del cultivo de maíz fue el año y el ambiente el que determinó en mayor medida tanto los rendimientos de biomasa como los de grano, y esto también se reflejó en un mayor uso consuntivo de agua del maíz en el HT, no mostrándose diferencias entre suelos y dosis de fertilizantes en la primera campaña de evaluación CPI. En coincidencia con Quiroga *et al.* (2005) quienes marcan la importancia del manejo del período de barbecho logrando en algunos cultivos proveer más del 50 % del uso consuntivo. Mejorando el UC a través de la nutrición de los cultivos, Díaz Zorita *et al.* (2004) muestran la importancia de conservación de la humedad del suelo a través del sistema de labranza y de la dependencia de la SD a la fertilización nitrogenada.

En el HT fertilizado el cultivo produjo mayores rendimientos de biomasa, mientras que en el HTA testigo indujo a una menor producción de biomasa. El rendimiento de grano

fue mayor en el HT fertilizado solo en CPI y CPIII. Mientras que en CPII, la fertilización no tuvo efecto sobre el rendimiento. Estos resultados indican que la mayor disponibilidad de N incidió más sobre el rendimiento que la mayor disponibilidad de agua aportada por tipo de suelo. En ambos suelos, el uso consuntivo de maíz se incrementó con el agregado de N.

La mayor eficiencia de uso de agua se obtuvo en el HT fertilizado, mientras que la menor eficiencia se registró en el HTA sin fertilizar. La fertilización nitrogenada afectó en forma diferencial a los componentes de rendimiento y produjo un incremento en el número de granos en ambos suelos. La mayor variación en la EUA MS y G estuvieron asociadas al año y al uso de fertilizante. En tanto que el suelo no incidió sobre este parámetro.

El tipo de suelo produjo efectos diferenciales según año de evaluación y fertilización. Marcando el efecto positivo del almacenamiento de agua en el HT el cual también se tradujo en un mayor número de granos. Las condiciones ambientales de déficit hídrico (CPII) durante el período crítico en siembras tempranas afectó la producción de biomasa y el rendimiento de los cultivos en los dos suelos.

Por lo expuesto puede inferirse sobre la necesidad de considerar, en futuros estudios, cierto orden jerárquico entre los factores que inciden sobre la productividad de los cultivos y propiedades de Molisoles de las regiones semiárida y subhúmeda pampeana. No resultaría conveniente realizar estudios sobre nutrición de los cultivos o evaluar los efectos del manejo (fechas de siembra, rotaciones, densidad de siembra) sin considerar el régimen hídrico de los suelos. El mismo no sólo varía en la región a través del gradiente de precipitaciones (Este- Oeste) sino que es además fuertemente condicionado por el espesor y composición granulométrica de los suelos, pudiendo variar significativamente entre lotes de un mismo productor. Estudios de esta naturaleza resultaran básicos para el desarrollo de una agricultura de precisión y manejo sustentables de los recursos en la región.

La mayoría de las experiencias a nivel regional por ejemplo de Quiroga *et al.* 2005 indican que factores como el régimen hídrico condiciona las propiedades de los suelos. Estos autores comprobaron una estrecha relación entre los contenidos de MO y fracciones granulométricas marcando esto un efecto positivo sobre los índices de fertilidad tanto físicos como químicos de los suelos.

Sin embargo la presente tesis muestra que a igual composición granulométrica pueden presentarse distinto comportamiento de los rendimientos condicionados por el régimen hídrico (precipitaciones). Otro factor determinante (a igual composición

granulométrica y régimen hídrico) es el espesor de los suelos que es determinante de la capacidad de retención de agua de los suelos en la región semiárida y subhúmeda pampeana.

Finalmente puede concluirse que existe una suma de factores que estarían condicionando la productividad en la región semiárida y subhúmeda pampeana y que deben ser especialmente considerados al momento de establecer experiencias de larga duración, extrapolar datos obtenidos bajo determinada condición de sitio, y establecer valores críticos en indicadores edáficos relacionados con la sustentabilidad de los recursos.

Surge la necesidad de investigar en futuros estudios diversas estrategias de manejo relacionado con el desarrollo de una “agricultura por ambiente”, con el objetivo de aprovechar el potencial productivo del suelo, el agua y los recursos genéticos, para hacer un uso más eficiente de los insumos involucrados y disminuir los efectos de degradación de los recursos naturales.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, C. 2007. Efecto del sistema de labranza sobre propiedades de un Hapludol típico y un Haplustol éntico de la Pampa Arenosa. Tesis Magister en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. Argentina. 65 pp.

Álvarez, C.; Scianca, C.; Barraco, M.; Díaz-Zorita, M. 2010. Cambios en suelos bajo siembra directa con cereales de invierno de cobertura. *En*: INTA, E.E.A. General Villegas. Memoria Técnica 2009-2010, pp. 11-14.

Álvarez, C.; Barraco, M.; Scianca, C.; Zaniboni, M.; Spagnuolo, C. 2008. Eficiencia de uso de agua en la región subhúmeda y semiárida pampeana en el cultivo de trigo. *En*: INTA, E.E.A. General Villegas. Memoria Técnica 2007-2008, pp. 38-40.

Álvarez, R.; Steinbach, H.S.; Bauschen, B.; Enjalbert, J.N. 2006. Variabilidad espacial de propiedades de los suelos de la pampa ondulada: efecto sobre el número de submuestras a tomar para el diagnóstico de fertilidad. *En*: XVI Congreso Argentino de Ciencia del Suelo. Paraná, Argentina.

Andrade, F.H.; Gardiol, J.1995. Sequía y producción de los cultivos de maíz, girasol y soja. Boletín Técnico n° 132. INTA, E.E.A. Balcarce. 23 p.

Andrade, F.H.; Ferreiro, M. 1996. Reproductive growth of maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Res.* 48: pp.155-165.

Andrade, F.H.; Sadras, J.O. 2000. Efecto de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. *En*: Andrade, F.H.; Sadras, J.O. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Balcarce: INTA/Facultad de Ciencias Agrarias, UNMP. pp.89-193 y pp.173-206.

Andrade, F.; Cirilo, A.; Uhart, S.; Otegui, M. 1996. Requerimientos hídricos. *En*: A Andrade, F.; Cirilo, A.; Uhart, S.; Otegui, M. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce: La Barrosa. pp. 133 y 292.

Andriani, J.M.; Andrade, F.H.; Sero, E.E.; Dardanelli, J.L. 1991. Water deficits during reproductive growth of soybeans. I. Their effects on dry matter accumulation, seed yield and yield components. *In: Agronomías*, 11 (9) : pp.737-746.

Ayers, P.D.; Perumpral J.U. 1982. Moisture and density effect on cone index. *Trans. ASAE* 25 (5) : pp. 1169-1172.

Baccini, J.A.; Bodga, N.A.; Darwich, N.A.; de Dios, M.A.; Salaberry, T.1980. Efecto de la época y densidad de siembra sobre el rendimiento de híbridos de maíz del tipo duro, dentado y sedimentado. *En: AIANBA (ed.) Actas II Congreso Nacional de Maíz*. pp. 249-271.

Bacigaluppo, S.; Andreani, J.; Malaespina, A. 2000. Disponibilidad y consumo de agua en un cultivo de maíz en dos sistemas agrícolas. *En: Para mejorar la producción*, nº13. Oliveros: INTA/SAGPyA. pp. 45-50.

Bagnato, R.; Álvarez, C.; Scianca, C.; Barraco, M.; Justo, C. 2010. Productividad de sorgo y soja en suelos con limitantes en su perfil. *En: INTA, E.E.A. General Villegas. Memoria técnica 2009-2010*, pp. 52-55.

Barraco, M. 2009. Productividad de soja (*Glycine max* L. Merrill) según propiedades edáficas de Hapludoles de la región de la pampa arenosa. Tesis. Maestría en Ciencias del Suelo. Buenos Aires: UBA. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados Alberto Soriano. 113 p.

Barraco, M.; Díaz-Zorita, M. 2005. Momento de fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en Hapludoles típicos. *En: CI Suelo (Argentina)*, 23 (2) : pp.197-203.

Barraco, M.; Scianca, C.; Lardone, A. 2011. Fertilización con nitrógeno en maíces y sorgo tardío. *En: INTA, E.E.A. General Villegas. Memoria Técnica 2010-2011*, pp. 22-23.

Barraco, M.; Díaz-Zorita, M.; Brambilla, M.; Duarte, G. 2007. Productividad de soja en Hapludoles típicos y en Hapludoles énticos de la Pampa Arenosa. *En: INTA, E.E.A. General Villegas. Memoria Técnica 2006-2007*, pp. 45-47.

Barraco, M.; Scianca, C.; Álvarez, C.; Justo, C. 2010a. Disponibilidad de agua en el suelo para cultivos de trigo: relevamiento de lotes (campana 2010). *En*: INTA, E.E.A. General Villegas. Memoria Técnica 2009-2010. pp. 31-35.

Barraco, M.; Díaz-Zorita, M.; Scianca, C.; Álvarez, C. 2010b. Productividad de soja en ambientes con presencia de sales en superficie. *En*: INTA, E.E.A. General Villegas. Memoria Técnica 2009-2010, pp. 45-48.

Below, F. 2002. Fisiología, Nutricao e abubaco nitrogenada do milho. *Informacoes Agronomicas. Potafos 99*: pp. 7-12.

Blake, G.R.; Hartge, K.H. 1986. Bulk density. *In*: Klute, A. (ed.) *Methods of soil analysis, Part 1*. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, Agronomy 9 : pp.363-375.

Blanchet, R.; Texier, V.; Gelfi, N.; Viguier, P. 1990. Articulations des divers' processus d'adaptation a la sécheresse at comportements globaux du tournesol. *En*: Blanchet, R.; Merrien, A. (eds.). *Le tournesol et l'eau*. CETIOM. Paris, Francia.

Bravo O.; Blanco, M.; Amiotti, N. 2004. Atributos que definen la segregación de taxas en la transición semiárida-árida Argentina. XIX Congreso Argentino Ciencia del Suelo, Paraná.

Bray, R.H.; Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *En*: *Soil Science* 59 ; pp. 39-45.

Bono, A.A. 2010. Flujos de carbono y nitrógeno bajo distintos sistemas de labranza en la región semiárida pampeana. Tesis de Doctorado de la Universidad de Buenos Aires en el área de Ciencias Agropecuarias otorgado por Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados. pp. 84.

Calviño, P.A.; Andrade, F.H.; Sadras, V.O. 2003. Maize yield as affected by water availability, soil depth, and crop management. *J. 9 5 pp.*:275–281.

Cárcova, J.; Maddonni, G.A.; Ghera, C.M. 2000. Long-term cropping effects on maize: crop evapotranspiration and grain yield. *Agron. Journal* 92: pp.1256-1265.

Cassman, K.G.; Dobermann, A; Walters, D.T. 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio* 31, pp.132-140.

Caviglia, O.P.; Papparotti, O.F.1999 "Maíz en SD". Jornadas de intercambio técnico de maíz. Agua. APRESID. pp. 19-33.

Caviglia, O.P.; Sadras, V.O. 2001. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water and radiation use efficiency of wheat. *Field Crops Res.* 69: pp.259-266.

Caviglia O.; Rizzalli, R.H.; Van Opstal, N.V.; Barbieri, P.; Melchiori, R.J.M; Cerrudo, A.; Gregorutti, V.C; Monzón, J.P.; Barbagelata, P.A.; Martínez, J.J.; García, F.O.; Andrade, F.H. 2012. Productividad y eficiencia en el uso de agua y nitrógeno en sistemas intensificados. International Plant Nutrition Institute. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (IACS) Nº 7 : pp. 6-10.

Cerana, J.; Wilson, M.; Pozzolo, O.; De Battista, J.J.; Rivarola, S.; Díaz, E. 2005. Relaciones matemáticas entre la resistencia mecánica a la penetración y el contenido hídrico en un Vertisol. Estudios de la zona no saturada del suelo. *En: Samper Calvete, F.J.; Paz González, A. 2005. Estudios de la zona no saturada del suelo. Vol.VII : pp.159-163.*

Cox, X.J.; Jolliff, W.J. 1986. Growth and yield of sunflower and soybean under soil water deficits. *In: Agronomy Journal, Madison, v. 78 : pp. 226-230.*

Dardanelli, J.; Collino, D.; Otegui, M.E.; Sadras, V. 2004. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción. *En: Satorre, E.H.; Benech Arnold, R.L.; Slafer, G.A.; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. Producción de granos: Bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, FAUBA. pp. 377-434.*

Delpech, J.M.; Darwich, N.A. 1980. Cuantificación del efecto del estrés hídrico sobre el rendimiento del maíz. *En: AIANBA (ed.). Actas IIº Congreso Nacional del Maíz. pp. 220-229.*

Díaz-Zorita, M. 1995. Caracterización agroecológica del área de influencia de la Estación Experimental Agropecuaria del INTA "General Villegas" (inédito).

Díaz-Zorita, M. 1997. Propiedades edáficas y sostenibilidad de los sistemas de producción en la región noroeste bonaerense. Publicación técnica nº 21. INTA, E.E.A., General Villegas.

Díaz-Zorita, M.; Duarte, D.A. 1997. Fertilización nitrogenada de maíz en el oeste bonaerense. *En: Actas VI Congreso de Maíz AINBA*. Pergamino, Argentina.

Díaz-Zorita, M.; Zamolinsky, A.; Zaniboni, M. 1993. Productividad de pasturas de alfalfa en dos suelos de la región noroeste bonaerense. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (Ed.). *En: Actas XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*.

Díaz-Zorita, M., Buschiazzo, D.E.; Peinemann, N. 1999. Soil organic matter and wheat productivity in the semiarid Argentine pampas. *Agronomy Journal*.

Díaz-Zorita, M.; Barraco, M.; Álvarez, C. 2004. Efectos de doce años de labranzas en un Hapludol del noroeste de Buenos Aires, Argentina. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo (Ed.). *En: Ciencia del Suelo* 22 (1) 2004 : pp.11-18

Dibb, D.W.; Roberts, T.L.; Stewart, W.M. 2004. Los fertilizantes y la agricultura mundial. *En: Revista Técnica de la Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa*. Diciembre/2004. pp.17-29.

Di Rienzo J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M.G.; González, L.; Tablada, M.; Robledo, C. W. 2008. *InfoStat, versión 2008*, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Dobermann, A.; Ferguson, R.B.; Hergert, G.W.; Shapiro, C.A.; Tarkalson, D.; Walters, D.T.; Wortmann, C.S. 2006. Nitrogen response in high-yielding corn systems of Nebraska. pp. 50-59. *In: Schlegel, A.J. (Ed.). 2006 Proceedings of the Great Plains Soil Fertility Conference, Denver, CO, Kansas State University, Manhattan, KS, USA.*

Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. Serie Riego y Drenaje. FAO Nº 24. Roma.

Doorenbos, J.; Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. FAO irrigation and drainage paper N° 33.

Duarte, G. 2002. Modelos de producción de maíz en la región de la Pampa Arenosa. *En*: Satorre, E.H. (Ed.) Guía Dekalb del cultivo de maíz. Buenos Aires: Servicios y Marketing Agropecuario. pp. 220-221.

Echarte, L.; Della Maggiora, A.I.; Irigoyen, A.I.; Dosio, J.A. 1998. Disminución del rendimiento en el cultivo de maíz debida a los déficits hídricos ocurridos en la localidad de Balcarce. *En*: Actas X Congreso Brasileiro de Meteorología y VIII Congreso de la Federación Latinoamericana e Ibérica de Sociedades de Meteorología. Editadas en CD: 4 p. Brasilia, 26 a 30 de octubre de 1998.

Eck, H.V. 1986. Effects of water deficit on yield, yield components, and water use efficiency of irrigated corn. *In* : Agron. J., 78 , pp.1035-1040.

Ehlers, W.; Köpke, U.; Hesse, F.; Bohm, W. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *In*: Soil & Tillage Research, v.3, pp. 261-275.

Engelstad, O.; Shrader, W.; Dumenil, L. 1961. The effect of surface soil thickness on corn yields. *Soil Sci Soc Am Proc*.

Ernst, O.; Siri, G.; Ackerman, P.; Gasparri, N. 2012. Balance Aparente de N, P y K en función de la intensidad de uso del suelo por la agricultura. *En*: Cangüe Digital Segunda Época N° 32. Estación Experimental "Dr. Mano A. Cassinoni". Facultad de Agronomía, Paysandú. Universidad de la República.

Ferrari, M.C.; Ostojic, J.J.; Ferraris, G.N.; Ventimiglia, L.A.; Carta, H.C.; Rillo, S.R. 2001. Momento de aplicación de fertilizante nitrogenado en maíz de siembra directa. *En*: Actas VII Congreso Nacional de Maíz. Pergamino 7 al 9 de noviembre de 2001.

Frederick, J.R.; Hesketh, J.D.; Peters, D.B.; y Below, F.E. 1989. Yield and reproductive trait responses of maize hybrids to drought stress. *Maydica* 34: pp. 319-328.

Frye, W.W.; Murdock, L.M.; Blevins, R.L. 1983. Corn yield-fragipan depth relations on a Zanesville. Soil. *In: Soil Science Society of America Journal* 47(5) : pp.1043-1045

Fontana F.; Paturlane, M.; Saks, M.; Quiroga, A. 2006. Efecto del suelo sobre propiedades edáficas y rendimiento de trigo en la región semiárida pampeana. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

Fontanetto, H.; Vivas, H.; Keller, O. 2001. Eficiencia del uso del nitrógeno en maíz con siembra directa. Efecto de la densidad de siembra. Anuario 2001 Agronomía. EEA INTA Rafaela.

Gardner, W.H. 1986. Water content. *In: Klute, A. (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, Agronomy 9 ; pp. 493-544.*

Glinski J.; Lipiec J. 1990. Soil Physical Conditions and Plant Roots. CRC Press, Inc. Boca Raton.

Gregoret, M.C.; Dardanelli, J.; Bongiovanni, R.; Días-Zorita, M. 2006. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un Haplustol. *En: Ciencia Suelo (Argentina)* 24 (2) : pp.147-159.

Gómez, P. 1991. Disponibilidad hídrica y fecha de siembra como factores determinantes del rendimiento en maíz. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce. pp. 39.

González Montaner, J.H.; Maddonni, G.A.; Di Napoli, M.R. 1997. Modeling grain yield and grain response to nitrogen in spring wheat crops in the Argentinean southern pampas. *Field Crop Research* 51: pp. 241-252.

Gupta, S.C.; Allmaras, R.R. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6: pp. 65-100.

Jarsún, B.; Gorgas, A.; Zamora, E.; Bosnero, E.; Lovera, E.; Tassile, J.L. 2003. Suelos- Nivel de reconocimiento 1:500.000. *En: J. Gorgas t J.L. Tassile (eds.), Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba. Córdoba (Argentina),* 23-60.

Justo C.; Scianca, C. 2011. Agricultura por ambientes. Estrategias de manejo de maíz en suelos con diferente aptitud productiva. *En: INTA, E.E.A. General Villegas, Memoria Técnica 2010-2011*, pp. 11-14

Ladha, J.K.; Pathak, H.; Krupnik, T.J.; Six, J ; van Kessel, C. 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. *Advances in Agronomy Vol. 87*: pp. 85-176.

Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *In: Advances in Soil Science. Vol. I. Edited by B.A. Stewart. Springer-Verlag New York, inc. 277-294 pp.*

Lopez, M.; Arrue, J. 1997. Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage in semi-arid region of Spain. *En: Soil and Tillage Research 44*, pp. 35-54.

López de Sabando, M.J. 2005. Tesis Propiedades de suelo y producción de trigo según estrategias de delimitación de zonas de manejo. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

Lorenzatti, S. 2001. El Cultivo de maíz en siembra directa. AAPRESID.

Maddonni, G. 2009. Fecha de siembra como estrategia de manejo de agua en maíz. *En: Actas XVII Congreso Aapresid. Rosario, Santa Fe, 19 al 21 de agosto de 2009. Rosario: Aapresid. p. 195.*

Martínez, F.; Cordone, G.; Buschittari, D. 2006. Alternativas de manejo según la capacidad productiva del suelo. Combinación del híbrido y la dosis de N. *En: Para Mejorar la Producción nº32. E.E.A. Oliveros INTA pp.103-105.*

McCune, B.; Mefford, M.J. 2011. PC-ORD. Multivariate Analysis of Ecological Data. Version 6.0 MjM Software, Gleneden Beach, Oregon, U.S.A.

Micucci, F.; Álvarez, C. 2003. El agua en los sistemas extensivos. III. Impacto de las prácticas de manejo sobre la eficiencia de uso del agua. INPOFOS Archivo Agronómico N°8. pp. 1-4.

Miranda, W.; Cirilo, A.; Barraco, M.; Scianca, C.; Lardone, A.; Justo, C. 2012. Análisis de estrategias de manejo y factibilidad climática de maíces de primera y tardío en el noroeste de Buenos Aires. *En*: INTA, E.E.A. General Villegas, Memoria Técnica 2011-12. pp. 100-104.

Nelson, D.W.; Sommers, L.E.1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. *En*: Page AL, Miller DH, DR (Keeney Eds) Methods of Soil Analysis, ASA, SSSA, Madison, Wis., pp. 539-579

Octave 3.0.1. 2008. Disponible en <http://www.gnu.org/software/octave> (Fecha de acceso: 18 de Julio 2012).

O' Sullivan, M.; Dickson, J.; Cambell, D. 1987. Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. *En*: European Journal of Soil Science 38, pp.137-148.

Otegui M.; Kantolic, A.; Miralles, D. 2006. Aspectos clave de la estructura espacial y temporal de los cultivos: el uso de los recursos. Congreso "Mundo Agro 2006". Buenos Aires, 22 y 23 de junio 2006.

Otegui, M. E. 1992. Incidencia de una sequía alrededor de antesis en el cultivo de maíz. Consumo de agua, producción de materia seca y determinación del rendimiento. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce. Buenos Aires. Argentina. p. 93

Otegui, M.E.; Maddonni, G.; Ruiz, R. 1996. Desarrollo, crecimiento y generación del rendimiento en maíz. *En*: Cuaderno de Actualización Técnica "Maíz". AACREA. Capítulo 1: pp.8-18.

Otegui, M.E.; Mercau, J.; Menéndez, F.J. 2002. Estrategias de manejo para la producción de maíz tardío y de segunda. *En: Satorre, E.H. (Ed.) Guía Dekalb del cultivo de maíz. Buenos Aires: Servicios y Marketing Agropecuario. pp. 172-178.*

Otegui, M.E.; Nicolini, M.G.; Ruiz, R.A.; Dodds, P. 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *In: Agronomy Journal, 87: pp.29-33.*

Pandey, R.K.; Herrera, E.A.; Pendleton, J.W. 1984. Drought response of grain legumes under irrigation gradient: II. Plant water status and canopy temperature. *In: Agronomy Journal, Madison, v. 76, n.3, pp.553-557.*

Paredes, D.; D'Amico, J.P.; Roba, M.; Romito, A.; Floreán, R.; Cura, J.; Tesouro, M. 2009. Calibración del índice de cono de un suelo Argiudol vértico por humedad y profundidad. p. 479-486. *En: Di Leo, N.; Montico, S.; Nardón, G. (eds.). X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del Mercosur. 1 al 4 de septiembre de 2009. Universidad Nacional de Rosario, Ciudad de Rosario, Sta. Fe, Argentina.*

Pedrol, H.; Castellarín, J.; Salvagiotti, F. 2004. El maíz en el centro sur de Santa Fe. *En: Para mejorar la producción N° 26. EEA INTA Oliveros. pp. 8-15*

Pedrol, H.; Cartellarín, J.; Ferraguti, F.; Rosso, O. 2008. Respuesta a la fertilización nitrogenada y eficiencia en el uso del agua en el cultivo de maíz según nivel hídrico. International Plant Nutrition Institute. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica (IACS) N° 40. pp. 17-20.*

Pérez, L. A. 1994. Manejo del cultivo de soja en el oeste bonaerense. EEA INTA General Villegas. Informe anual del plan de trabajo.

Pérez, L.; Pérez, M.; Scianca, C. 2011. Comportamiento de cultivares de soja campaña 2010/11. *En: INTA, E.E.A. General Villegas, Memoria Técnica 2010-11. pp. 65-70.*

Perroux, K.M.; White, I. 1988. Designs for disc permeameters. *In: Soil Science Society of America Journal 52: pp. 1205-1215*

Piekielek, W. P.; Fox, R.H.; Toth, J.D.; Kirsten, E.M.. 1995. Use of a chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. *Agronomy Journal*, 87: pp. 403-408.

Pieri, C. 1995. Long-Term soil management experiments in semiarid Francophone Africa. *Adv. Soil Sci.*, 225-264 pp.

Proot, A.; Barraco, M.; Scianca, C.; Álvarez, C. 2011. Efecto de la fertilización nitrogenada y de la densidad de siembra sobre los rendimientos y la eficiencia de uso de agua en maíces tardíos en la pampa arenosa. *En: INTA, E.E.A. General Villegas, Memoria técnica 2010-2011.* pp. 15-19.

Puricelli, C.; Puricelli, M.; Kruger, H. 1997. Profundidad útil del suelo y rendimiento del trigo. *Boletín técnico nº 14.* INTA, E.E.A. Bordenave.

Quiroga, A.; Bono, A. 2012. Manual de fertilidad y evaluación de suelos. Edición 2012. EEA INTA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas"

Quiroga, A.; Ljarraga, B.; Fernández, R.; Funaro, D. 2005. Aspectos del manejo del agua en sistemas mixtos de las regiones semiárida y subhúmeda pampeana. *En: Indicadores de calidad física de suelos. Boletín técnico nº 4.* INTA, E.E.A. General Villegas. pp. 19-26

Quiroga, A.; Funaro, D.; Noellemeyer, E.; Peinemann, N. 2006a. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research* 90 : pp. 63–68.

Quiroga, A.; Saks, M.; Funaro, D.; Fernández, R. 2006b. Aspectos del manejo del agua y la nutrición nitrogenada de maíz en la región semiárida y subhúmeda pampeana. XX Congreso Arg. Ciencia del Suelo, Salta.

Rasmussen, P.A.; Rickman, R.W.; Klepper, B.L. 1997. Residue and fertility effects on yield of no tillage wheat. *Agronomy Journal* 89. pp. 563-567.

Rhoads, F.M.; Bennett, J.M. 1990. Corn. *In: Stewart, B.A. ; Nielsen, D.R. (Eds). Agronomy* Nº 30. Madison USA. pp. 569-590.

Richards, L.A. 1965. Physical condition of water in soil. In C.A. Black et al (ed.) Methods of soil analysis. Part. Agron. Monogr. 9 ASA. Madison. WI. pp. 128-152.

Riquier, J.; Bramao, D.; Cornet, J. 1970. A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity. FAO Soil Res.

Ritchie, S.W.; Hanway, J.J. 1982. How a corn plant develops. Iowa: Iowa State Univ. Special Report 48.

Rivetti, A. R. 2006. Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Rio Cuarto, Córdoba, Argentina. I Rendimiento en grano de maíz y sus componentes. *En: Revista FCA UN Cuyo*. Tomo XXXVIII. Nº 2 : pp.25-36.

Ruffo, M; Parsons, A. 2004. Cultivos de cobertura en sistemas agrícolas. *En: Informaciones Agronómicas del Cono Sur* Nº21: pp.13-16.

Sadras V.O.; Calviño P.A. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, Maize, sunflower, and wheat. *Agron. J.* 93: pp. 577-583.

SAGYP-INTA. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Escala 1:500000. Proyecto PNUD ARG 85/019, editado por Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. CIRN. Instituto de Evaluación de Tierras.

Sainz Rosas, H.; Echeverría, H.E. 1998. Relación entre las lecturas del medidor de clorofila (Minolta SPAD 502) en distintos estadios del ciclo del cultivo de maíz y el rendimiento en grano. *En: Rev. Fac. Agron., La Plata* 103 (1): pp.37-44.

Satorre. 2003. Las posibilidades ambientales y tecnológicas de la pradera pampeana para la producción de granos. Las Ciento y Una "hacia los 100 millones de toneladas de granos y la exportación de un millón de toneladas de carne". Bolsa de Cereales de Buenos Aires. (Ed.)

Scianca, C.; Barraco, M.; Álvarez, C. 2010. Calculo de la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones. *En: INTA, E.E.A. General Villegas, Memoria Técnica 2009-2010*, pp. 26-30.

Shafi, M.; Bakht, J.; Tariq Jan, M.; Shah, Z. 2006. Soil C and N dynamics and maize (*Zea may L.*) yield as affected by cropping systems and residue management in North-Western Pakistan. *Soil & Tillage Research* 94. pp. 520-529.

Shaw, R.H. 1974. A weighted moisture-stress index for corn in Iowa. *Iowa State Journal of Research* 49 (2): pp.101-114.

Siquiera, G.; Grego, R.G.; Vieira, S.; Ceddia; M. 2006. Variabilidad espacial y temporal de la permeabilidad del suelo en el cultivo de Triticale en sistemas de siembra directa. *En: Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Salta. Argentina. pp. 179.

Soriano, A. 1980. Ecofisiología del stress en las plantas. *Rev. Facultad de Agronomía*, 1 (1): 1-12.

Taboada, M.; Micucci, F.G. 2002. Fertilidad Física de los Suelos. Facultad de Agronomía, UBA. Editorial: Facultad de Agronomía.

Taylor, H.M.; Burnet, E. 1964. Influence of soil strength on the root – growth habits of plants. *Soil Sci.* 98: pp.174-180.

Tejada, M.; González, J.L. 2003. Effects of the application of a compost originating from crushed cotton gin residues on wheat yield under dry land conditions. *Eur. J. Agronomy* 19. pp. 357-368.

Thompson, A.; Gantzer, C.; Anderson, S. 1991. Topsoil depth, fertility, water management, and weather influences on yield. *Soil Sci Soc of Am Jour*

Totis de Zeljkovich, L.C.; Rebella, C.M. 1980. Necesidades de agua de un cultivo de maíz en la región de Pergamino. AIANBA (ed.). *En: Actas del II Congreso Nacional de Maíz*. pp. 211-219.

Uhart, S.A.; Andrade, F.H. 1995. Nitrogen deficiency in maize: II. Carbon nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. *Crop Science* 35: pp. 1384-1389.

USDA SCS (United States Department of Agriculture Soil Conservation Service). 1985. National Engineering Handbook, Section 4. Hydrology U.S. Government. Printing Office. Washington DC.

Varela, M.F.; Fernández, P.; Álvarez, C.; Scianca, C.; Rubio, G.; Taboada, M. 2010. Propiedades físicas que varían por la incorporación de cultivos de cobertura en Hapludoles franco arenosos. *En: INT, E.E.A. General Villegas, Memoria Técnica 2009-2010*, pp. 17-19.

Vieira, S.R.; Grego, C.R.; Siqueira, G.M.; Miguel, F.M.; Pavlu, F.A. 2006. Variabilidad espacial del almacenamiento de agua del suelo bajo siembra directa *En: Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta. Argentina. p. 178.*

Walkley, A.; Black, T.A. 1934. An examination of the Degtjaerff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *En: Soil Science 37*, pp. 29-38.

West, P.; Ramachandran, T. 1966. Spectrophotometric of nitrate using chromotropic acid. *Anal. Chim. Acta 35*: pp. 317-324.

Witt, C.; Pasuquin, J.M.; Dobermann, A. 2006. Towards a site-specific nutrient management approach for maize in Asia. *Better Crops 90*, pp.28-31.

Zubillaga, M.M.; Carmona, M.; Latorre, A.; Falcon, M.; Barros, J.M. 2006. Estructura espacial de variables edáficas a nivel de lote en Vedia. *CD-R XX Congreso Argentina de la Ciencia de Suelo, Salta, Argentina.*

ANEXO

I. Esquemas de los ensayos establecidos.

A. Plano del ensayo del año I. Diseño en Parcelas Divididas Completamente Aleatorizado. Parcela principal: tipo de suelo (Hapludol típico y Hapludol thapto-árgico) y subparcela: tratamientos de fertilización nitrogenada (T0: 0N y T1: 200N).

B. Plano del ensayo del año II. Diseño en Parcelas Divididas Completamente Aleatorizadas. Parcela Principal: tipo de suelo (Hapludol típico y Hapludol thapto-árgico); subparcelas: fecha de siembra (FS 1: óptima y FS 2: tardía) y sub-subparcela: tratamientos de fertilización nitrogenada (T0: 0N y T1: 200N).

A

Año I	
T1	T0
T0	T0
T1	T1
T1	T0
T0	T1
T0	T1

B

Año II			
T1	T0	T0	T0
T1	T0	T1	T1
T0	T1	T0	T0
T1	T0	T1	T1
T0	T1	T0	T1
T1	T0	T1	T0

II. Precipitaciones históricas del partido de Lincoln. Serie 1969-2011.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
1969	31	123	241	113	95	61	10	0	33	92	149	44	992
1970	169	67	188	46	17	7	4	0	87	113	53	88	839
1971	251	106	175	93	44	31	62	37	89	47	42	41	1018
1972	102	33	94	32	18	59	13	83	105	80	85	114,5	818,5
1973	221	120	203	117	30	197	37,5	15	20	134	60	18	1172,5
1974	192	85	77	7	128	10	27	56	25,5	73	48	95	823,5
1975	106	319	374	112	79	56	4	34	41	62	102,5	24	1313,5
1976	155	276,5	71	87	67	8	30	112	14	137	94	190	1241,5
1977	84	206	103,5	7	32	34	28	25	23	109	91,5	113	856
1978	125	95	202	81	44	9	48	5	195	94	101	128	1127
1979	180	63	86	98	36	51	32	31	19	65	144,5	69,5	875
1980	34,5	91	181	285	13,5	26	31,5	7,9	13,5	126,6	91,5	69,6	971,6
1981	273	122	71,1	80,5	33,8	24,6	4,5	0	28	44,8	123,5	41,5	847,3
1982	159,4	158,5	140	111	45	72,5	19	0,6	159,7	62	60,8	115,5	1104
1983	103,9	116	83	121	133,5	10	1	67,1	0	178	62	136,9	1012,4
1984	116	250	121	33	31	41	13	4,8	82	76,5	63	41	872,3
1985	105	68	27	87	3	2	69	17	98	195	178	62	911
1986	195,5	48	69	87	57	2	0	36	49	143	104,5	30,5	821,5
1987	85,5	272	197	20,5	26	8	101,5	39	0	81	274	116	1220,5
1988	189	19	366	52	1	3	15	4	74	71	46	106	946
1989	89	99	146,5	3	22	79	41	30,5	24	42	106	212	894
1990	89	123	122	73	61	2	47	22	65	166	138	93	1001
1991	148	122	139,5	112,5	49	104,5	34,5	46	73	126,5	100,5	204	1260
1992	136,5	17	139	23,5	31	10	33,5	73	44	49	155,5	111	823
1993	170	122,5	82	309	156	57,5	0	54,5	79	138	176	81	1425,5
1994	93,5	77	50,5	57,5	73,2	35,3	36,5	28,5	53	213	11,2	100	829,2
1995	59,5	48	190	216	95	16	7	4,5	12,5	89,5	77	112	927
1996	129,1	100	107	166	38	0	9	25,5	27,5	130,7	197	101	1030,8
1997	177,5	73,5	108,5	87,5	30,8	114	12	24	22,5	178,5	130,5	198,3	1157,6
1998	169	160	40,7	179,3	50,5	7,5	46,5	10	15,2	65	118,8	148,8	1011,3
1999	135	76	276	31,5	28,5	12,5	30,9	22	72,3	107,2	53,9	88	933,8
2000	74	79	91,2	181,5	248,2	19,2	3	11,1	22,3	210	148,5	6,4	1094,4
2001	142	51,5	378	102,6	83,7	37,2	10,2	104	78,5	229,5	94,2	30,5	1341,9
2002	125,5	32,4	424	55,5	92	0,7	18,5	93,5	34	126	214,6	183,8	1400,5
2003	41,8	197	56	175,5	29	17	115	22	24,7	64,3	100	80,9	923,2
2004	184,8	20,5	33,4	158	68	0,8	71,1	51,5	1,4	85	110,1	155,5	940,1
2005	220	82,5	162,5	35,3	13,4	11	43,5	60,5	76,5	40	112	65,5	922,7
2006	193,5	92	113	75,5	10	48,7	12,5	2,5	29	191,5	114,4	158	1040,6
2007	110,5	229	188,5	35,5	12,5	15,5	2,6	0,5	93,3	89,5	45,5	94,3	917,2
2008	109,5	123	83,9	1	1	13	38	1	38,5	102,3	59	112,3	682,5
2009	58,3	70,8	15,8	88,5	33,5	5	37,4	14	121,3	46	108,8	148	747,4
2010	137	336,5	51	25,5	55,5	30,5	23,7	0	123	45	16,5	46	890,2
2011	141	51	51	132,9	33,9	5	9,5	10	14	98	88,5	22	656,8

- III. Temperaturas medias mensuales (°C) de los dos años evaluados y de la serie histórica (1974-2010) registradas en la Estación Meteorológica en la EEA INTA General Villegas. FUENTE: INTA General Villegas

	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	J
Prom.1974-2010	8,3	10,2	12,7	16,3	19,3	22,0	23,1	21,9	20,0	15,6	12,2	8,8
año I	8,2	14,2	12,3	18,0	20,6	21,9	24,2	22,2	21,8	15,7	13,1	10,0
año II	8,5	10,1	15,5	16,7	22,4	24,0	25,7	22,5	20,6	16,7	15,0	9,5

- IV. Contenido de agua total (AT) y agua disponible (AD) (mm) en los suelos Hapludol típico y Hapludol thapto-árgico para los tres ciclos de producción (I, II, III) y en tres momentos del cultivo.

	CP	Hapludol típico		Hapludol thapto-árgico	
		AT	AD	AT	AD
siembra	I	271	134	185	44
	II	317	180	219	78
	III	388	251	228	86
p. crítico	I	332	196	162	21
	II	224	88	170	28
	III	185	48	s/d	s/d
cosecha	I	288	151	151	10
	II	295	159	161	20
	III	314	177	s/d	s/d

- V. Contenido de agua total (AT) y agua disponible (AD) (mm) comparando tipos de suelos en tres momentos del ciclo del cultivo. HT: Hapludol típico; HTA: Hapludol thapto-árgico.

		AT	AD
		siembra	HT
	HTA	210	69
p. crítico	HT	262	126
	HTA	170	29
cosecha	HT	294	157
	HTA	157	16

- VI. Contenido de agua total (AT) y agua disponible (AD) (mm) comparando los dos niveles de fertilización nitrogenada en tres momentos del ciclo del cultivo.

		Hapludol típico		Hapludol thapto-árgico	
		AT	AD	AT	AD
siembra		323	187	210	69
p. crítico	0N	286	150	163	21
	200N	258	121	164	23
cosecha	0N	297	161	160	19
	200N	291	154	156	15

- VII. Usos Consuntivos (UC) y Eficiencias de Uso de Agua para la producción de materia seca (EUA MS) y grano (EUA G) en los dos suelos y para los tres ciclos de producción. UC s-fl: UC entre siembra y floración; UC fl-mf: UC entre floración y madurez fisiológica; UC T: UC total del ciclo.

	CP	UC s-fl	UC fl-mf	UC T	EUA MS	EUA G
Hapludol típico	I	234,8 b	260,3 b	496,1 b	60,71 a	16,13 a
	II	242,3 b	483,5 a	681,7 a	28,22 b	8,19 b
	III	415,0 a	284,5 b	690,5 a	16,59 b	12,31 ab
Hapludol thapto-árgico	I	325,0 a	243,4 b	555,2 b	12,73 a	36,04 a
	II	176,4 b	563,7 a	716,6 a	8,36 b	33,37 a
	III	s/d	s/d	s/d	s/d	s/d

Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

- VIII. Usos Consuntivos (UC) y Eficiencias de Uso de Agua para la producción de materia seca (EUA MS) y grano (EUA G) en los dos suelos. UC s-fl: UC entre siembra y floración; UC fl-mf: UC entre floración y madurez fisiológica; UC T: UC total del ciclo.

	UC s-fl	UC fl-mf	UC T	EUA MS	EUA G
HT	281,7 a	322,1 a	591,0 a	41,56 a	13,19 a
HTA	275,4 a	350,2 a	609,0 a	35,15 a	11,27 a

Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

- IX. Usos Consuntivos (UC) y Eficiencias de Uso de Agua para la producción de materia seca (EUA MS) y grano (EUA G) en los dos suelos y para los dos niveles de fertilización aplicados. UC s-fl: UC entre siembra y floración; UC fl-mf: UC entre floración y madurez fisiológica; UC T: UC total del ciclo.

		UC s-fl	UC fl-mf	UC T	EUA MS	EUA G
HT	0N	270,1 a	324,1 a	587,5 a	34,04 a	10,23 b
	200N	293,3 a	320,2 a	594,8 a	49,08 a	16,15 a
HTA	0N	284,5 a	338,5 a	602,0 a	28,07 a	8,82 b
	200N	266,3 a	361,8 a	616,1 a	42,23 a	13,73 ab

Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

- X. Contenido de nitrógeno del suelo a cosecha de los cultivos (kg N ha^{-1})

	cosecha			
	año 1		año 2	
	0N	200N	0N	200N
Hapludol típico	13,4 a	16,5 a	70,6 a	69,8 a
Hapludol thapto-árgico	23,3 a	19,9 a	63,1 ab	54,2 b

- XI. Balance aparente de nitrógeno (kg N ha^{-1}).

Año	Suelos	Dosis N	BAN
I	Hapludol típico	0N	-64,8
		200N	16,2
	Hapludol thapto-árgico	0N	0,2
		200N	63,6
II	Hapludol típico	0N	29,7
		200N	182,5
	Hapludol thapto-árgico	0N	73,1
		200N	261,0

- XII. Eficiencias de Uso de Nitrógeno. HT: Hapludol típico, HTA: Hapludol thapto-árgico, CP: Ciclo de producción, FPP_N: Factor parcial de productividad, EA_N: Eficiencia agronómica, ER_N: Eficiencia de recuperación del fertilizante; EF_N: Eficiencia fisiológica.

		CP I	CP II	CP III	<i>promedio año</i>
FPP _N	HT	52,7	26,4	50,5	43,2 a
	HTA	43,8	34,3	s/d	39,1 a
<i>promedio suelos</i>		48,25 a	30,35 b	50,5 a	
EA _N	HT	32,22	2,5	16,28	20,8 a
	HTA	20,25	16,6	s/d	19,0 a
<i>promedio suelos</i>		26,24 a	9,54 b	16,28 ab	
ER _N	HT	0,58	0,17	0,26	0,34 a
	HTA	0,7	0,02	s/d	0,36 a
<i>promedio suelos</i>		0,64 a	0,09 b	0,26 b	

Letras distintas en los promedios indican diferencias significativas (p<=0,05)

		CP I	CP II	CP III	
EF _N	HT	0	77,8 ab	107 ab	160,1 a a'
		200	56,1 ab	64,8 b	105,1 a
	HTA	0	91,9 a	106,2 ab	137,3 b'
		200	44,5 b	132,6 a	

Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas (p<=0,05)

- XIII. Producción de materia seca del cultivo de maíz en floración (kg MS ha⁻¹).

		dosis N		
Ciclo de Producción	Suelo	0N	200N	<i>promedio entre dosis</i>
CP I	Hapludol típico	11383 bc	16632 a	14008 a
	Hapludol thapto-árgico	8749 c	14196 ab	11472 a
	<i>promedio entre suelos</i>	10066 b	15414 a	
CP II	Hapludol típico	5670 a	7957 a	6814 a
	Hapludol thapto-árgico	5310 a	6385 a	5848 a
	<i>promedio entre suelos</i>	5490 a	7171 a	
CP III	Hapludol típico	5005 a' b	8637 a	6821
	Hapludol thapto-árgico	3781 b'		
	<i>promedio entre suelos</i>	4393		

Letras distintas dentro de cada ciclo de producción indican diferencias significativas (p<=0,05).

XIV. Rendimiento en grano del cultivo de maíz (kg ha⁻¹).

Ciclo de Producción	Suelo	dosis N		<i>promedio entre dosis</i>
		0N	200N	
CP I	Hapludol típico	5473 b	10534 a	8004 a
	Hapludol thapto-árgico	5283 b	8755 ab	7019 a
	<i>promedio entre suelos</i>	5378 b	9644 a	
CP II	Hapludol típico	5869 a	5282 a	5576 a
	Hapludol thapto-árgico	5241 a	6857 a	6049 a
	<i>promedio entre suelos</i>	5555 a	6070 a	
CP III	Hapludol típico	6841 a' b	10097 a	8469
	Hapludol thapto-árgico	4416 b'		
	<i>promedio entre suelos</i>	5629		

Letras distintas dentro de cada ciclo de producción indican diferencias significativas (p<=0,05).

XV. Índice de cosecha del cultivo de maíz.

Ciclo de Producción	Suelo	dosis N		<i>promedio entre dosis</i>
		0N	200N	
CP I	Hapludol típico	0,34 a	0,37 a	0,36 a
	Hapludol thapto-árgico	0,41 a	0,37 a	0,39 a
	<i>promedio entre suelos</i>	0,38 a	0,37 a	
CP II	Hapludol típico	0,51 a	0,40 a	0,45 a
	Hapludol thapto-árgico	0,50 a	0,53 a	0,51 a
	<i>promedio entre suelos</i>	0,50 a	0,46 a	
CP III	Hapludol típico	0,58 a a'	0,54 a	0,56
	Hapludol thapto-árgico	0,54 a a'		
	<i>promedio entre suelos</i>	0,56		

Letras distintas dentro de cada ciclo de producción indican diferencias significativas (p<=0,05).

XVI. Peso de mil granos (PMG) del cultivo de maíz (g).

Ciclo de Producción	Suelo	dosis N		<i>promedio entre dosis</i>
		0N	200N	
CP I	Hapludol típico	270 b	342 a	306 a
	Hapludol thapto-árgico	266 b	264 b	265 b
	<i>promedio entre suelos</i>	268 b	303 a	
CP II	Hapludol típico	321 a	335 a	328 a
	Hapludol thapto-árgico	337 a	333 a	335 a
	<i>promedio entre suelos</i>	329 a	334 a	
CP III	Hapludol típico	321 a' b	337 a	329
	Hapludol thapto-árgico	315 a'		
	<i>promedio entre suelos</i>	318		

Letras distintas dentro de cada ciclo de producción indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

XVII. Número de granos del cultivo de maíz (NG m⁻²).

Ciclo de Producción	Suelo	dosis N		<i>promedio entre dosis</i>
		0N	200N	
CP I	Hapludol típico	2022 b	3094 ab	2558 a
	Hapludol thapto-árgico	1984 b	3298 a	2641 a
	<i>promedio entre suelos</i>	2003 b	3196 a	
CP II	Hapludol típico	1841 a	1574 a	1708 a
	Hapludol thapto-árgico	1541 a	2042 a	1792 a
	<i>promedio entre suelos</i>	1691 a	1808 a	
CP III	Hapludol típico	2131 a' b	2997 a	2564
	Hapludol thapto-árgico	1403 b'		
	<i>promedio entre suelos</i>	1767		

Letras distintas dentro de cada ciclo de producción indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

XVIII. Análisis de componentes principales, mediante PC-ORD, 6.0.

Randomization test requested. 999 runs.

925 = Seed for random number generator.

Cross-products matrix contains CORRELATION COEFFICIENTS among variable
VARIANCE EXTRACTED, FIRST 10 AXES

Broken-stick

AXIS	Eigenvalue	% of Variance	Cum.% of Var.	Eigenvalue
1	7.360	43.297	43.297	3.440
2	3.109	18.289	61.585	2.440
3	2.457	14.454	76.040	1.940
4	1.824	10.728	86.767	1.606
5	1.260	7.409	94.176	1.356
6	0.360	2.117	96.294	1.156
7	0.185	1.087	97.381	0.990
8	0.129	0.757	98.137	0.847
9	0.077	0.454	98.592	0.722
10	0.062	0.367	98.959	0.611

FIRST 6 EIGENVECTORS, scaled to unit length.

These can be used as coordinates in a distance-based biplot, where the distances among objects approximate their Euclidean distances.

Eigenvector

variable	1	2	3	4	5	6
PG	-0.1916	-0.3488	0.3657	-0.0313	0.0908	0.0045
MS	-0.3447	-0.0508	0.0129	-0.1269	-0.1973	-0.0354
Nabs	-0.2955	-0.0835	0.1680	-0.2273	-0.2902	-0.0581
IC	0.2590	-0.1945	0.2590	0.1340	0.3309	-0.1264
PMG	0.1012	-0.4616	-0.0081	-0.1433	0.0755	0.7655
NG	-0.2421	-0.1788	0.4090	-0.0019	0.0370	-0.3518
Ns	0.3167	-0.0691	0.1819	-0.2190	-0.2045	-0.1135
Nc	0.3054	-0.2233	0.0262	-0.0799	-0.2814	-0.0585
ADs	0.0757	-0.4097	-0.2830	0.1866	-0.2870	-0.0987
ADpc	-0.1963	-0.2368	-0.4015	0.1571	0.2120	-0.2108
ADc	-0.0060	-0.3982	-0.2760	0.3545	-0.1795	-0.1852
UC s-fl	0.0291	0.0622	0.3452	0.4832	-0.4239	0.1549
UC fl-mf	0.2298	-0.1503	-0.1245	-0.5054	0.0595	-0.1368
UC T	0.3058	-0.1398	0.1420	-0.1982	-0.1907	-0.2752
EUA G	-0.2784	-0.2669	0.2460	0.0110	0.1709	0.0963
EUA MS	-0.3060	-0.1450	-0.1316	-0.2643	0.0728	-0.1200
EF _N	0.2551	-0.1024	0.1396	0.2347	0.4663	-0.1504

FIRST 6 EIGENVECTORS, each scaled to its standard deviation

These are sometimes called V vectors, and, when applied to PCA of a correlation matrix, are the same as the correlation coefficient between scores for rows in the main matrix and the column variables.

variable	Eigenvector					
	1	2	3	4	5	6
PG	-0.5198	-0.6150	0.5732	-0.0423	0.1019	0.0027
MS	-0.9351	-0.0896	0.0203	-0.1713	-0.2215	-0.0212
Nabs	-0.8017	-0.1472	0.2633	-0.3070	-0.3256	-0.0348
IC	0.7028	-0.3430	0.4060	0.1810	0.3714	-0.0758
PMG	0.2745	-0.8139	-0.0127	-0.1935	0.0847	0.4593
NG	-0.6567	-0.3153	0.6412	-0.0026	0.0415	-0.2111
Ns	0.8593	-0.1218	0.2851	-0.2957	-0.2295	-0.0681
Nc	0.8284	-0.3937	0.0410	-0.1078	-0.3158	-0.0351
ADs	0.2054	-0.7224	-0.4437	0.2520	-0.3221	-0.0592
ADpc	-0.5326	-0.4176	-0.6294	0.2122	0.2380	-0.1265
ADc	-0.0162	-0.7021	-0.4327	0.4787	-0.2015	-0.1111
UC s-fl	0.0788	0.1097	0.5411	0.6525	-0.4757	0.0929
UC fl-mf	0.6234	-0.2651	-0.1952	-0.6825	0.0668	-0.0821
UC T	0.8295	-0.2465	0.2227	-0.2677	-0.2140	-0.1651
EUA G	-0.7552	-0.4706	0.3857	0.0148	0.1918	0.0578
EUA MS	-0.8302	-0.2556	-0.2063	-0.3569	0.0817	-0.0720
EF _N	0.6922	-0.1806	0.2189	0.3170	0.5233	-0.0902

COORDINATES (SCORES) OF puntos

puntos	Axis (Component)					
	1	2	3	4	5	6
1 p1	-2.5760	1.9785	1.5165	-1.1298	-1.1283	-1.2370
2 p2	-1.8971	2.2481	1.3396	0.0840	-0.1106	-0.7656
3 p3	-2.4260	1.4758	1.7961	-0.7731	-0.1619	0.0898
4 p4	-1.1066	2.8597	0.5048	-0.1601	-1.1405	-0.0416
5 p5	1.0298	3.2733	0.7653	1.6919	0.5444	0.1880
6 p6	0.0021	3.3509	-0.3885	0.0154	-0.3339	0.4438
7 p7	-2.8456	1.9312	1.2985	-1.6726	-2.3138	-1.2683
8 p8	-2.2098	0.4812	2.3214	-0.4361	0.5051	0.8359
9 p9	-3.2054	-0.2215	2.6698	-1.1823	-0.2315	0.7011
10 p10	0.5147	2.1112	0.6151	0.2551	-0.3622	1.1939
11 p11	0.7343	1.8573	2.1290	1.9216	1.8716	0.3871
12 p12	0.6428	2.7662	0.3851	0.4751	0.5640	0.4792
13 p13	-2.1498	-0.4441	-2.5906	0.4383	-1.1592	1.7863
14 p14	-3.8339	-2.0429	-0.7709	-0.3651	-0.3412	0.3636
15 p15	-4.6509	-2.7383	0.1911	-0.6465	0.8673	0.3568
16 p16	-1.9882	0.5070	-0.7771	1.2316	0.9279	-0.2935
17 p17	-2.4073	1.3461	-2.9155	1.0703	-0.7720	-0.0101
18 p18	-2.0846	0.4790	-2.8905	0.5602	0.0145	-0.7624
19 p19	-3.4845	-1.8397	0.3093	0.8540	1.2784	-0.2654
20 p20	-5.7891	-3.2679	0.5867	-1.2447	0.9472	-0.2186
21 p21	-4.1506	-2.2609	-0.3640	-0.1429	0.7055	0.2497
22 p22	-1.7007	0.6846	-2.8745	0.6791	0.4130	-0.3297
23 p23	-0.9256	0.2286	-1.5071	1.8038	2.1595	-0.2610
24 p24	-0.9013	1.2036	-2.3096	1.2406	0.6482	-0.5077
25 p25	2.2115	-0.9833	0.0684	-2.8342	0.3915	0.0824
26 p26	1.9970	0.7629	-0.2357	-2.7868	0.0512	-0.2442

27 p27	2.7378	-1.2696	1.6041	-1.9301	1.4764	-0.0692
28 p28	3.4858	0.9323	-0.9694	-1.8705	1.0160	0.7438
29 p29	4.2229	0.3464	0.4420	-1.4287	2.0055	-0.0431
30 p30	3.9015	0.5681	-0.6693	-1.7178	0.9097	0.0368
31 p31	2.6443	-1.9092	-1.9995	-0.1113	-0.6698	-0.1659
32 p32	2.1307	-0.1212	-1.3286	-0.5149	-2.4530	0.3550
33 p33	2.7941	-0.6052	-1.4015	-0.1073	-0.0468	-0.2332
34 p34	2.3723	-1.4501	-0.3511	-0.2968	0.7001	-1.2585
35 p35	2.0212	-1.2183	-1.9159	-1.1700	-1.9417	0.0225
36 p36	2.8605	-1.2355	-0.8205	-0.5442	-0.4213	0.2868
37 p37	1.6250	-1.8476	2.6454	1.9613	-1.8689	0.1669
38 p38	3.8092	-1.3626	1.2318	2.3394	0.0728	-0.6531
39 p39	1.3013	-2.4904	1.6213	1.6227	-1.4642	0.2213
40 p40	2.6665	-1.0420	0.6752	2.0442	-1.0655	-0.0778
41 p41	1.6300	-2.0352	1.9321	0.9918	-0.8001	-0.2071
42 p42	2.9973	-1.0064	0.4311	1.7859	0.7167	-0.0775

6.53 = inflation factor for biplot scores
BEGINNING RANDOMIZATIONS
RANDOMIZATION RESULTS
999 = number of randomizations

Axis	Eigenvalue from real data	Eigenvalues from randomizations			
		Minimum	Average	Maximum	p *
1	7.3604	1.8544	2.3147	2.8831	0.001000
2	3.1091	1.7122	2.0000	2.4362	0.001000
3	2.4572	1.4863	1.7726	2.0953	0.001000
4	1.8237	1.3430	1.5795	1.9620	0.004000
5	1.2596	1.1788	1.4066	1.6250	0.976000
6	0.35991	1.0541	1.2556	1.5031	1.000000
7	0.18485	0.92313	1.1227	1.3246	1.000000
8	0.12861	0.78813	0.99710	1.2022	1.000000
9	0.77248E-01	0.70458	0.88004	1.0504	1.000000
10	0.62386E-01	0.59498	0.77127	0.98030	1.000000

* p-value for an axis is (n+1)/(N+1), where n is the number of randomizations with an eigenvalue for that axis that is equal to or larger than the observed eigenvalue for that axis. N is the total number of randomizations.

APPLICATION OF STOPPING RULES

Last useful axis	Rule acronym	Explanation (see Peres-Neto, Jackson & Somers 2005)
4	Rnd-Lambda	Observed eigenvalue as compared to randomizations
10	Rnd-F	Observed pseudo-F-ratio as compared to randomizations
4	Avg-Rnd	Observed eigenvalue as compared to average eigenvalue from randomizations
4	BS	Observed eigenvalue as compared to broken-stick eigenvalue

Notes: Rnd-Lambda is relatively robust to non-normal data.
Rnd-F performs well with uncorrelated variables and multivariate normality.

Avg-Rnd performs well with multivariate normal data without uncorrelated variables.
 BS performs well when variables are highly correlated.
 For more information, see Peres-Neto et al. (2005 -- Comp.Stat.Data Anal.)

XIX. Análisis de correlación de Pearson entre las variables y los ejes, mediante PC-ORD 6.0

Pearson and Kendall Correlations with Ordination Axes N= 42

Axis:	1			2			3		
	r	r-sq	tau	r	r-sq	tau	r	r-sq	tau
PG	-,520	,270	-,321	-,615	,378	-,418	,573	,329	,463
MS	-,935	,874	-,805	-,090	,008	-,031	,020	,000	,008
Nabs	-,802	,643	-,656	-,147	,022	-,129	,263	,069	,101
IC	,703	,494	,505	-,343	,118	-,227	,406	,165	,262
PMG	,275	,075	,195	-,814	,662	-,591	-,013	,000	-,042
NG	-,657	,431	-,445	-,315	,099	-,215	,641	,411	,461
Ns	,859	,738	,615	-,122	,015	-,047	,285	,081	,144
Nc	,828	,686	,522	-,394	,155	-,287	,041	,002	,022
ADs	,205	,042	,156	-,722	,522	-,507	-,444	,197	-,352
ADpc	-,533	,284	-,208	-,418	,174	-,350	-,629	,396	-,438
ADc	-,016	,000	,108	-,702	,493	-,465	-,433	,187	-,263
UC s-fl	,079	,006	,019	,110	,012	,138	,541	,293	,349
UC fl-mf	,623	,389	,322	-,265	,070	-,245	-,195	,038	-,083
UC T	,830	,688	,592	-,246	,061	-,082	,223	,050	,180
EUA G	-,755	,570	-,548	-,471	,221	-,296	,386	,149	,337
EUA MS	-,830	,689	-,634	-,256	,065	-,069	-,206	,043	-,184
EF _N	,692	,479	,531	-,181	,033	-,133	,219	,048	,109