



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE MAGISTER EN CIENCIAS AGRARIAS

Factores edáficos que inciden sobre la productividad de
maíz en la Región Semiárida Pampeana

Matías Gastón Saks

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2014

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Magister en Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Agronomía durante el período comprendido entre el 2008 y 2014, bajo la dirección del Ing. Agr. M.Sc. Pablo Zalba y el Dr. Alberto Quiroga en carácter de Director Adjunto

Matías Gastón Saks



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación
Continua

La presente tesis ha sido aprobada el/...../..... , mereciendo la calificación de(.....)

DEDICATORIA

A PAMELA MI ESPOSA Y A MIS HIJOS TOMÁS Y RENZO QUE CONDUCEN Y GUIAN MIS PASOS...TAMBIÉN A MIS PADRES MARIA MERCEDES Y ROGELIO.

“Cuando vayas subiendo, saluda a todos. Son los mismos que vas a encontrar cuando vayas bajando” (Papa Francisco I).

AGRADECIMIENTOS

A LOS PRODUCTORES Y TÉCNICOS QUE BRINDARON SUS ESTABLECIMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DE FERTILIZACIÓN, EN ESPECIAL A LOS INGS. AGRS. HERNAN OTAMENDI Y OSCAR ORMEÑO.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR.

A LA ESTACION EXPERIMENTAL AGROPECUARIA DE INTA ANGUIL.

AL PERSONAL DEL LABORATORIO DE LA EEA INTA ANGUIL, SRES. OMAR GUTIERREZ, GUILLERMO PEREZ Y ROBERTO GOMEZ.

A LOS INGS. AGRS. PEDRO FALTLHAUSER Y JORGE BASSI QUE ME PERMITIERON DESARROLLAR ESTE TRABAJO DE TESIS.

A LA ING. AGR. MSC. ROMINA FERNÁNDEZ POR SU COLABORACIÓN Y AYUDA EN LAS PRIMERAS INSTANCIAS DE ESTE TRABAJO.

AL ING. AGR. MSC. PABLO ZALBA Y AL DR. ALBERTO QUIROGA POR SU AYUDA, COMPROMISO Y APOYO INCONDICIONAL PARA EL DESARROLLO DE ESTE TRABAJO DE TESIS

A TODOS AQUELLOS QUE ME PERMITIERON CRECER TANTO EN LO HUMANO COMO EN LO PROFESIONAL.

RESUMEN

En la región semiárida y subhúmeda pampeana la variabilidad de los rendimientos de maíz resultan principalmente dependientes de las precipitaciones y del agua almacenada durante el periodo previo a la siembra. La utilización de recursos hídricos subsuperficiales (napa) puede ser una estrategia útil para atenuar la falta de precipitaciones en períodos críticos de los cultivos. El estudio se realizó dentro de un área de 25800 km² en la Región Semiárida Pampeana y Subhúmeda Pampeana. Al momento de la siembra se seleccionaron 22 sitios con y sin la presencia de napa freática (12 sitios selectos durante 2007 y 10 sitios durante 2008) y se determinaron distintas variables físico-químicas en muestras de suelo y de agua de la napa freática. En los distintos sitios se establecieron cuatro niveles de nitrógeno (0, 40, 80 y 120 kg ha⁻¹) aplicados en el estadio V6. Los mayores niveles de rendimiento se observaron en sitios con menores profundidades de napas (<2 m) en donde el cultivo comenzó a captar agua en estadios tempranos de desarrollo hasta alcanzar la máxima profundidad efectiva de raíces. El rendimiento de maíz resultó severamente afectado cuando la conductividad eléctrica fue superior a 6 dS m⁻¹. Por el contrario valores de salinidad inferiores a 3 dS m⁻¹ no condicionaron el rendimiento de maíz. En los sitios sin napa el rendimiento de grano se asocio de manera positiva y significativa con el índice de precipitación estandarizado (IPE) 6 y con la capacidad de retención de agua (CRA) de los suelos. Mientras que en sitios con napa (CN) el rendimiento de granos se asocio negativamente con el IPE 6 y positivamente con el contenido de materia orgánica joven. En relación con la variación del rendimiento de maíz se comprobó una estrecha relación con la disponibilidad de agua a la siembra. En aquellos sitios donde la disponibilidad de agua a la siembra fue mayor se observó un incremento en los rendimientos de grano y una mayor respuesta a la fertilización nitrogenada. En sitios con presencia de napas se determinó un mayor rendimiento de grano y se comprobaron respuestas significativas a la fertilización con nitrógeno hasta la dosis de 80 kg de N ha⁻¹. Si bien los estudios realizados deben considerarse preliminares, fue posible identificar factores edafoclimáticos (presencia de napa, agua útil a la siembra y CRA) que condicionaron tanto el rendimiento como la respuesta a la fertilización nitrogenada del cultivo de maíz. Además, los mismos tienen un carácter predictivo, es decir, pueden ser determinados previamente a la siembra del cultivo y constituyen una importante ayuda en el momento de la toma de decisiones.

ABSTRACT

The variability of maize yields in the semi-arid and sub-humid regions are mainly dependent on the rainfall and water stored during the pre-planting period. The use of subsurface water resources (water table) may be a useful strategy to mitigate the lack of rainfall at critical periods of the crops. This study was conducted within the Pampa's region in a total area of 25800 km². At the time of planting 22 sites, with and without the presence of water table, were selected (12 selected sites in 2007 and 10 sites in 2008). Also, several physical-chemical properties in soil samples and water table samples were determined. Four levels of nitrogen (0, 40, 80 and 120 kg ha⁻¹) were applied at the V6 stage. The highest levels of performance were observed at the sites with shallower water table depths (<2 m) where cultivation began to capture water in early stages of development to achieve maximum effective root depth. Maize yield was severely affected when the electrical conductivity was greater than 6 dS/m. Conversely, salinity levels lower than 3 dS/m did not conditioned corn yield. At the sites without water table grain yield was associated positively and significantly with the standardized precipitation index (SPI) 6 and soil water storage capacity (WSC). On the contrary, grain yield was negatively associated with SPI 6 and positively with young organic matter content in the sites with water table. The variation of maize yield was also closely related with water availability at the planting period. In the sites with higher water availability at the planting period higher grain yields and greater response to nitrogen fertilization was observed. In the sites with water table presence was determined more grain yield and significant responses to nitrogen fertilization up to 80 kg N ha⁻¹. While these studies should be considered preliminary, we could identify edaphoclimatic factors (presence of water table, initial available water content and WSC) that conditioned both yield and response to nitrogen fertilization in the case of maize crops. In addition, these factors have a predictive nature because can be determined prior to planting and constitute an important aid in the time of decision making.

INDICE GENERAL

PREFACIO.....	1
AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
INDICE DE TABLAS.....	8
INDICE DE FIGURAS.....	9
INDICE DE ABREVIATURAS.....	11
CAPITULO I.	
1.1. Introducción general.....	12
1.2. Hipótesis de trabajo.....	16
1.3. Objetivos de trabajo.....	16
CAPITULO II: MATERIALES Y METODOS	
2.1. Caracterización del área de estudio.....	17
2.2. Tratamientos.....	20
2.3. Metodología.....	21
2.3.1. Determinaciones de parámetros físico químicos en las muestras de suelo en los sitios experimentales.....	21
2.3.2. Cálculo de la evapotranspiración del cultivo y determinaciones físico-químicas en la capa freática.....	22
2.3.3. Determinación de biomasa aérea, índice de verdor, nitratos y componentes del rendimiento.....	23
2.3.4. Análisis estadístico.....	24
CAPITULO III: RESULTADOS	
3.1. Caracterización de las precipitaciones.....	26
3.1.1 Caracterización de las precipitaciones y cálculo del IPE para la localidad de Agustoni.....	26
3.1.2. Caracterización de las precipitaciones y cálculo del IPE para la localidad de Catrilo.....	29
3.1.3. Caracterización de las precipitaciones y cálculo del IPE para la localidad de Quemu Quemu.....	32
3.1.4. Caracterización de las precipitaciones y cálculo del IPE para la localidad de Pellegrini (Bs As).....	35
3.2. Probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones para el cultivo de maíz en los sitios bajo estudio.....	38
CAPITULO IV: RESULTADOS	
4.1. Características edáficas de los sitios estudiados.....	40
4.2. Efecto de las variables de suelo en sitios con presencia de napa freática.....	45
CAPITULO V: RESULTADOS	
5.1. Caracterización de los perfiles hídricos y efecto de la fertilización sobre variables de cultivo.....	57
5.2. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre la productividad del cultivo de maíz.....	63

5.3. Efecto de la disponibilidad hídrica y la fertilización sobre los componentes del rendimiento.....	69
5.4 Factores edafoclimáticos que inciden sobre el rendimiento de maíz.....	77
CAPITULO VI: CONCLUSIONES GENERALES.....	81
Bibliografía.....	83
Tablas anexas en CD.....	92

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clasificación de la condición hídrica en función del Índice Estandarizado de Precipitación (IPE).....	19
Tabla 4.1. Análisis de suelo al momento de la siembra para los 12 sitios evaluados durante la campaña 2007/08.....	41
Tabla 4.2. Análisis de suelo al momento de la siembra para los 10 sitios evaluados durante la 2008/09.....	42
Tabla 4.3. Contenido de nutrientes en las napas (mg l^{-1}), pH, RAS y profundidad al momento de la siembra del cultivo de maíz. Campañas 2007/08 y 2008/09.....	47
Tabla 4.4. Modelos de regresión lineal y coeficientes de determinación (R^2) para las variables CE y RAS según distintas variables regresoras.....	48
Tabla 4.5. Matriz de correlación, coeficientes de correlación (r) para las distintas variables físico-químicas determinadas en las napas freáticas.....	50
Tabla 4.6. Autovectores determinados para conformar las CP1 y CP2 para las distintas propiedades físico-químicas de las napas.....	53
Tabla 4.7. Clasificación de las napas según niveles de profundidad (m), tolerancia al Boro (mg l^{-1}), RAS, CE del suelo, agua gravitacional (mm) y CE del agua.....	55
Tabla 4.8. Contenido de humedad (%) cada 0,20 m y lámina total en mm al momento de la siembra; y contenido de agua a capacidad de campo (CC) para los distintos sitios hasta los 2,00 m de profundidad.....	56
Tabla 5.1. Contenidos de agua útil (mm de 0-1,00 m y 1,00-2,00 m) y contenido de nitrógeno (kg ha^{-1}) en suelos destinados al cultivo de maíz para los 22 sitios estudiados.....	58
Tabla 5.2. Contenido de agua útil (mm), uso consuntivo (mm) y contribución hídrica de la napa (CHN) para los tratamientos testigo (T) y fertilizado (F) en 22 sitios destinados al cultivo de maíz.....	59
Tabla 5.3. Biomasa aérea (kg ha^{-1}) y eficiencia de uso de agua para los tratamientos testigos y fertilizados con nitrógeno.....	61
Tabla 5.4. Rendimiento de grano (kg ha^{-1}) y eficiencia de uso (EUA R) de agua para los tratamientos testigos y fertilizados con nitrógeno.....	62
Tabla 5.5. Contenido de NO_3 en la base de los tallos y valores de Unidades SPAD para distintos niveles de nitrógeno en los Sitios experimentales.....	72
Tabla 5.6. Análisis de las variables biomasa aérea y nitratos en savia utilizando un modelo lineal mixto.....	73
Tabla 5.7. Análisis del rendimiento utilizando un modelo lineal mixto para los efectos de las variables año, presencia de napa y dosis de nitrógeno.....	74
Tabla 5.8. Análisis de los componentes del rendimiento utilizando un modelo lineal mixto para los efectos de las napa y dosis de nitrógeno.....	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Rendimiento de los tratamientos testigos y fertilizados en función de los contenidos de agua útil a la siembra (Adaptado de Funaro et al., 2006).....	13
Figura 2.1. Área de estudio localizada en la Planicie Medanosa de la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana.....	18
Imagen 2.1. Imagen de Google earth (2013) con la ubicación de los sitios experimentales. Campaña 2007/08 (puntos amarillos) y campaña 2007/08 (puntos blancos).....	21
Figura 3.1. Evolución de las precipitaciones para la localidad de Agustoni (L.P) para la serie 1921-2009.....	27
Figura 3.2. Precipitaciones acumuladas para los ciclos 2007, 2008 y 2009; valor medio acumulado para la serie 1921-2009 y déficit acumulado.....	27
Figura 3.3. Evolución anual del índice estandarizado de precipitaciones (IPE 12) en Agustoni (serie 1921-2009).....	28
Figura 3.4. Evolución mensual del IPE 3 en Agustoni (L.P). Enero 2007 a diciembre 2009.....	29
Figura 3.5. Evolución de las precipitaciones para la localidad de Catrilo (L.P) para la serie 1921-2009.....	30
Figura 3.6. Precipitaciones acumuladas para los ciclos 2007, 2008 y 2009; valor medio acumulado para la serie 1921-2009 y déficit acumulado.....	30
Figura 3.7. Evolución anual del índice estandarizado de precipitaciones (IPE 12) en Catrilo (serie 1921-2009).....	31
Figura 3.8. Evolución mensual del IPE 3 en Catrilo (L.P). Enero 2007 a diciembre 2009.....	32
Figura 3.9. Evolución de las precipitaciones para la localidad de Quemu Quemu (L.P) para la serie 1921-2009.....	33
Figura 3.10. Precipitaciones acumuladas para los ciclos 2007, 2008 y 2009; valor medio acumulado para la serie 1921-2009 y déficit acumulado.....	33
Figura 3.11. Evolución anual del índice estandarizado de precipitaciones (IPE 12) en Quemu Quemu (serie 1921-2009).....	34
Figura 3.12. Evolución mensual del IPE-3 en Quemu Quemu (L.P). Enero 2007 a diciembre 2009.....	35
Figura 3.13. Evolución de las precipitaciones para la localidad de Pellegrini (Bs As) para la serie 1921-2009.....	36
Figura 3.14. Precipitaciones acumuladas para los ciclos 2007, 2008 y 2009; valor medio acumulado para la serie 1921-2009 y déficit acumulado.....	36
Figura 3.15. Evolución anual del índice estandarizado de precipitaciones (IPE 12) en Pellegrini (serie 1921-2009).....	37
Figura 3.16. Evolución mensual del IPE-3 en Pellegrini (Bs As). Enero 2007 a diciembre 2009.....	38
Figura 3.17. Probabilidad de las precipitaciones para cultivo de maíz durante el período del 1 octubre al 28 de febrero para las localidades de Agustoni, Pellegrini, Catrilo y Quemu Quemu.....	39
Figura 4.1. Relación entre el contenido de materia orgánica del suelo (MO) y la CRA útil (0-0,2 m) con el contenido de arcilla + limo de los suelos.....	43
Figura 4.2. Relación entre el IMO y el contenido de arcilla + limo.....	44
Figura 4.3. Relación entre el contenido de MO y la CRA de los suelos.....	44
Figura 4.4. Contenido de MO (gr kg ⁻¹) de la fracción menor a 50 um, de 50-100	

um y de la fracción 100-2000 um en función del contenido de arcilla + limo (gr kg^{-1}).....	45
Figura 4.5. Relación entre la CE y el RAS de la napa en función del contenido de Na.....	49
Figura 4.6. Gráfico <i>biplots</i> para las dos primeras componentes principales de las correlaciones entre las variables físico-químicas de las napas determinadas al momento de la siembra de maíz.....	52
Figura 5.1. Contenido de agua útil en floración (AUF) en función del contenido de agua útil a la siembra (AUS).....	64
Figura 5.2. Rendimiento de maíz en función del contenido de agua útil a la siembra para la campaña 2007/08 (Año 1).....	65
Figura 5.3. Rendimiento de maíz en función del contenido de agua útil a la siembra + precipitaciones durante el ciclo del cultivo para la campaña 2008/09 (Año 2).....	65
Figura 5.4. Respuesta a la fertilización con nitrógeno (120N) en función: a) del contenido de agua útil a la siembra (AUS) y b) del contenido de agua útil en floración (AUF) para las dos años de estudio.....	66
Figura 5.5. Relación entre la respuesta a la fertilización con N y el contenido de agua útil en floración (AUF) para los sitios sin presencia de capas freáticas.....	67
Figura 5.6. Evolución de la profundidad de la napa freática al momento de la siembra, floración y cosecha de maíz en los distintos sitios y campañas bajo estudio (a-2007/08 y b-2008/09).....	68
Figura 5.7. Gráfico <i>biplots</i> para las dos primeras componentes principales de las correlaciones entre las variables que componen el rendimiento del cultivo.....	70
Figura 5.8. Relación entre el rendimiento y el número de granos en sitios con y sin presencia de napa.....	71
Figura 5.9. Producción de biomasa aérea a) y contenido de nitratos en savia b) para distintos niveles de nitrógeno aplicado como fertilizante.....	73
Figura 5.10. Relación entre el índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) en el N disponible (suelo+fertilizante).....	74
Figura 5.11. Rendimiento de grano de maíz para distintos niveles de nitrógeno aplicado como fertilizante en sitios con y sin presencia de napa freática obtenidos mediante el uso de un modelo lineal mixto.....	75
Figura 5.12. Rendimiento de grano de maíz simulado y observado en sitios con y sin presencia de napa freática para distintos tratamientos con nitrógeno.....	75
Figura 5.13. Gráfico <i>biplots</i> para las dos primeras componentes principales de las correlaciones entre variables edafoclimáticas.....	77
Figura 5.14. Gráfico <i>biplots</i> para las dos primeras componentes principales de las correlaciones entre variables edafoclimáticas para sitios SN.....	78
Figura 5.15. Gráfico <i>biplots</i> para las dos primeras componentes principales de las correlaciones entre variables edafoclimáticas para sitios CN.....	79
Figura 5.16. Rendimiento de maíz en función de la profundidad de la napa al momento de la siembra.....	80

INDICE DE ABREVIATURAS

AUS: agua útil a la siembra
AUF: agua útil en floración
CHN: contribución hídrica de la napa
CRA: capacidad de retención de agua
CN: sitios con napa
SN: sitios sin napa
PMG: peso de 1000 granos
EUA B: eficiencia de uso de agua en biomasa
EUA R: eficiencia de uso de agua en grano
UC: uso consuntivo
N: nitrógeno
Pe: fósforo extractable
B: boro
MO: materia orgánica total
MOJ: materia orgánica joven
IMO: índice MO/arcilla+limo
NT: nitrógeno total
ISN: índice de suficiencia de nitrógeno
DE: desvió estándar
IPE: índice estandarizado de precipitación
RAS: relación de adsorción de sodio
CE: conductividad eléctrica
DA: densidad aparente
CC: capacidad de campo
RSP: región semiárida pampeana
RSHP: región subhúmeda pampeana

CAPITULO I

1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El maíz es el tercer cultivo en importancia en el mundo después del trigo y el arroz en cuanto a volumen de producción. Todos los años se siembran alrededor de 130 millones de hectáreas que producen casi 500 millones de toneladas de grano (FAO, 1992). La superficie ocupada con el cultivo de maíz en la última década en Argentina varió entre 2,9 y 3,7 millones de hectáreas, y la producción de granos entre 13 y 21 millones de toneladas (SAGPyA, 2008). El rendimiento comercial de maíz en condiciones de secano, ha sido influenciado en los últimos años en Argentina por las prácticas de manejo tendientes a disminuir la fuente de variación del rendimiento. En la región pampeana, Calviño et al. (2003) comprobaron que el 84 % de la variación del rendimiento estuvo asociada a la disponibilidad de agua durante el periodo de floración. Teniendo en cuenta esto último, Tollenaar y Lee (2002), demostraron que los incrementos de los rendimientos de maíz en USA desde 1 Mg ha⁻¹ en 1930 hasta 7 Mg ha⁻¹ en 1990 serían atribuibles al mejoramiento de la interacción genotipo x manejo agronómico.

En la región semiárida (RSP) y subhúmeda (RSHP) pampeana la variabilidad de los rendimientos de maíz resultan principalmente dependiente de las precipitaciones y del agua almacenada durante el periodo previo a la siembra (Quiroga et al., 2003; Funaro et al., 2004). Similares resultados se comprobaron en girasol, donde los contenidos de agua útil a la siembra condicionaron los rendimientos de los tratamientos testigo y la respuesta a la fertilización (Figura 1). Las diferencias de rendimiento asociadas a la biodisponibilidad de agua al momento de la siembra (AUS) y floración condicionan de manera diferencial la respuesta a la fertilización nitrogenada (Saks et al., 2010) asociándose con el balance hídrico del cultivo (Espósito et al., 2006).

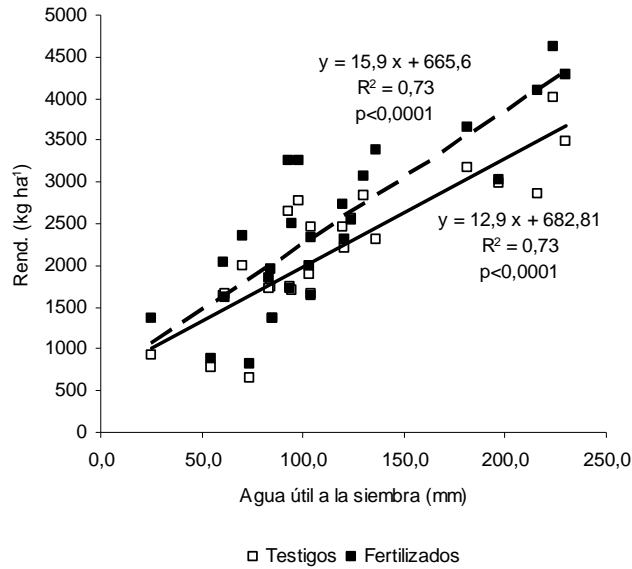


Figura 1.1. Rendimiento de los tratamientos testigos y fertilizados en función de los contenidos de agua útil a la siembra (Adaptado de Funaro et al., 2006).

Álvarez et al. (2006) al comparar la productividad de maíz en un Ustol y un Udol, indicaron que el régimen de humedad de los suelos condicionó en mayor grado la producción de biomasa aérea y el rendimiento de grano en comparación con el sistema de labranza y la fertilización nitrogenada. Por lo tanto, variaciones en los contenidos de AUS en similares tipos de suelos bajo el mismo régimen de precipitaciones condicionaron la respuesta del cultivo al N, tanto el N proveniente de la materia orgánica como el aportado por fertilización (Quiroga et al., 2006). Al respecto, Passioura (1994) señaló que variaciones en la disponibilidad de agua pueden afectar la modulación del área foliar, el crecimiento radical, la eficiencia por la cual las hojas intercambian agua por CO₂ y los procesos involucrados en la generación y en el llenado de granos. El espesor de suelo explorado por las raíces es otra de las variables que condiciona la biodisponibilidad de agua (Kramer, 1983) y el rendimiento de los cultivos. Bajo estas condiciones surgen dos variables de importancia para caracterizar el efecto de la disponibilidad de agua que son la profundidad efectiva de raíces y el límite inferior de agua extractable alcanzado (Dardanelli y Bachmeier, 1993). El cultivo de maíz alcanza una profundidad máxima de 2 m al comienzo del periodo de llenado de granos (Dardanelli et al., 1997), distribuyéndose el 90 % de la masa radical en los primeros 30 cm del suelo

(Andrade et al., 1996). Por otra parte, genotipos de maíz de distinto ciclo de crecimiento pueden presentar mayor desarrollo del sistema radicular, tanto en abundancia como en profundidad (Gaggioli et al., 2010), siendo la densidad relativa máxima de raíces directamente proporcional a la extracción máxima de agua (Novák, 1994). En relación con la profundidad efectiva se ha comprobado que la misma puede variar significativamente como consecuencia de deficiencias hídricas tempranas (Otegui, 1992; Pandey et al., 2000b) y debido también a diferencias genotípicas (Lorens et al., 1987; Eghball y Maranville, 1993, Ray et al., 1997). Por otra parte, la productividad del cultivo de maíz puede ser condicionada por aspectos pedogenéticos (Sadras y Calviño, 2001; Funaro et al., 2006) o de manejo (Calviño et al., 2003). Al respecto, los cambios en los contenidos de materia orgánica estarían asociados al uso intensivo del mismo, afectando de manera indirecta a distintas propiedades físicas del suelo (Quiroga et al., 1999). En la RSP en sitios con presencia de tosca, la capacidad de retención de agua de los suelos (CRA) puede variar significativamente debido a variaciones en la granulometría y profundidad efectiva del perfil (Fontana et al., 2006).

En regiones semiáridas y subhúmedas, la utilización de recursos hídricos subsuperficiales puede ser una estrategia útil para atenuar la falta de precipitaciones en períodos críticos de los cultivos. Las napas pueden contribuir significativamente al uso consuntivo con valores que pueden alcanzar el 70% del total de agua evapotranspirada (Sepaskhah et al., 2003). Kahlown et al. (2005), indicaron que la capa freática contribuye en un 40 % del total de agua edáfica requerida por el cultivo de maíz cuando la misma se encuentra a una profundidad de 50 cm. Mueller et al. (2005) comprobaron para maíz consumos desde la napa freática entre 100 a 400 mm cuando se encontraba entre 80 y 120 cm, produciendo aumentos de producción asociado probablemente al aumento en la evapotranspiración actual. Al respecto, Garnero y Quiroga (2003), indicaron que la profundidad efectiva de la napa, durante el periodo crítico de los cultivos de soja, condicionó de manera diferencial el rendimiento en molisoles de la RSP. En estudios realizados en la pampa ondulada, Portela et al. (2009) comprobaron a través de una toposecuencia de cultivos que las posiciones bajas del paisaje pueden contribuir al intercambio de agua y

nitrógeno con el suelo cuando la napa se encuentra a menos de 2,5 m de profundidad.

El periodo de floración es crítico para la determinación del rendimiento de grano de maíz (Otegui et al., 1995; Andrade, 1995). La incidencia de un estrés hídrico durante el periodo crítico provoca mayores pérdidas en el número de granos que en otro estadio del cultivo (Otegui et al., 1995); siendo esta reducción proporcional al retraso en la emergencia de las estructuras reproductivas (NeSmith y Ritchie, 1992). Al respecto, Pandey et al. (2000a), comprobaron que reducciones en la disponibilidad hídrica durante las fases de crecimiento vegetativo y reproductivo, condicionaron el número de granos por unidad de superficie y el peso de los granos. Otegui et al. (1995) observaron reducciones de 4.7 granos m^{-2} y 17,7 $kg\ ha^{-1}$ por cada milímetro de reducción de evapotranspiración durante el período crítico. No obstante, la disponibilidad hídrica y la fertilización nitrogenada condicionaron la producción de biomasa y el rendimiento de maíz, comprobándose un efecto aditivo de ambos factores (Etcheagaray et al., 2006; Pandey et al., 2000 a y b). Teniendo en cuenta esto último, efectos de estrés hídricos o nitrogenados pueden inducir a pérdidas en el número de granos asociado a fotosíntesis o crecimiento de la planta en floración (Uhart y Andrade, 1995).

Cuando el agua no limita al cultivo, la disponibilidad de nitrógeno es un aspecto importante a considerar dentro de las prácticas de manejo. La evaluación de la disponibilidad de nitrógeno para establecer estrategias de fertilización nitrogenada puede realizarse en el suelo o en la planta. En el suelo normalmente se realizan determinaciones en los primeros 60 cm del perfil previamente a la siembra o también en el estadio V6 (Barraco y Díaz-Zorita, 2005), mientras que en la planta se emplean lecturas con clorofilometro SPAD 502 o bien se determinan nitratos en la base del tallo. La determinación de la concentración de nitratos en la porción basal de los tallos de maíz, permite diagnosticar eventuales deficiencias de nitrógeno durante el desarrollo del cultivo (Echeverría y Sainz Rozas, 2006, Sainz Rozas et al., 2001). Al respecto, Echeverría et al. (2001), encontraron variaciones en los contenidos de nitratos en la base de los tallos de maíz durante la estación de crecimiento entre dosis de N y momento de aplicación. El contenido de nitratos en la porción basal de los tallos, varió en función de la disponibilidad de nitrógeno de los distintos

tratamientos. No obstante, varios estudios mencionan que el mismo es poco confiable para realizar análisis de diagnóstico de fertilización nitrogenada (Echeverría et al., 2001, Sainz Rozas et al., 2001).

En cuanto a la RSP, además de la contribución del suelo generalmente la influencia de la napa aporta agua y nutrientes al cultivo. Si bien se ha valorado el aporte de agua, no se conocen antecedentes sobre aspectos cualitativos (nutrientes, pH, salinidad) en napas del Este de La Pampa.

1.2. HIPOTESIS DE TRABAJO

1.2.1. Factores relacionados con el régimen hídrico (presencia de napa) y con la disponibilidad de nitrógeno, serían los principales condicionantes de la producción de maíz en la RSP y RSHP.

1.2.2. La respuesta a la fertilización nitrogenada resultaría dependiente de la oferta de nitrógeno al momento de la siembra, de la CRA del suelo y de la cantidad de MO asociada a la fracción limo más arcilla.

1.2.3. El incremento de la productividad del cultivo de maíz en la RSP y RSHP resultaría dependiente de la capacidad de los suelos para almacenar agua y de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo.

1.3. OBJETIVOS DE TRABAJO

1.3.1. Evaluar la productividad del cultivo de maíz y su respuesta a la fertilización nitrogenada en Molisoles con diferente capacidad de almacenamiento de agua.

1.3.2. Evaluar la contribución de la capa freática, tanto por el aporte de agua como de nutrientes, y su efecto sobre la productividad de maíz.

1.3.3. Relacionar la productividad del cultivo de maíz y respuesta al nitrógeno con distintos indicadores edáficos (AUS, MO joven) y del cultivo (biomasa aérea, índice de verdor).

CAPITULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Caracterización del área de estudio

El estudio se desarrolló dentro de un área de 25800 km² de la RSP y RSHP (latitud 35°S a 36°30' S, longitud 63°W a 64°W). Hacia el este de la Provincia de La Pampa (Figura 2.1.a) se presentan suelos profundos (> 2.00 m), con secuencias de horizontes A, AC y C, y textura arenosa-franca, con arena como principal fracción textural que puede llegar hasta valores del 80 % (Fernández et al., 2003). Los suelos predominantes corresponden a los subgrupos Haplustoles énticos, Haplustoles típicos y Ustipsament típicos. Hacia el oeste de la Provincia de Buenos Aires (Figura 2.1.b) predominan los suelos de los subgrupos Hapludoles énticos y típicos que se continúan hacia la provincia de Córdoba. Hacia el norte de la zona, el paisaje se presenta como lomas extendidas, suavemente onduladas. Se presentan ondulaciones arenosas con sentido N-S y de médanos aislados. Intercaladas entre las ondulaciones existen planicies arenosas de aproximadamente 3 a 4 km de ancho. Hay frecuentes áreas deprimidas con lagunas temporarias. El sedimento arenoso de espesor variable (hasta 6 m en la franja este), es de textura franco arenosa fina. A partir de 1,1 m de profundidad, contiene un 2% de carbonato de calcio en concreciones y en masa. Presentan drenaje algo excesivo, permeabilidad rápida, escurrimiento casi nulo y capa freática profunda. El régimen de humedad es ústico y marginal al údico (RIAP 2006). El trazado de las isoyetas de precipitaciones de la región correspondientes al promedio anual muestra un gradiente decreciente de noreste a sudoeste (Casagrande et al., 2006; Casagrande y Vergara, 1996), variando entre 700 y 850 mm.

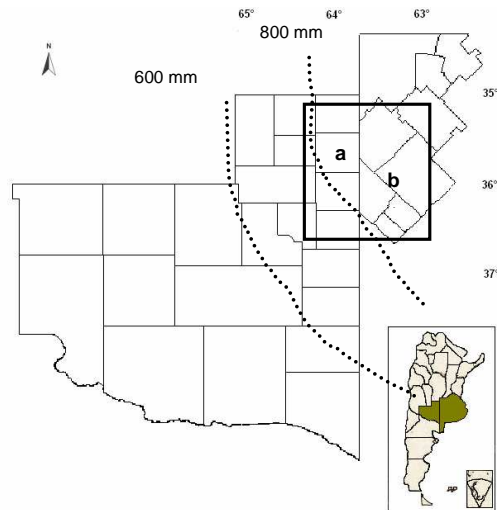


Figura 2.1. Área de estudio localizada en la Planicie Medanosa de la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana.

El análisis de las sequías ocurridas para un período de tiempo puede ser realizado mediante el uso de índices climáticos. El cálculo de estos índices proveen en una sola variable los efectos combinados de uno o más parámetros. McKee et al. (1993) desarrollaron el índice de precipitación estandarizado (IPE) para mejorar la detección del inicio de sequías y su posterior monitoreo. El índice detecta a través del tiempo el inicio de una sequía cuando se hace negativo por primera vez y finaliza cuando el IPE toma valor positivo. En la Tabla 2.1 se presenta el sistema de clasificación del IPE (McKee et al., 1993).

Tabla 2.1. Clasificación de la condición hídrica en función del Índice Estandarizado de Precipitación (IPE).

Valores IPE	Categoría de la sequía
2.0 o más	Extremadamente húmedo
1.5 a 1.99	Muy húmedo
1.0 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Casi normal
-1.0 a -1.49	Moderadamente seco
-1.50 a -1.99	Severamente seco
-2.0 o menos	Extremadamente seco

Para el cálculo del IPE se utilizaron precipitaciones mensuales de registros continuos para la serie 1921-2009 de las localidades de Catrilo, Quemú Quemú, Agustoni y Pelegrini. Este índice puede obtenerse para diversas escalas de tiempo, las cuales varían desde 3, 6, 12, 24 ó 48 meses. En particular la escala de 3 y 6 meses se relacionan con las sequías agronómicas (Scian, 2002; Seiler y Bressan, 2000), y las escalas más largas 12, 24 meses son indicadoras del estado del agua subsuperficial (Seiler y Bressan, 2000). El cálculo del IPE se realiza en dos etapas. En la primera, se ajusta una distribución teórica (generalmente la Gamma de dos parámetros) a la serie histórica de precipitación usada como serie de referencia (periodo 1921-2009). En la segunda etapa los parámetros de la distribución ajustada se usan para convertir la serie de precipitación de interés, en una distribución normal estandarizada, con media 0 y varianza 1, en cuya abscisa se encuentra el IPE. Los valores del IPE representan el número de desviaciones estándar que cada registro de precipitación se desvía del promedio histórico. Se utilizó el IPE como indicador para la determinación de sequías agronómicas y el software MATLAB 6.5 para determinar la probabilidad de ocurrencia de precipitaciones durante el período de crecimiento del cultivo ajustando una distribución gamma.

2.2. Tratamientos

El trabajo se llevó a cabo en dos etapas, siendo la primera, la evaluación y caracterización de distintas variables edáficas en 80 lotes de producción destinados al cultivo de maíz. Este estudio se realizó al momento de la siembra con el propósito de seleccionar 22 sitios con y sin la presencia de napa freática. La profundidad de la napa se determinó tomando muestras con barreno hasta la profundidad de 3.00 m.

La segunda etapa consistió en evaluar los efectos de la fertilización nitrogenada en 22 sitios seleccionados previamente de acuerdo a características del suelo contrastantes (12 sitios selectos durante 2007 y 10 sitios durante 2008). En la siguiente imagen se muestra la ubicación de los distintos sitios experimentales (Imagen 2.1).

En los distintos sitios se establecieron ensayos para evaluar la respuesta a la fertilización con cuatro niveles de nitrógeno (0, 40, 80 y 120 kg ha⁻¹) aplicados en el estadio V6 (Ritchie y Hanway, 1982) utilizando como fuente nitrogenada solución de Urea y Nitrato de amonio líquido (UAN). Cada unidad experimental (parcela) fue establecida sobre una superficie de 50 m² utilizando un diseño en bloques al azar con cuatro repeticiones.

En los sitios experimentales se utilizaron híbridos de maíz de ciclo completo con un rango de variación entre 120 a 124 días a madurez relativa. Al momento de la siembra se aplicó 10 kg de P ha⁻¹ utilizando como producto comercial fosfato mono o diamónico.

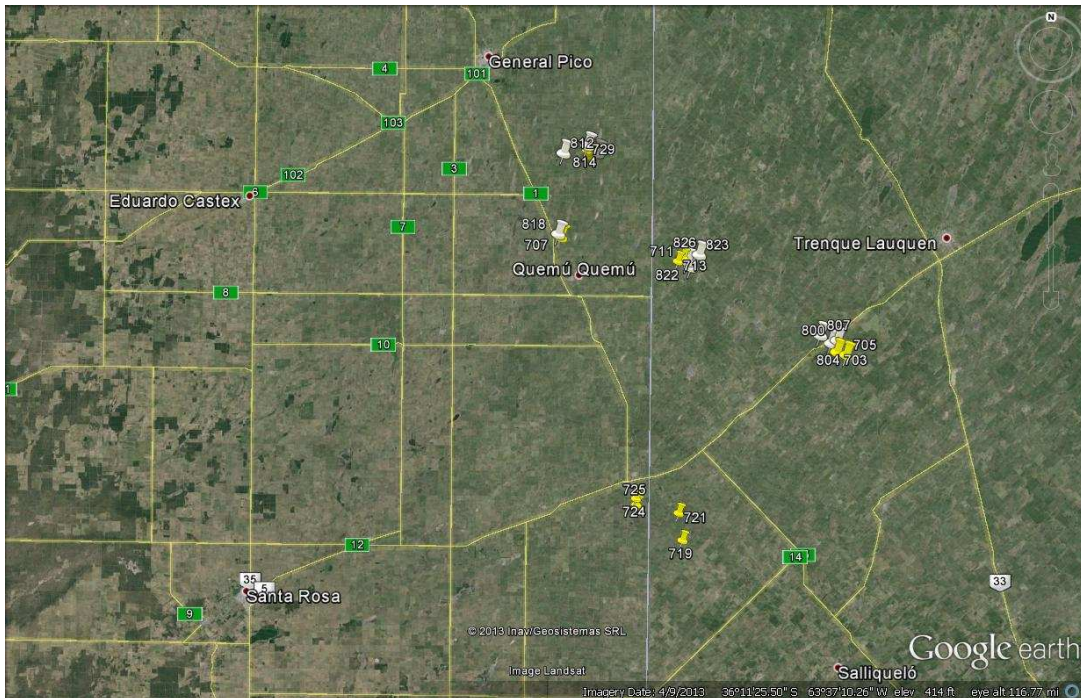


Imagen 2.1. Imagen de Google earth (2013) con la ubicación de los sitios experimentales. Campaña 2007/08 (puntos amarillos) y campaña 2008/09 (puntos blancos).

2.3. Metodología

2.3.1. Determinaciones de parámetros físico químicos en las muestras de suelo en los sitios experimentales.

- Contenidos de humedad y agua útil a intervalos de 0,20 m hasta los 2,00 m (método gravimétrico) durante los estadios de siembra, floración y cosecha del cultivo de maíz.
- Capacidad de campo (a 33 KPa) y punto de marchitez permanente (a 1500 KPa) con la membrana de presión de Richards.
- Densidad aparente hasta los 0,60 m de profundidad a partir del método del cilindro (244 cm³). Para profundidades superiores se utilizó el valor de la densidad de la capa de 0,40-0,60 m por tratarse de perfiles de suelo poco desarrollados con secuencias de horizontes A-AC-C o A-Bcámbico-C y sin presencia de tosca hasta los 2,00 m de profundidad.
- Materia orgánica joven (50-2000 um) por separación de la fracción gruesa mediante tamizado en húmedo (Andriulo et al., 1991; Quiroga et al., 1996).

- N-nitratos: a tres profundidades 0-0,20 m, 0,20-0,60 m y 0,60-1,00 m de profundidad (extracto acuoso con sulfato de calcio y determinación por colorimetría con ácido cromotrópico).
- S-sulfatos: a dos profundidades 0-0,20 m y 0,20-0,60 m de profundidad (Espectrometría de Emisión Atómica por plasma de acoplamiento inductivo con nebulización neumática-Análisis siguiendo la metodología de la Norma EPA 2007).
- Materia orgánica total: por el método de Walkley y Black (Walkley and Black, 1934).
- Índice (MO/Arcilla + limo x 100) (Pieri, 1995; Quiroga et al., 2006).
- Fósforo extractable: por medio del método Bray-Kurtz I (Bray y Kurtz, 1945).
- Textura por el método de la pipeta de Robinson.
- pH en una relación suelo:agua (1:2,5) potenciométricamente con un electrodo de vidrio.

2.3.2. Cálculo de la evapotranspiración del cultivo y determinaciones físico-químicas en la capa freática.

-La evapotranspiración (ET) fue calculada a partir de las precipitaciones (R) y el cambio en el agua almacenada en el suelo hasta los 2.00 m de profundidad (ΔS) según la ecuación propuesta por López y Arrúe (1997):

$$ET = \Delta S + R$$

-El contenido de Agua Gravitacional (AG) se calculó como la sumatoria de las diferencias entre el contenido de agua total (mm) de cada capa de suelo de 0.20 m y su contenido de agua a capacidad de campo (mm) hasta los 2,00 m de profundidad al momento de la siembra, floración y cosecha.

-La Contribución Hídrica Total por parte de la Napa (CHN) a la ET del cultivo se determinó como:

$$CHN (\%) = \frac{\Delta AG}{ET}$$

La CHN se determinó hasta los 2,00 m de profundidad, definido como profundidad máxima de crecimiento de raíces para el cultivo de maíz (Dardanelli et al., 1997; Saks et al., 2012a).

Se tomaron al momento de la siembra cuatro muestras (500 cm³) de la napa freática y también en el momento de madurez fisiológica del cultivo. En las muestras de agua se realizaron las siguientes determinaciones:

-pH

-CE (expresada en dS m⁻¹)

-B, Na, Mg, P, S, K, Ca, Zn, N-NO₃, Mn, Fé, Cu, Cl, CO₃ y HCO₃

-RAS (relación de adsorción de sodio) como la relación en meq l⁻¹ de Na respecto de Ca y Mg expresada en base a la siguiente ecuación:

$$\text{RAS: } \frac{\text{Na}}{\sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg})/2}}$$

-Se determinó la profundidad del nivel freático tomando como criterio alcanzar la zona saturada del perfil (presencia de agua gravitacional).

2.3.3. Determinación de biomasa aérea, índice de verdor, nitratos y componentes del rendimiento.

Se efectuaron determinaciones en V12-V14 (Ritchie y Hanway, 1982) de biomasa total realizando cortes de 0,5 m² por parcela y secando hasta peso constante (estufa con circulación de aire a 60 °C).

En el estado V12-V14 (Ritchie y Hanway, 1982) se realizaron mediciones del contenido de clorofila utilizando un clorofilómetro Minolta SPAD 502.

Al momento de la determinación de biomasa se cuantificó el contenido de N-nitratos en la base del tallo a través del análisis de savia utilizando un reflectómetro portátil Nitratek 404 de acuerdo a la metodología propuesta por INRA-ITCF-AGPM-Challenge Agriculture (1996).

En estadios de madurez fisiológica se determinó el número de espigas por planta, número de granos por hilera, número de hileras de cada espiga, peso

de mil granos y rendimiento de grano mediante cosecha manual (2 m² por parcela) y trilladora estacionaria.

Se calculó el índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) para cada muestreo como la relación entre el índice de verdor (IV) de cada tratamiento y el mayor IV promedio determinado para cada tratamiento (Blackmer y Schepers, 1995).

2.3.4. Análisis estadístico

Las medias de los valores de las variables evaluadas fueron comparadas a través de un análisis de la varianza (ANOVA). Cuando la diferencia entre medias fue significativa se utilizaron pruebas de diferencias de medias. Se realizaron análisis de regresión y multivariados (componentes principales) (Seber, 1984) para establecer relaciones entre variables edáficas, ambientales y de cultivo. Para el análisis de las distintas variables y el estudio conjunto de los distintos factores se utilizó un modelo lineal mixto. Se determinó en cada sitio el promedio de las variables con cada dosis de nitrógeno. El modelo lineal para las observaciones de este experimento es el siguiente:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \eta_k + \delta_{ij} + \varphi_{ik} + \lambda_{jk} + \theta_{ijk} + b_l + \varepsilon_{ijkl};$$

$i = 1, \dots, 2; j = 1, \dots, 2; k = 1, \dots, 2; l = 1, \dots, 16$

donde la misma representa la respuesta observada en i -ésimo nivel del factor *año* y j -ésimo nivel de factor *napa*, k -ésimo nivel del factor *dosis de N* en la l -ésima *parcela*, μ representa la media general de la respuesta, τ_i representa el efecto del i -ésimo nivel del factor *año* y γ_j representa el efecto del j -ésimo nivel del factor *napa ambos* asociados a las parcelas principales (combinación de los niveles de los factores *año* y *napa*), η_k representa el k -ésimo nivel del factor *dosis de N* asociados a las subparcelas y δ_{ij} , φ_{ik} , λ_{jk} y θ_{ijk} , representan las interacciones de segundo y tercer orden correspondientes de los factores *año*, *napa* y *dosis de N*. Por otra parte b_l y ε representan los efectos aleatorios de las parcelas y de los errores experimentales respectivamente. Los factores *año* y *napa*, y la interacción entre ambos se contrastó con el error asociado a la parcela principal, mientras que el factor nitrógeno y el resto de las interacciones se contrastaron con el error experimental (error asociado a la subparcela). Para

todos los análisis se utilizó el software InfoStat versión 2009 (Di Rienzo et al., 2009).

CAPITULO III

RESULTADOS

3.1. Caracterización de las precipitaciones

La productividad del cultivo de maíz en regiones semiáridas y subhúmedas es significativamente dependiente de las precipitaciones y del agua almacenada al momento de la siembra (Gurovich y Ramos, 1985). La causa principal de la ocurrencia de cualquier sequía es una deficiencia en la precipitación, y en particular, el momento, la distribución y la intensidad de esta deficiencia en lo referente a la demanda y uso de la cantidad de agua almacenada (Karavitis et al., 2011). El índice estandarizado de precipitación (IPE) es una herramienta adecuada no sólo para el monitoreo de sequías, sino también para los excesos y para la previsión de la evolución temporal de ambos tipos de anomalías (Serio et al., 2010; Moreira et al., 2006). Yamoah et al., (2000) proponen al IPE como guía para la elección de los cultivos, nivel de fertilización y para decisiones de gestión para manejar y conservar el agua en sistemas de producción en secano.

3.1.1 Caracterización de las precipitaciones y cálculo del IPE para la localidad de Agustoni.

Del análisis de las precipitaciones para la localidad de Agustoni se observa que el promedio anual para el período 1921-2009 es de 790 mm, comprobándose un incremento de 5.9 mm año^{-1} (Figura 3.1). Las precipitaciones acumuladas promedio para el periodo 2007, 2008 y 2009 fueron de 640, 727 y 706 mm respectivamente; mientras que el déficit acumulado respecto a la serie 1921-2009 fue de -151,7, -64,7 y -85,7 mm (Figura 3.2). Durante la campaña 2007/08 se registraron durante el ciclo de crecimiento del cultivo de maíz (octubre-febrero) 320 mm y 426 mm para la campaña 2008/09. Por otra parte, durante los meses de diciembre y enero, período que coincide con el período crítico de determinación de rendimiento del cultivo de maíz, las precipitaciones registradas fueron de 152 y 91 mm para las campañas 2007/08 y 2008/09

respectivamente. Las precipitaciones registradas durante las campañas bajo estudio no permiten cubrir el uso consuntivo de los cultivos de maíz de alta producción.

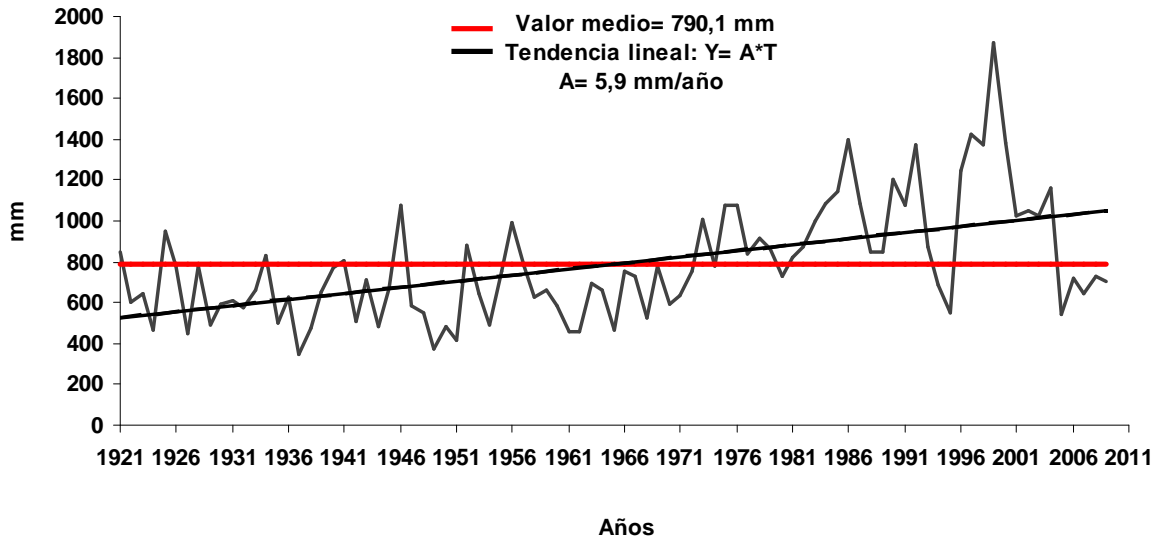


Figura 3.1. Evolución de las precipitaciones para la localidad de Agustoni (L.P) para la serie 1921-2009.

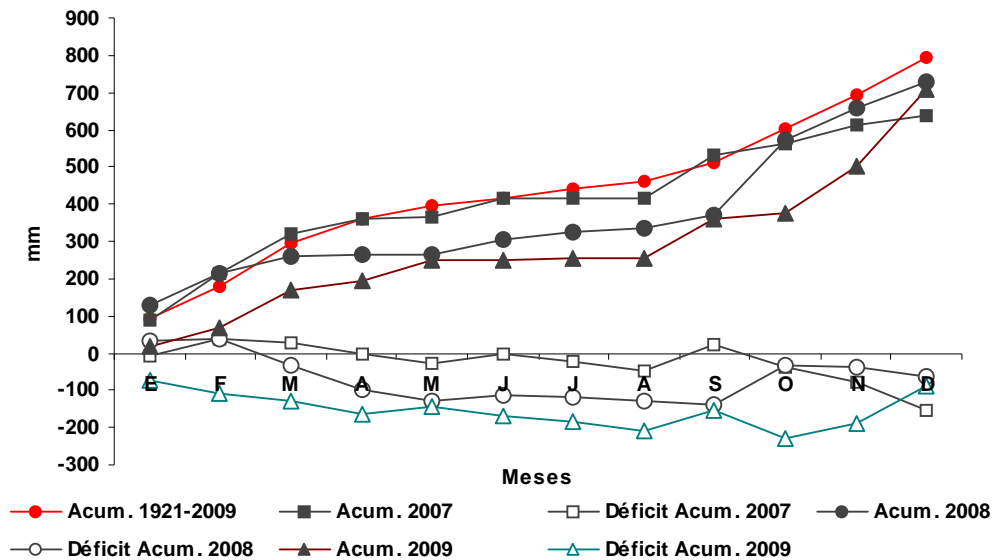


Figura 3.2. Precipitaciones acumuladas para los ciclos 2007, 2008 y 2009; valor medio acumulado para la serie 1921-2009 y déficit acumulado.

La Figura 3.3 muestra los valores de IPE 12 para la localidad de Agustoni. El valor del IPE de 12 meses observado en la localidad de Agustoni se encuentra por debajo del valor 0 obteniéndose mayor frecuencia de valores negativos en los años que van desde 1921 a 1968, reflejando una mayor ocurrencia de

ciclos secos que de ciclos húmedos. Desde 1969 los valores del índice aumentan considerablemente a valores superiores a 0, traduciéndose a ciclos húmedos. En particular la escala de 3 y 6 meses se relacionan con las sequías agronómicas (Scian, 2002; Seiler y Bressan, 2000), y las escalas mas largas 12, 24 meses son indicadores del estado del agua subsuperficial (Seiler y Bressan, 2000). Nótese que la mayor parte del período 2007-2009 los valores de IPE 3 (Figura 3.4) permiten clasificar a los meses como “casi normal” de acuerdo a la categorización del IPE propuesta por McKee et al., (1993). El valor de IPE 3 más crítico registrado fue durante el mes de diciembre de 2007 siendo el valor de $-1,76$ menor a $-1,49$ (severamente seco) coincidiendo con el periodo crítico del cultivo de maíz. Para el mes de diciembre de 2008 se registró un valor de IPE de $-0,72$ y de $-0,75$ para el mes de enero ubicándose en la categoría de IPE “casi normal”. En los meses de enero y febrero de 2009 los valores de IPE fueron muy próximos a $-0,99$, infiriendo que durante el período de floración y llenado de grano de maíz se registraron restricciones hídricas.

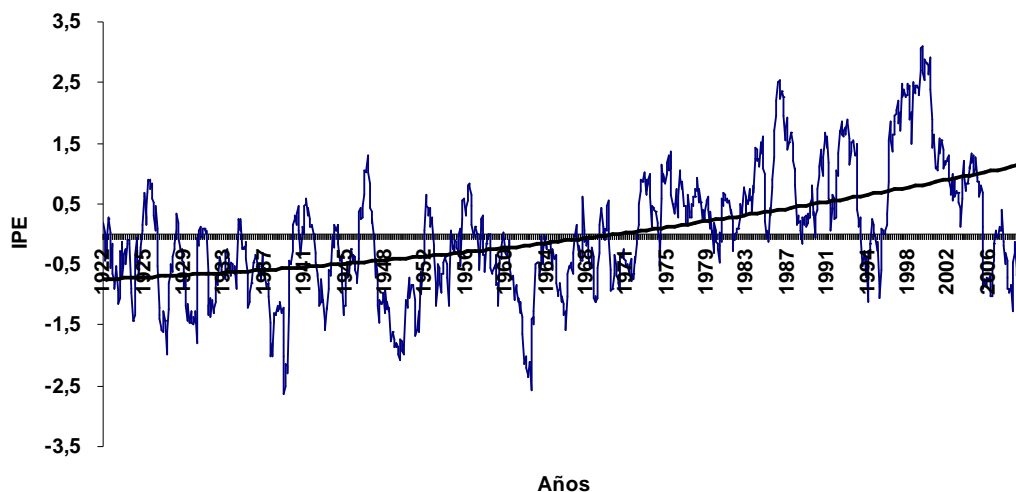


Figura 3.3. Evolución anual del índice estandarizado de precipitaciones (IPE 12) en Agustoni (serie 1921-2009).

Según los valores de IPE 12 calculados para las localidades de Agustoni, el 69,4 % de casos corresponden a valores normales, los periodos moderadamente seco y moderadamente húmedo representan el 10,5 y el 6,5 % de los ciclos analizados. Los extremos húmedos y secos representan el 4,2 y

1,7 %, los valores severamente secos y muy húmedos toman valores de 2,9 y 4,7 % .

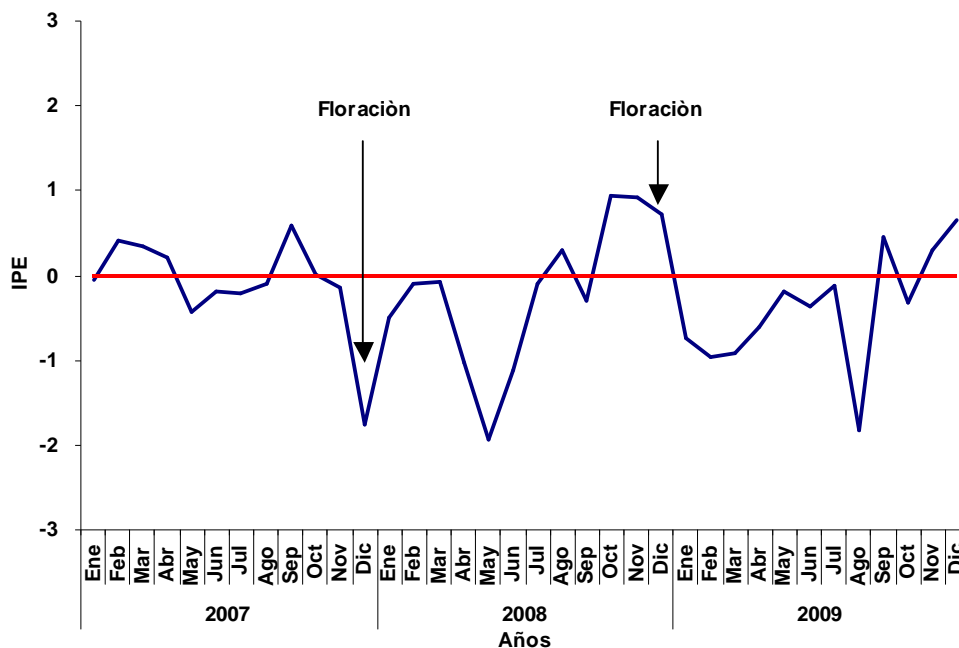


Figura 3.4. Evolución mensual del IPE 3 en Agustoni (L.P). Enero 2007 a diciembre 2009.

3.1.2. Caracterización de las precipitaciones y cálculo del IPE para la localidad de Catrilo.

Para la localidad de Catrilo el promedio anual de precipitaciones para la serie 1921-2009 es de 704,1 mm, observándose un incremento para la serie de 2,5 mm año⁻¹. En cuanto a los años 2007, 2008 y 2009 en donde se condujeron los ensayos de fertilización se determinaron valores de precipitación acumuladas de 610, 595 y 428 mm respectivamente. El déficit acumulado de las precipitaciones respecto a la serie 1921-2009 fue de -94 mm para 2007, -109 mm para 2008 y -276 mm para 2009. Para las campañas bajo estudio 2007/08 y 2008/09 se registraron precipitaciones en el período de crecimiento del cultivo de maíz (octubre-febrero) que fueron de 399 y 328 mm respectivamente.

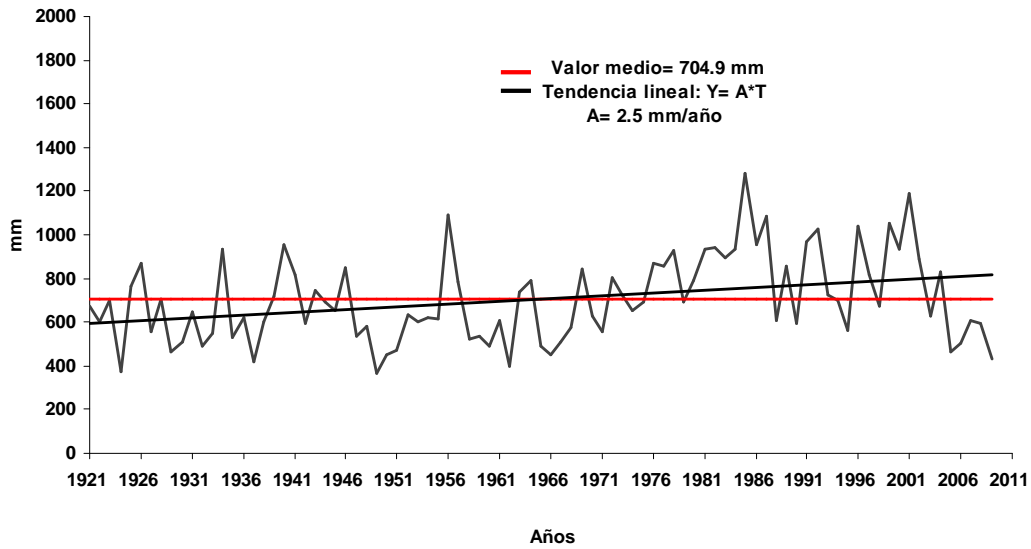


Figura 3.5. Evolución de las precipitaciones para la localidad de Catrilo (L.P) para la serie 1921-2009.

El déficit para el mes de diciembre de 2007 respecto a la serie 1921-2009 fue de -43 mm. Para el mes de diciembre de 2008 se registraron 121 mm de precipitaciones superando en 33,5 mm a la serie histórica.

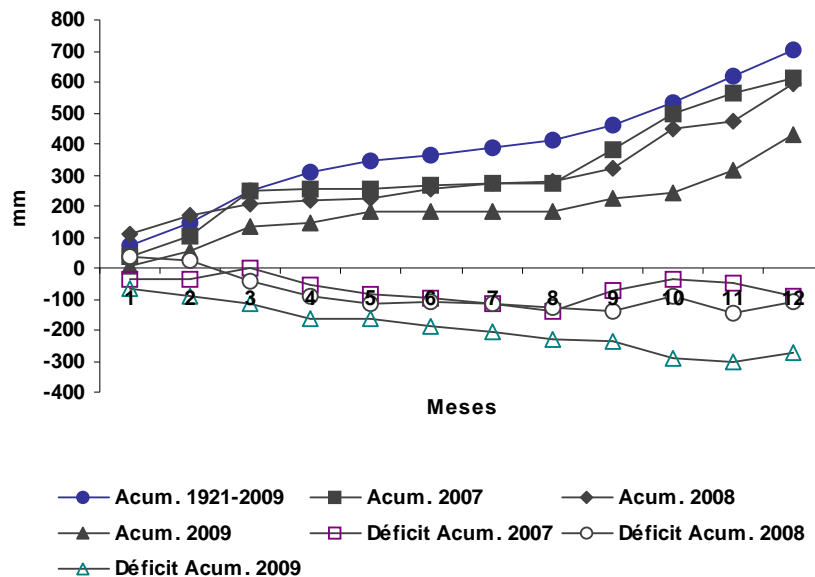


Figura 3.6. Precipitaciones acumuladas para los ciclos 2007, 2008 y 2009; valor medio acumulado para la serie 1921-2009 y déficit acumulado.

La Figura 3.7 muestra la evolución de los valores de IPE 12 para la serie 1921-2009. Para el período 1921-1964 la evolución de los valores negativos de IPE

indicó una mayor frecuencia de ciclos secos que de ciclos húmedos. Para el período 1965-2009 se puede observar una mayor frecuencia de valores de IPE mayores a cero reflejando de esta manera la mayor ocurrencia de ciclos húmedos.

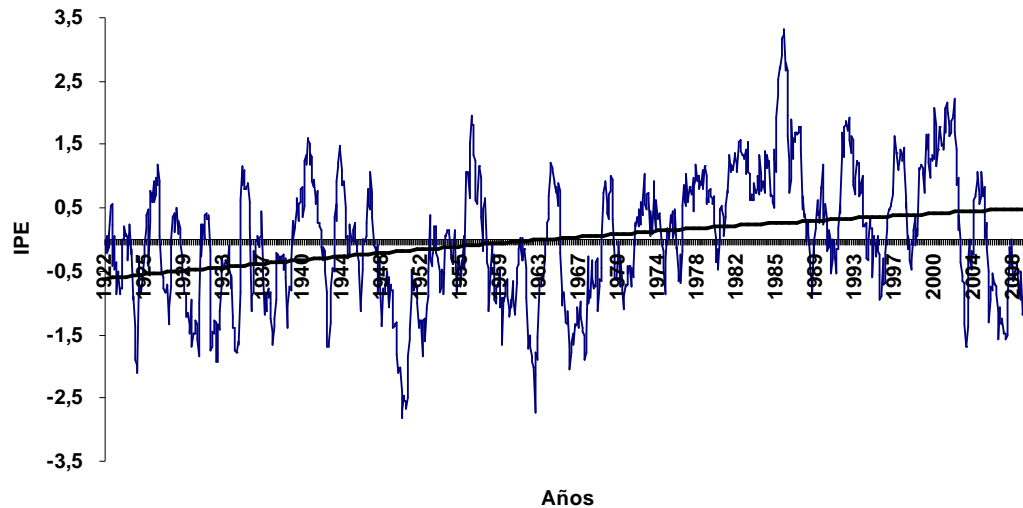


Figura 3.7. Evolución anual del índice estandarizado de precipitaciones (IPE 12) en Catrilo (serie 1921-2009).

Los valores de IPE 12 calculados para la localidad de Catrilo, corresponden el 67 % de casos a valores normales, los periodos moderadamente seco y moderadamente húmedo representan el 9,8 y el 10,8 % de los ciclos analizados. Los extremos húmedos y secos representan el 4,5 y 4,6 %, los valores severamente secos y muy húmedos toman valores de 1,7 y 1,6 % respectivamente.

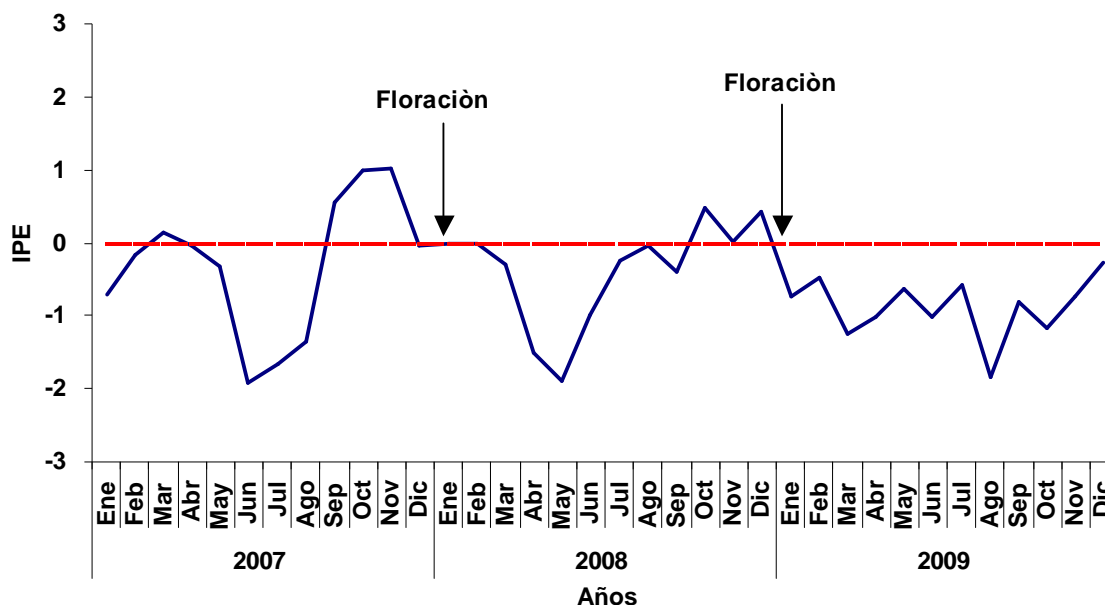


Figura 3.8. Evolución mensual del IPE 3 en Catrilo (L.P). Enero 2007 a diciembre 2009.

El valor del IPE 3 para el mes de diciembre de 2007 y 2008 fue de $-0,05$ y $0,43$ respectivamente, no registrándose según la categorización del IPE restricciones hídricas severas durante el período crítico del cultivo de maíz (Figura 3.8).

3.1.3. Caracterización de las precipitaciones y cálculo del IPE para la localidad de Quemu Quemu.

El estudio de las precipitaciones históricas de la localidad de Quemu Quemu muestra para la serie 1921-2009 un valor promedio de $768,6$ mm, con un incremento para la serie de $4,4$ mm año⁻¹ (Figura 3.9). Del análisis de las precipitaciones, se registraron durante los años 2007, 2008 y 2009 valores de 589 , 796 y 633 respectivamente. El déficit acumulado de los periodos 2007, 2008 y 2009 fue de -181 mm, $+ 26$ mm y -137 mm respecto al promedio de la serie historica de 1921-2009 (Figura 3.10).

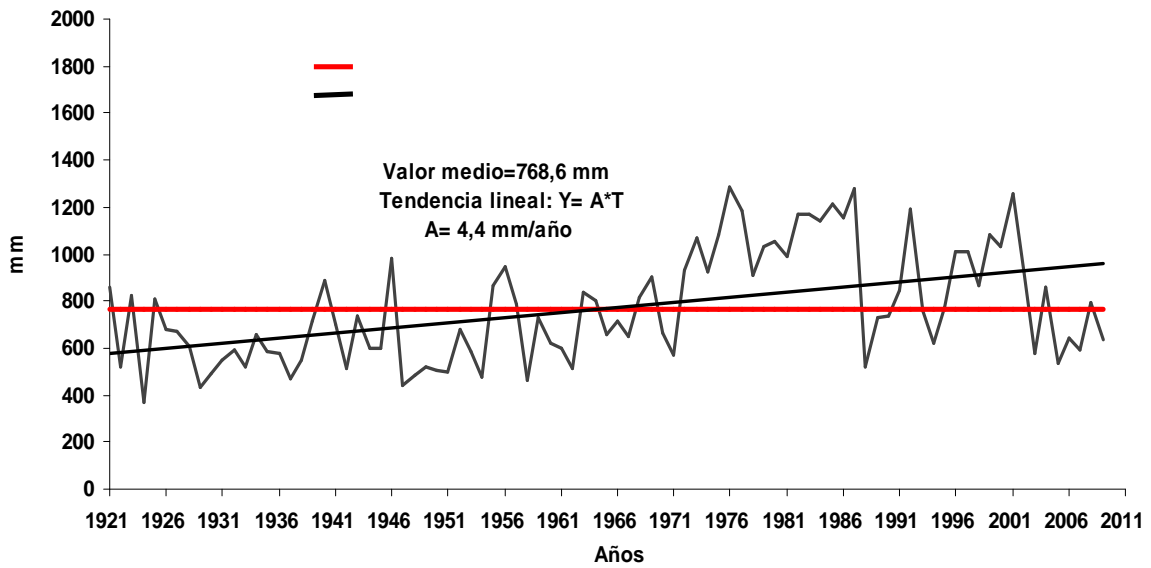


Figura 3.9. Evolución de las precipitaciones para la localidad de Quemu Quemu (L.P) para la serie 1921-2009.

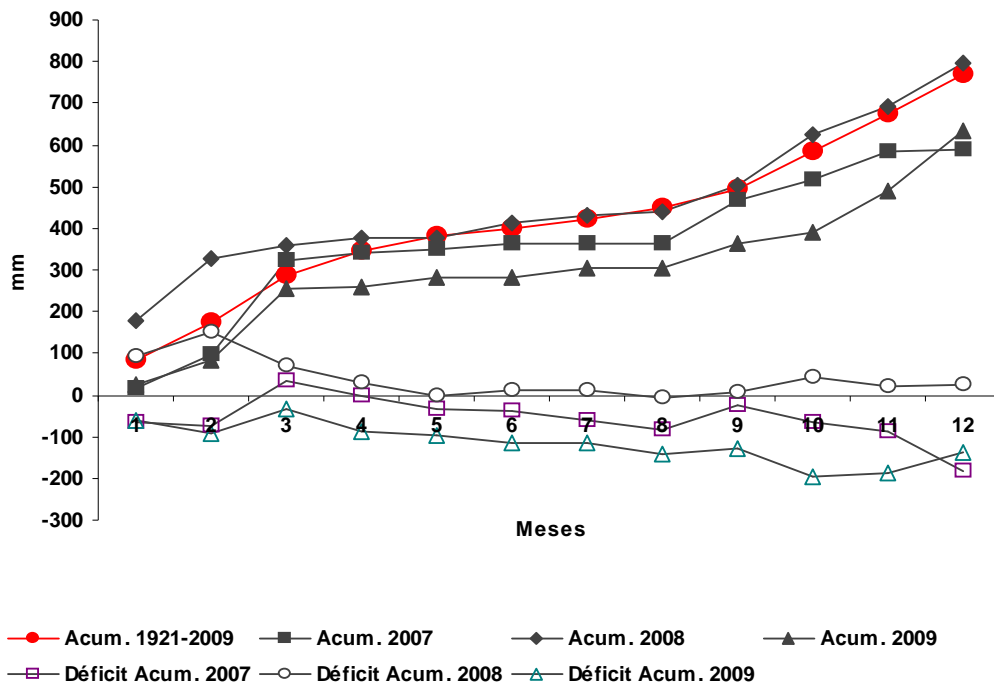


Figura 3.10. Precipitaciones acumuladas para los ciclos 2007, 2008 y 2009; valor medio acumulado para la serie 1921-2009 y déficit acumulado.

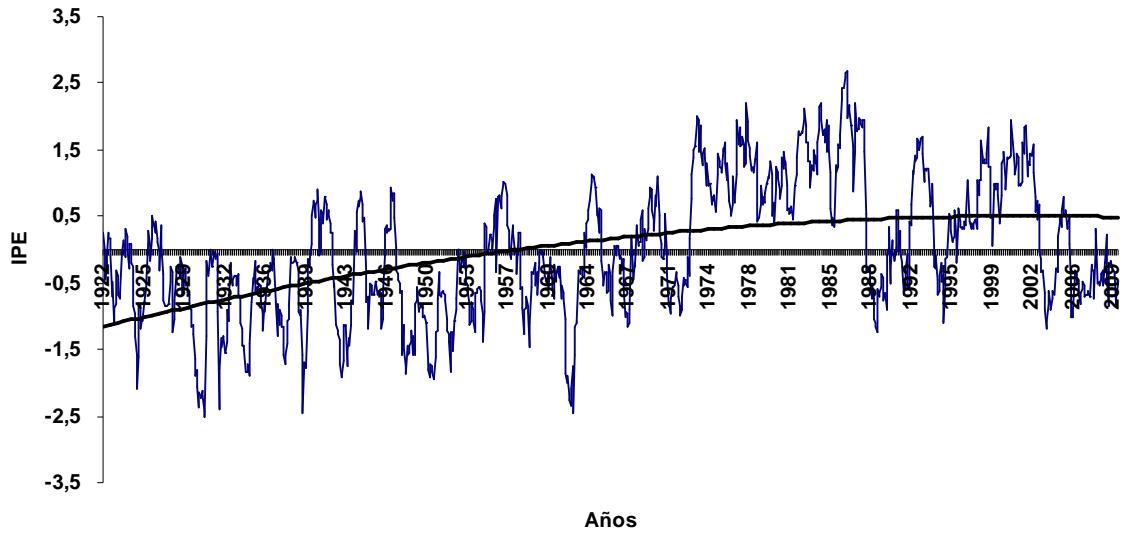


Figura 3.11. Evolución anual del índice estandarizado de precipitaciones (IPE 12) en Quemu Quemu (serie 1921-2009).

La Figura 3.11 muestra la evolución de los valores de IPE 12 para la serie 1922-2009. Para la localidad de Quemu Quemu el análisis de las precipitaciones muestra que el 66 % corresponden a años con registros normales, el 11,1 y 8,3 % son moderadamente húmedos y secos; el 6,7 y 4,9 % son muy húmedos y severamente secos y el 1,3 y el 1,6 % son muy húmedos y extremadamente secos según la categorización del IPE.

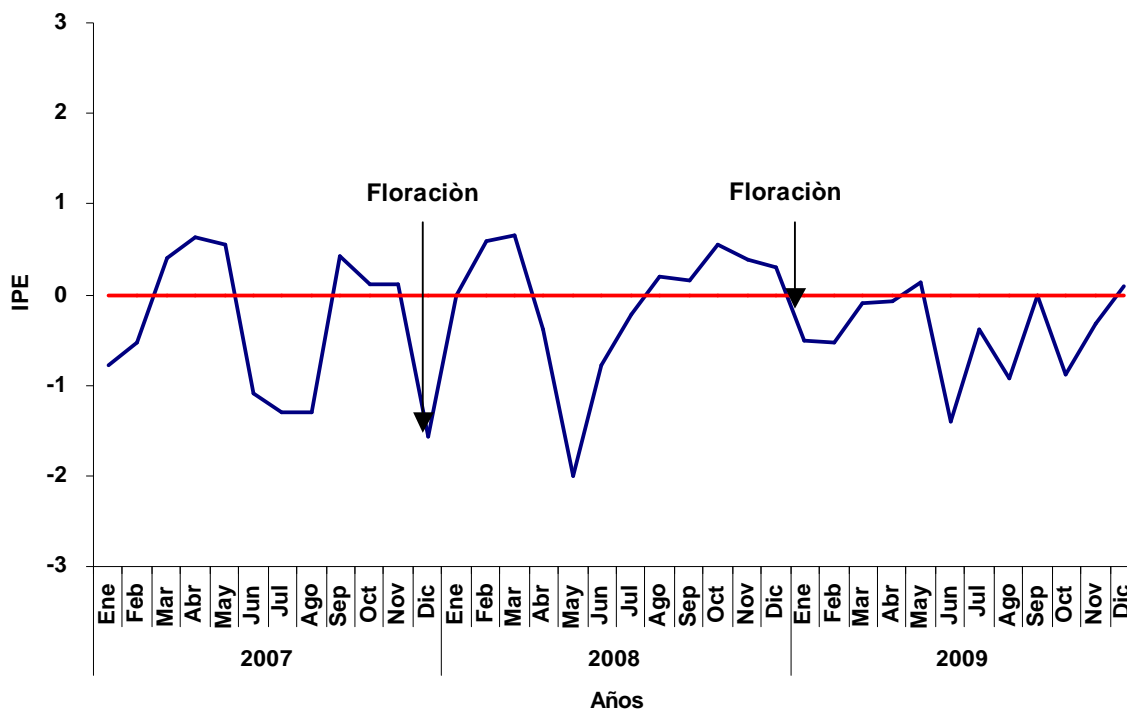


Figura 3.12. Evolución mensual del IPE-3 en Quemu Quemu (L.P). Enero 2007 a diciembre 2009.

El valor de IPE-3 para el mes de diciembre de 2007 fue de $-1,56$ asociándose dentro de la categoría de IPE “severamente seco”. No obstante para el mes de diciembre de 2008, el valor de IPE-3 fue de $0,3$ ubicándose dentro de la categoría de IPE “caso normal” (Figura 3.12).

3.1.4. Caracterización de las precipitaciones y cálculo del IPE para la localidad de Pellegrini (Bs As).

En la localidad de Pellegrini (Bs As) el análisis de las precipitaciones para la serie 1921-2009 muestra un valor promedio de 842 mm, variando entre 438 y 1437 mm y observándose un incremento para la serie de 5.5 mm año^{-1} (Figura 3.13). Para los años en los cuales se condujo la experiencia se registraron valores de 851, 1020 y 846 mm para los años 2007, 2008 y 2009 respectivamente. El déficit acumulado para los años 2007, 2008 y 2009 respecto a la serie 1921-2009 fue de $+9,5$; $+177$ y $+3,7$ mm (Figura 3.14).

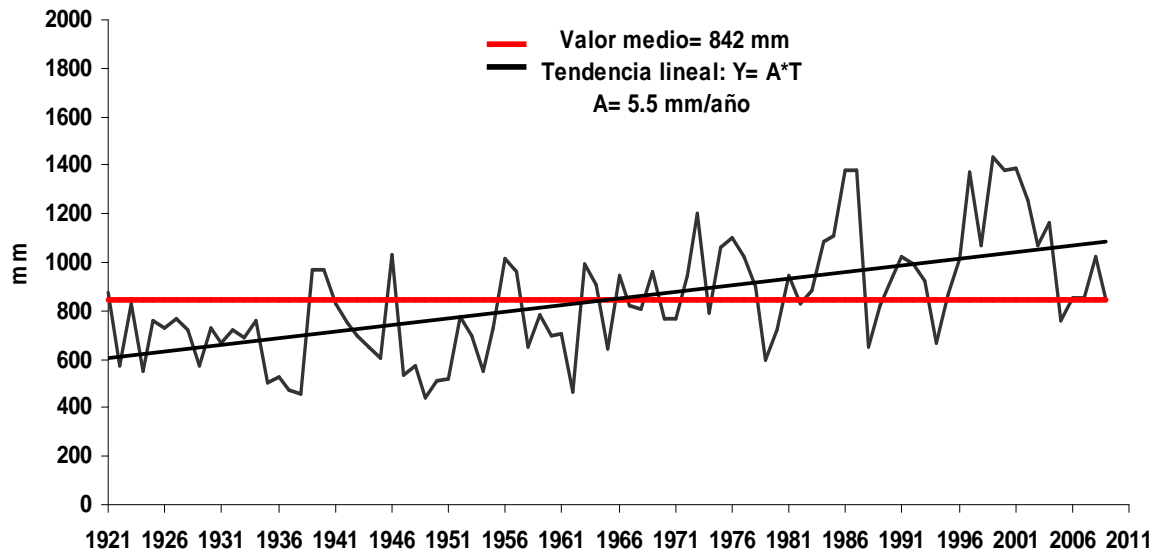


Figura 3.13. Evolución de las precipitaciones para la localidad de Pellegrini (Bs As) para la serie 1921-2009.

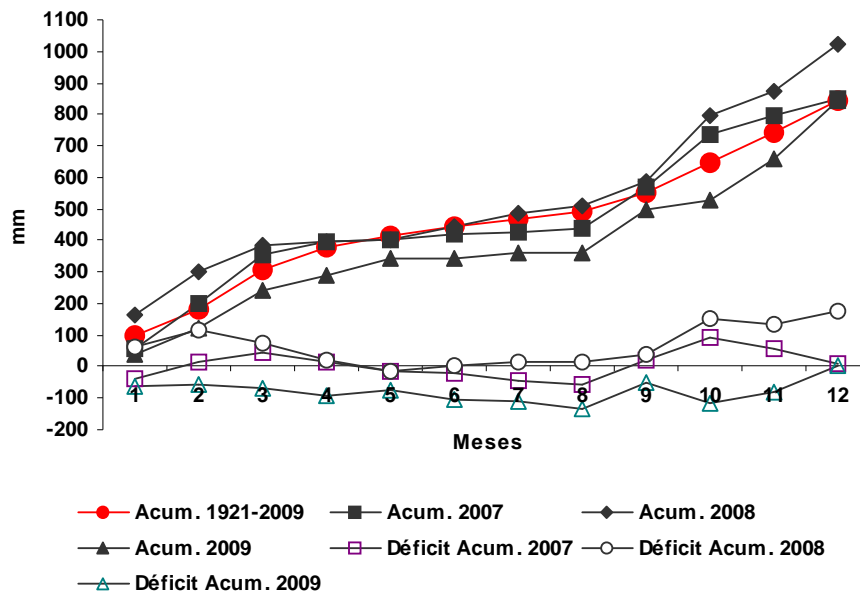


Figura 3.14. Precipitaciones acumuladas para los ciclos 2007, 2008 y 2009; valor medio acumulado para la serie 1921-2009 y déficit acumulado.

La Figura 3.15 muestra la evolución de los valores de IPE 12 para la serie 1922-2009 para la localidad de Pellegrini. El análisis de las precipitaciones muestra que el 68,1 % corresponden a años con registros normales, el 6,5 y 11 % son moderadamente húmedos y secos; el 5 y 4,3 % son muy húmedos y

severamente secos y el 3,9 y el 1,2 % son muy húmedos y extremadamente secos según la categorización del IPE.

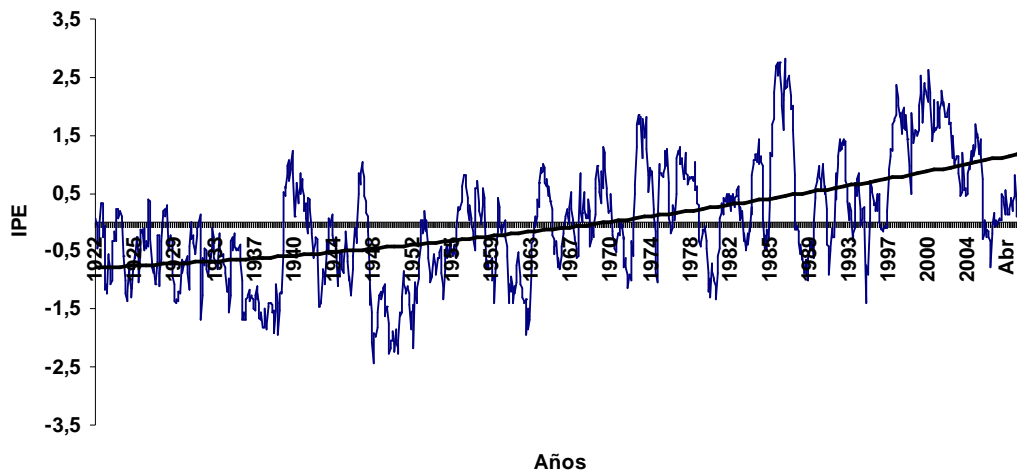


Figura 3.15. Evolución anual del índice estandarizado de precipitaciones (IPE 12) en Pellegrini (serie 1921-2009).

El valor de IPE-3 para el mes de diciembre de 2007 fue de 0,03 asociándose dentro de la categoría de IPE “casi normal”. Para el mes de diciembre de 2008, el valor de IPE-3 fue de 1,12 ubicándose dentro de la categoría de IPE “moderadamente húmedo” (Figura 3.16).

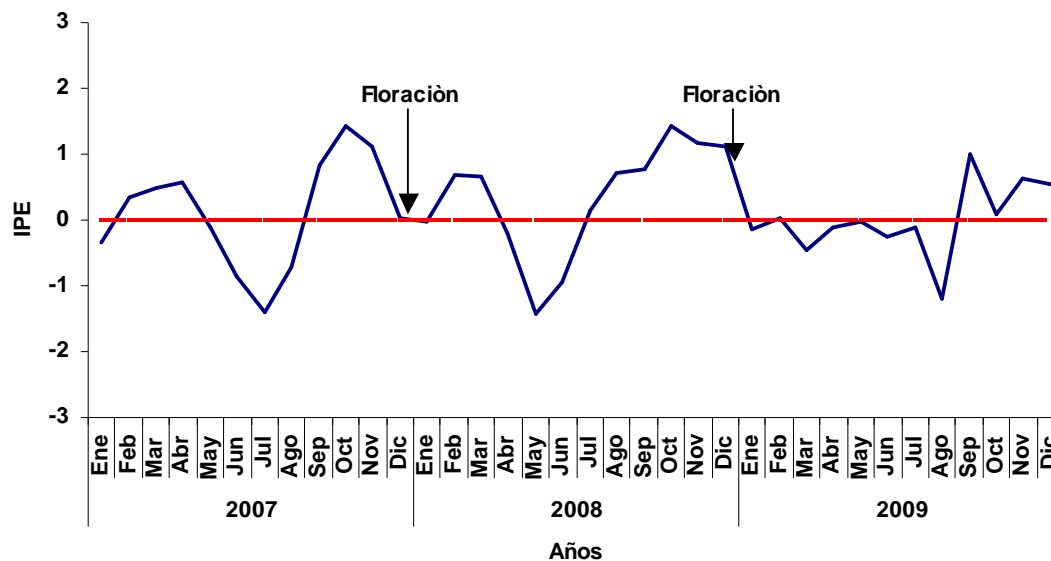


Figura 3.16. Evolución mensual del IPE-3 en Pellegrini (Bs As). Enero 2007 a diciembre 2009.

3.2. Probabilidad de ocurrencia de las precipitaciones para el cultivo de maíz en los sitios bajo estudio.

En relación a los requerimientos hídricos de cultivos de maíz, estudios previos realizados en la región pampeana muestran usos consuntivos de 550 mm (Funaro et al., 2004; Saks et al., 2012a). La Figura 3.17 muestra la probabilidad de las precipitaciones para el período octubre-febrero (serie 1921-2009) para las distintas localidades en donde se condujeron los ensayos de fertilización. La flecha a) y b) en la Figura muestran el valor de probabilidad para la localidad de Catrilo y Pellegrini considerando que la totalidad de los requerimientos hídricos del cultivo (550 mm) deban ser cubiertos por las precipitaciones. En el análisis para las distintas localidades se comprobó que la probabilidad de que las precipitaciones para el período oct-feb cubran el uso consuntivo de maíz fue de 12, 24, 27 y 29 % para las localidades de Catrilo, Quemu Quemu, Agustoni y Pellegrini respectivamente. En base a lo expuesto se infiere que en más del 70% de los años, en la región semiárida y subhúmeda pampeana y en suelos arenosos con baja CRA, las precipitaciones (durante el periodo de cultivo) no cubren los requerimientos de uso consuntivo de los mismos y normalmente limitan el rendimiento y la respuesta a la fertilización (Quiroga et al., 2007).

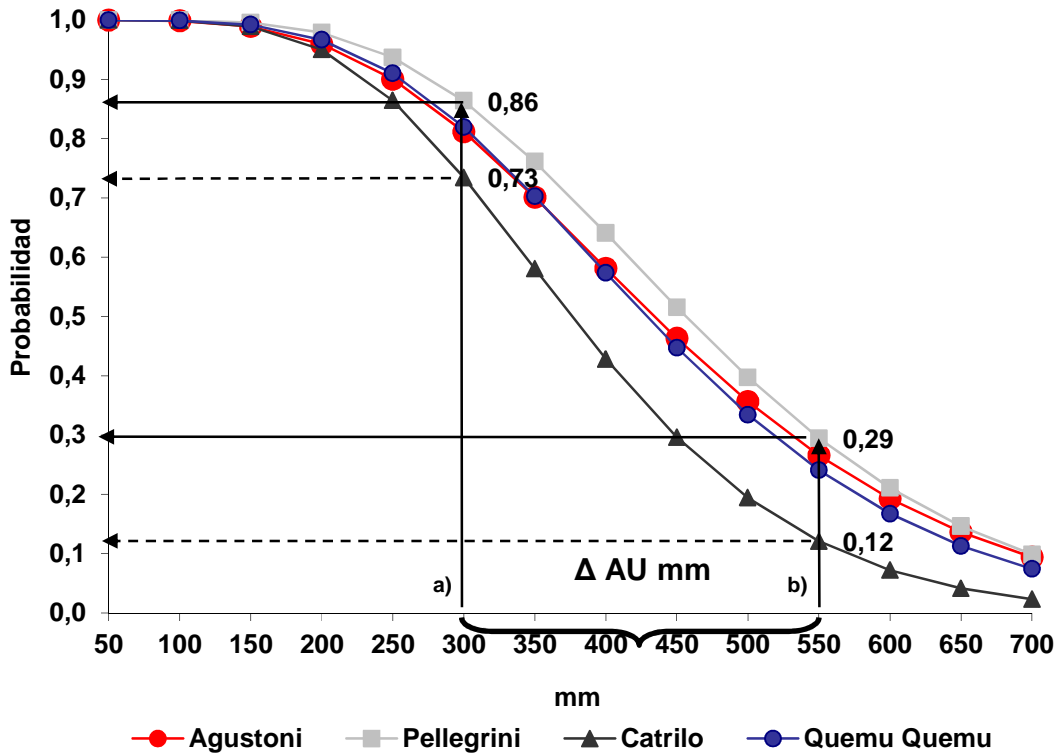


Figura 3.17. Probabilidad de las precipitaciones para cultivo de maíz durante el período del 1 octubre al 28 de febrero para las localidades de Agustoni, Pellegrini, Catrilo y Quemu Quemu. a) Suelo en capacidad de campo + aporte de agua de napa; b) Suelo en punto de marchitez permanente; AU= Agua útil.

Sin embargo, si los suelos se encuentran con el contenido de agua útil a capacidad de campo y con influencia de capa freática (aproximadamente 250 mm de agua disponible) la probabilidad de cubrir el uso consuntivo de cultivos de maíz de alto rendimiento aumenta considerablemente, dado que con precipitaciones de 300 mm durante el ciclo se alcanza un aporte total de 550 mm. En base a lo expuesto, para la localidad de Catrilo y Pellegrini la probabilidad de que las precipitaciones aporten 300 mm durante el período de octubre a febrero es del 73% y 86% respectivamente.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1. Características edáficas de los sitios estudiados.

Al momento de la siembra del cultivo de maíz se evaluaron distintas propiedades edáficas, a fin de caracterizar aspectos físicos, químicos y biológicos del mismo. En regiones semiáridas cobra importancia la variación de propiedades físicas relacionadas principalmente con el régimen hídrico de los suelos (CRA + precipitaciones), ya que inciden de manera directa sobre la disponibilidad de agua para los cultivos. Las Tablas 4.1 y 4.2 muestran las variables edáficas evaluadas al momento de la siembra de maíz para las campañas 2007/08 y 2008/09. Los contenidos de arcilla + limo de los suelos variaron entre 123 y 593 g kg⁻¹, siendo el contenido de arena promedio de 700 g kg⁻¹, con un valor máximo determinado en el sitio 813 de 870 g kg⁻¹. La capacidad de retención de agua del suelo hasta los 2,00 m de profundidad (CRA) varió entre 136 y 335 mm, observándose de similar manera esta amplia variación en los primeros 0,2 m del perfil (entre 14 y 31 mm). Cuando se asoció la CRA de los suelos con el contenido de arcilla + limo, se comprobó una relación positiva entre ambas variables ($R^2= 0,90$; $p<0,0001$). Los contenidos de agua útil al momento de la siembra variaron entre 82 y 518 mm, y se relacionaron positivamente con la CRA 0-2,00 m de los suelos ($R^2= 0,46$, $p<0,0006$). El contenido de materia orgánica varió entre 7 y 30 g kg⁻¹, determinándose un valor promedio para los 22 sitios de 18 g kg⁻¹. Se estableció para los distintos sitios una relación positiva ($R^2= 0,67$, $p<0,0001$) entre el contenido de MO y los contenidos de arcilla + limo. El ajuste entre estas dos variables se realizó mediante el uso de un modelo de asociación exponencial: $MO= a(b - e^{-c(\text{arcilla}+\text{limo})})$, estableciendo el valor derivado de arcilla + limo para determinar el valor crítico de incremento de MO en función de la textura (Figura 4.1).

Tabla. 4.1. Análisis de suelo al momento de la siembra para los 12 sitios evaluados durante la campaña 2007/08. Promedio de tres repeticiones.

Propiedades	Análisis	Profundidad (m)	Promedio	DE	Min.	Max.
FISICAS	Arcilla	0-0,2	59,2 g Kg ⁻¹	38,7	20,0	140,0
	Limo	0-0,2	240,0 g Kg ⁻¹	100,1	103,3	453,3
	Arena	0-0,2	700,8 g Kg ⁻¹	136,3	406,7	876,7
	DA	0-0,2	1,3 g cm ⁻³	0,08	1,15	1,37
		0,2-0,4	1,4 g cm ⁻³	0,06	1,26	1,46
	CRA útil	0-0,2	19 mm	5	14	31
		0-2,0	197 mm	56	136	335
BIOLOGICAS	MO	0-0,2	18,0 g Kg ⁻¹	5,0	7,1	24,9
	MO joven	0-0,2	11,7 Tn ha ⁻¹	4,6	7,0	21,6
	Relac. C/N	0-0,2	9,6	1,0	8,1	11,5
	IMO	0-0,2	6,5	1,6	3,6	8,3
QUIMICAS	NT	0-0,2	1,1 g Kg ⁻¹	0,3	0,4	1,5
		0-0,2	2,8 kg ha ⁻¹	0,6	1,2	3,5
	Pe	0-0,2	11,6 mg kg ⁻¹	6,7	6,3	31,2
	pH	0-0,2	6,6	0,9	5,9	8,9
	Nitratos	0-0,2	59,6 mg kg ⁻¹	7,9	48,8	73,9
		0,2-0,6	45,4 mg kg ⁻¹	3,3	41,3	50,6
		0,6-1,0	46,8 mg kg ⁻¹	4,9	39,4	55,0
	N-NO ₃	0-0,2	33,9 kg ha ⁻¹	4,4	28,5	44,0
		0,2-0,6	55,5 kg ha ⁻¹	4,5	50,3	64,5
		0,6-1,0	52,9 kg ha ⁻¹	5,6	44,5	62,2
	S disp.	0-0,2	9,9 mg kg ⁻¹	3,2	6,8	17,9
		0,2-0,6	9,0 mg kg ⁻¹	2,2	6,7	13,0
		0-0,2	24,6 kg ha ⁻¹	7,4	18,6	43,2
	0,2-0,6	48,3 kg ha ⁻¹	13,1	35,8	74,6	

Por lo tanto, se determinó un valor de 343 g kg⁻¹ de A+L para un valor de la derivada $dY/dX = 0,018$, indicando de esta manera que a medida que se incrementan las fracciones más finas del suelo por encima de 343 g kg⁻¹ de A+L los incrementos en el contenido de MO son de menor magnitud respecto a contenidos menores de A+L. Esta relación positiva y significativa ha sido señalada por distintos estudios y es una característica de las regiones semiáridas y subhúmedas donde la biodisponibilidad de agua es la principal limitante de los rendimientos. A mayor contenido de fracciones granulométricas finas, mayor es la capacidad de retención de agua y consecuentemente mayor es la productividad de los cultivos y de residuos que retornan al suelo dando lugar a mayores contenidos de MO (Quiroga y Funaro, 2004).

Cuando se relacionó el índice de materia orgánica /arcilla + limo (IMO) con los contenidos de arcilla + limo (Figura 4.2), este indicador se relacionó

negativamente con las fracciones más finas del suelo ($R^2=0,53$, $p<0,0001$). En este caso el mejor grado de ajuste se logró con una relación entre las dos variables polinómicas de segundo grado.

Tabla. 4.2. Análisis de suelo al momento de la siembra para los 10 sitios evaluados durante la 2008/09. Promedio de tres repeticiones.

Propiedades	Análisis	Profundidad (m)	Promedio	DE	Min.	Max.		
FISICAS	Arcilla	0-0,2	53,9	g kg ⁻¹	23,9	23,6	110,3	
	Limo	0-0,2	247,0	g kg ⁻¹	85,7	106,7	376,7	
	Arena	0-0,2	699,0	g kg ⁻¹	104,5	513,1	869,7	
	DA	0-0,2	1,2	gr cm ⁻³	0,1	1,1	1,4	
		0,2-0,4	1,3	gr cm ⁻³	0,1	1,2	1,5	
	CRA útil	0-0,2	19	mm	2,7	15,2	23,1	
		0-2,0	192	mm	28,5	145,7	239,7	
BIOLOGICAS	MO	0-0,2	18,5	g kg ⁻¹	5,7	8,5	29,8	
	MO joven	0-0,2	12,3	Tn ha ⁻¹	3,5	7,9	19,1	
	Relac. C/N	0-0,2	12,9		1,2	10,1	14,4	
	IMO	0-0,2	6,4		1,1	4,8	7,7	
QUIMICAS	NT	0-0,2	0,8	g kg ⁻¹	0,2	0,4	1,3	
		0-0,2	2,0	kg ha ⁻¹	0,5	1,1	3,1	
	Pe	0-0,2	21,5	mg kg ⁻¹	11,8	8,0	45,2	
		pH	0-0,2	6,4		0,7	5,9	8,2
	Nitratos	0-0,2	61,0	mg kg ⁻¹	30,4	18,7	114,6	
		0,2-0,6	40,4	mg kg ⁻¹	23,7	9,1	76,2	
		0,6-1,0	27,3	mg kg ⁻¹	16,6	8,5	55,8	
		N-NO ₃	0-0,2	33,9	kg ha ⁻¹	16,3	11,5	61,5
			0,2-0,6	45,6	kg ha ⁻¹	24,0	11,9	74,0
	S disp.	0,6-1,0	30,8	kg ha ⁻¹	18,8	9,6	63,1	
		0-0,2	7,8	mg kg ⁻¹	1,6	5,5	11,4	
		0,2-0,6	7,9	mg kg ⁻¹	2,5	5,8	13,0	
		0-0,2	19,3	kg ha ⁻¹	3,7	14,9	27,0	
0,2-0,6		42,5	kg ha ⁻¹	13,1	30,8	67,3		

Sin embargo cuando se relacionó el IMO con el promedio histórico de precipitaciones para cada sitio no se encontró una asociación entre ambas variables ($p<0,7$). No obstante, se puede observar que aquellos sitios que contienen menos de 300 g kg⁻¹ de arcilla + limo presentaron un valor mayor de IMO, determinándose valores menores del indicador (IMO) en suelos de menor contenido de arena. Esto podría estar relacionado en que los suelos de granulometría más fina, con mayor CRA son normalmente destinados por su mayor potencial a una agricultura continua, con alta presencia de soja en la rotación. La Figura 4.3 muestra el efecto de la CRA sobre los contenidos de

MO de los suelos. Este efecto fue descrito por Quiroga y Funaro (2004) y Quiroga et al., (2006) indicando que variaciones en la CRA y en las precipitaciones condicionan el régimen hídrico de los suelos incidiendo sobre la productividad de los cultivos y el balance de carbono.

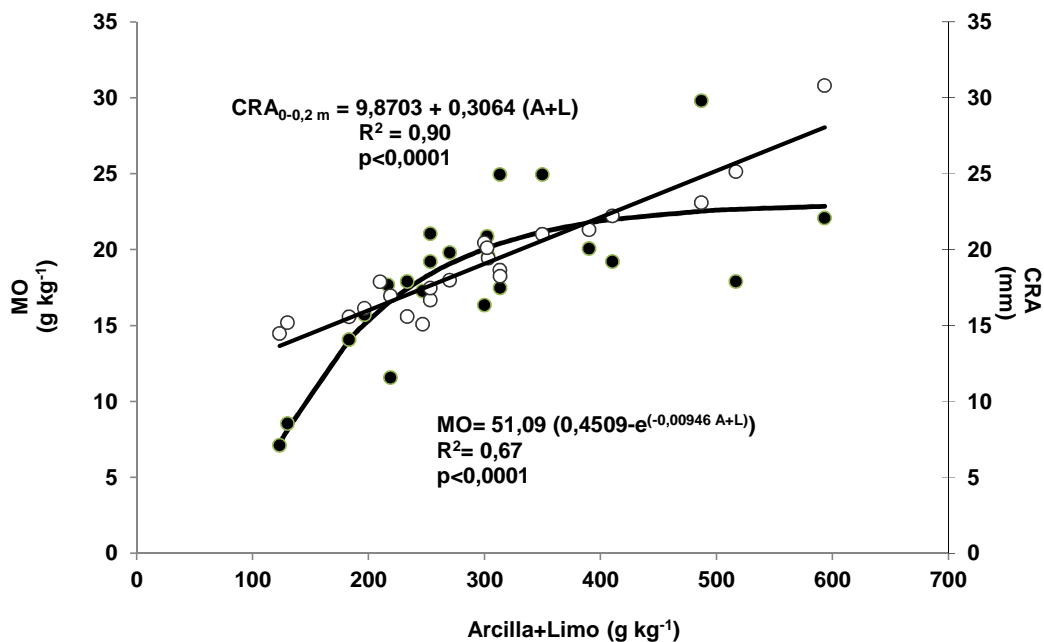


Figura 4.1. Relación del contenido de materia orgánica del suelo (MO) y la CRA útil (0-0,2 m) con el contenido de arcilla + limo de los suelos.

Los niveles de N-nitratos hasta los 100 cm variaron entre 33 y 195 kg ha⁻¹. El valor de P extractable varió entre 6,3 y 45,2 mg kg⁻¹; presentando el 73 % de los sitios niveles menores al rango de 13-18 mg kg⁻¹ descrito como nivel crítico para el cultivo de maíz (Ciampitti et al., 2009). Los valores de S disponible (0-0,20 m) variaron entre 5,5 y 17,9 mg kg⁻¹, presentando una asociación positiva con el contenido de arcilla ($r=0,53$; $p<0,01$) y con la CRA_{0-2,00 m} de los suelos ($r=0,61$; $p<0,002$). No obstante esta variable se asoció de manera negativa con el contenido de arena de los suelos ($r= -0,59$; $p<0,004$).

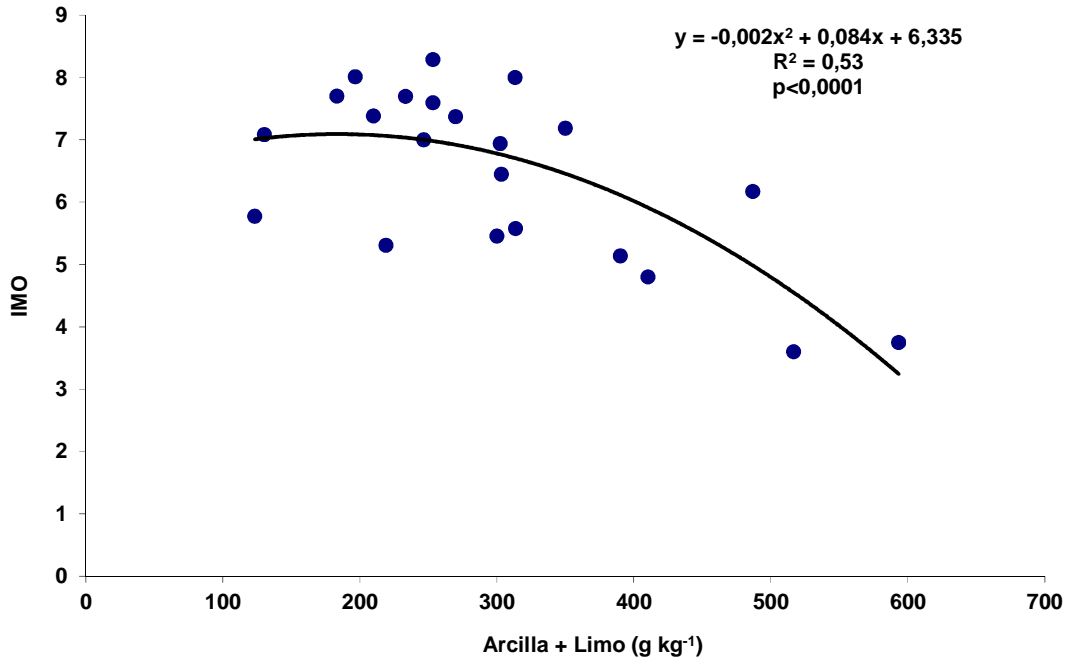


Figura 4.2. Relación entre el IMO y el contenido de arcilla + limo.

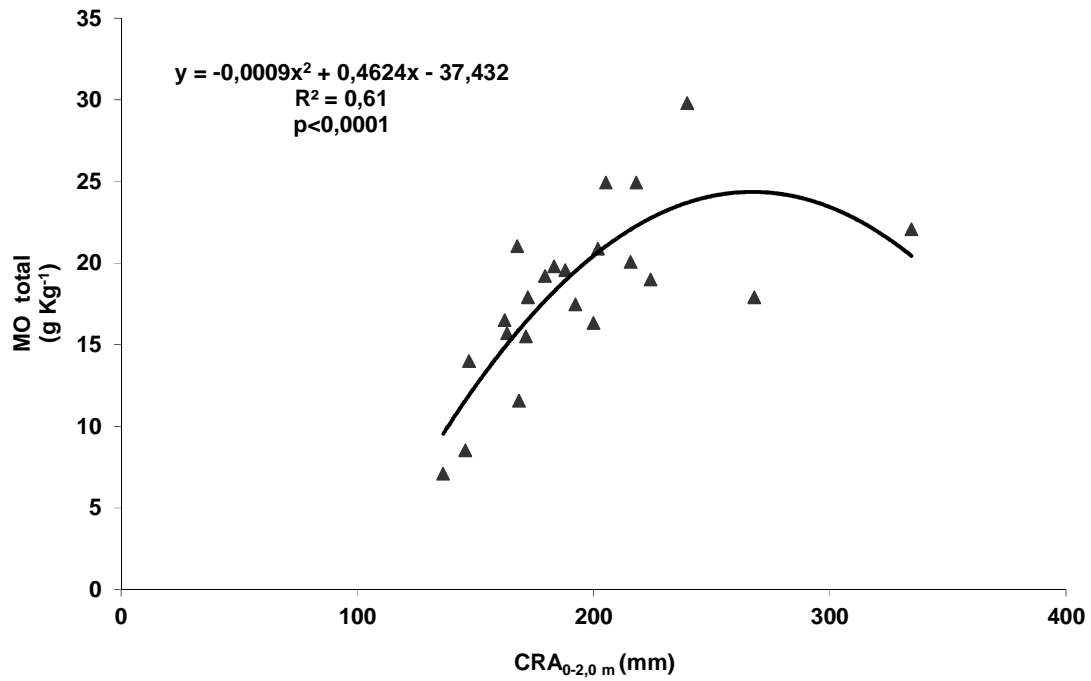


Figura 4.3. Relación entre el contenido de MO y la CRA de los suelos.

La concentración de MO de la fracción < a 50 μm se relacionó positivamente con la CRA de 0-0,20 m ($R^2 = 0,41$; $p < 0,0007$) y de 0-2,0 m ($R^2 = 0,53$; $p < 0,0008$). Esto indicaría que la fracción más estable de MO de los suelos se encuentra estrechamente relacionada con el contenido de las fracciones texturales más finas y con la CRA (Figura 4.4). La formación de complejos arcillo-húmicos es uno de los mecanismos de protección física del carbono. A mayor contenido de arcilla mayor contenido de carbono de esta fracción (Quiroga et al., 1996).

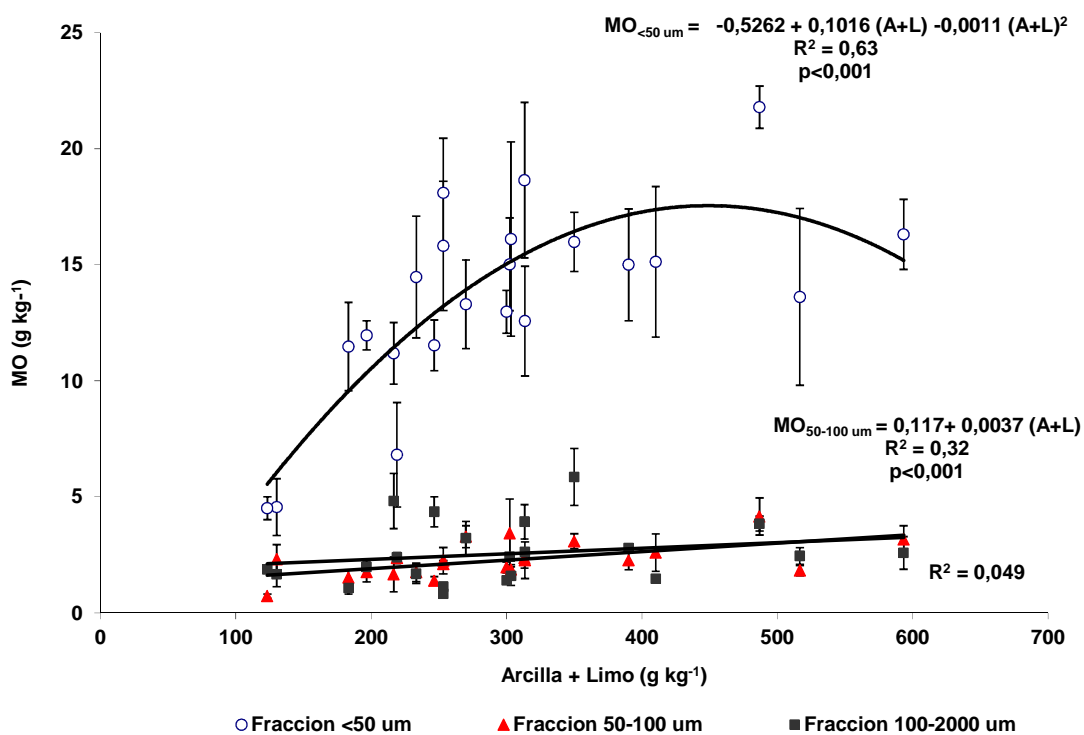


Figura 4.4. Contenido de MO (g kg^{-1}) de la fracción menor a 50 μm , de 50-100 μm y de la fracción 100-2000 μm en función del contenido de arcilla + limo (g kg^{-1}). Las barras verticales indican el desvío estándar de la media de cada punto ($n=3$).

4.2. Efecto de las variables de suelo en sitios con presencia de napa freática

Cuando el nivel del sistema freática es alto y las raíces pueden acceder a ella, la vegetación también puede regular la descarga freática al absorber agua de la misma y transpirar agua de las napas (Jobbágy y Jackson, 2004). El consumo

de agua freática por las plantas tiene lugar cuando la zona de ascenso capilar ubicada encima de la napa es alcanzada por raíces de plantas que experimentan déficit hídrico en estratos más superficiales del suelo. La potencialidad de este aporte depende de varios factores, entre los que se destacan; 1) profundidad de napa y de raíces, definiendo la distancia fuente-destino, 2) textura del suelo, condicionando su capacidad de transporte capilar en el perfil y saturado en el acuífero y 3) salinidad del agua, restringiendo su posible absorción (Jobbágy et al., 2007; Gómez, 2009). Con respecto a profundidad de napa y de raíces, trabajos realizados en la región semiárida pampeana por Saks et al. (2012a) determinaron que genotipos de maíz de ciclo intermedio-largo (CL) podrían desarrollar mayor profundidad y abundancia de raíces (> 1,80 m) respecto a genotipos ciclo corto (CC; 1,30 m). Observaciones similares fueron descritas por Gaggioli et al. (2010), registrando mayor abundancia y profundidad de raíces en híbridos de ciclo de crecimiento más largo. La mayor abundancia y profundidad de raíces observada en genotipos CL, permite inferir que los mayores niveles de rendimiento y respuesta a la fertilización podrían estar asociados a un mayor consumo y captura de agua por parte del cultivo respecto a los genotipos CC. La profundidad de raíces es un factor a considerar para incrementar la biodisponibilidad de agua para los cultivos, resultando importante al momento de elaborar estrategias de manejo que permitan incrementar la captación (suelo + napa) y eficiencia en el uso del agua. En la región de la planicie medanosa del Este de La Pampa es frecuente que a profundidades de 1,00 a 1.80 m los contenidos de agua superen el valor de CRA, situación que tiene lugar por influencia de la napa (Quiroga et al., 2012, Saks, et al., 2012b). Este aspecto junto con la capacidad de almacenaje de agua útil y la profundidad y abundancia de raíces cobra importancia en ambientes o regiones semiáridas ya que condiciona la biodisponibilidad de agua. Las proporciones de las distintas fracciones (arena, limo y arcilla) del suelo además de incidir sobre la capacidad de almacenaje de agua, también tienen efecto sobre el transporte capilar de agua desde la napa hacia las raíces de los cultivos. La Tabla 4.3 presenta una caracterización de las napas comprobándose una importante variación en los contenidos de nutrientes y en parámetros relacionados con la potencial contribución de sales (RAS y conductividad eléctrica).

Tabla 4.3. Contenido de nutrientes en las napas (mg l^{-1}), pH, RAS y profundidad al momento de la siembra del cultivo de maíz. Campañas 2007/08 y 2008/09.

Sitio	pH	C.E (dS m^{-1})	B mg l^{-1}	Na mg l^{-1}	Mg mg l^{-1}	P mg l^{-1}	S mg l^{-1}	K mg l^{-1}	Ca mg l^{-1}	N-NO3 mg l^{-1}	RAS	Fe mg l^{-1}	Cl mg l^{-1}	CO_3^{-2} mg l^{-1}	HCO_3^{-1} mg l^{-1}	Prof. m
2007/08																
729	8,4	2,1	1,3	378	79	0,1	98	57	79	4,7	7,2	0,1	445	0	603	1,2
730	8,7	0,9	0,6	56	88	0,1	3	65	35	3,3	1,2	0,1	257	0	559	1,4
732	9,0	2,8	4,4	647	46	0,4	109	41	19	3,1	19,1	0,1	411	0	1241	0,8
711	8,9	2,4	1,8	610	11	0,8	40	23	21	8,6	27,2	1,4	370	0	1148	1,0
705	8,9	2,7	1,9	665	13	0,1	46	44	26	6,2	27,0	0,2	335	0	1504	0,6
703	8,8	1,7	1,2	347	36	0,1	21	39	24	8,6	11,2	0,5	404	0	955	1,6
2008/09																
800	7,7	2,2	2,2	462	23	0,5	18	31	10	4,4	18,6	0,8	101	73	1196	2,2
804	7,3	1,3	1,1	207	27	0,2	9	219	38	5,6	6,8	2,2	58	83	536	2,6
807	7,8	1,1	0,6	206	31	0,2	13	19	24	1,5	6,6	0,9	35	82	550	2,0
813	7,2	0,6	0,2	23	36	0,8	3	159	51	1,3	0,6	1,2	16	52	343	2,8
814	7,5	1,8	1,7	380	16	0,7	27	241	14	0,6	16,5	0,2	109	241	773	2,0
812	6,9	0,6	0,2	29	30	0,3	3	108	47	0,7	0,8	1,5	14	0	353	2,6
822	8,0	6,7	4,6	1526	22	3,0	265	265	30	0,3	52,7	1,8	1101	259	1840	1,4
823	7,2	1,1	0,9	179	33	0,4	4	68	30	1,0	7,1	0,6	16	58	708	2,8
826	7,4	2,2	1,5	466	12	1,1	17	181	15	0,5	22,6	1,9	96	419	945	2,0
Min.	6,9	0,6	0,2	23	11	0,1	3	19	10	0,3	0,6	0,1	14	0	343	0,6
Max.	9,0	6,7	4,6	1526	88	3,0	265	265	79	8,6	52,7	2,2	1101	419	1840	2,8
Promedio	8,0	2,0	1,6	412	33	0,6	45	104	31	3,4	15,0	0,9	251	84	884	1,8
DE	0,7	1,5	1,3	376	23	0,7	69	86	18	2,9	13,8	0,7	286	125	434	0,7

En la Tabla 4.4 se presentan los modelos de regresión para las distintas variables físico-químicas de las napas determinadas al momento de la siembra de maíz.

Tabla 4.4. Modelos de regresión lineal y coeficientes de determinación (R^2) para las variables CE y RAS según distintas variables regresoras.

Variable		N	Ecuacion	R^2	Valor p
Dependiente	Regresora				
CE	Na	52	$y = 0,57 + 0,0034 x$	0.95	< 0,0001
RAS	Na	52	$y = -0,91 + 0,04 x$	0.86	< 0,0001
CE	RAS	52	$y = 0,844 + 0,069 x$	0.74	< 0,0001
RAS	Ca+Mg	52	$y = 22,16 - 0,15 x$	0.38	< 0,0001
CE	Ca	52	$y = 2,07 - 0,01 x$	0.09	ns
CE	K	52	$y = 1,87 - 0,0018 x$	0.06	ns
CE	Ca+Mg	52	$y = 1,99 - 0,004 x$	0.05	ns
CE	Mg	52	$y = 1,82 - 0,003 x$	0.01	ns

ns= no significativo a $p < 0,001$.

Cuando se analizó la relación entre el RAS y el contenido de Na de las napas, se pudo comprobar aumentos de 0,04 en el valor del RAS por cada unidad de aumento en el contenido de Na en napa. Para la relación entre la CE y el RAS, la CE aumentó $0,07 \text{ dS m}^{-1}$ por unidad de aumento del RAS. Por otra parte, para la relación entre la CE y el contenido de Na se pudo comprobar que el valor de CE aumentó en $0,0034 \text{ dS m}^{-1}$ por unidad de aumento del contenido de Na. Sin embargo, cuando se relacionó la CE con el contenido de Ca, Mg y K se pudo comprobar que cada elemento contribuye en baja proporción al valor total de la CE, siendo el mismo principalmente determinado por el contenido de Na. La Figura 4.5 muestra la relación entre la CE con el contenido de Na de la napa.

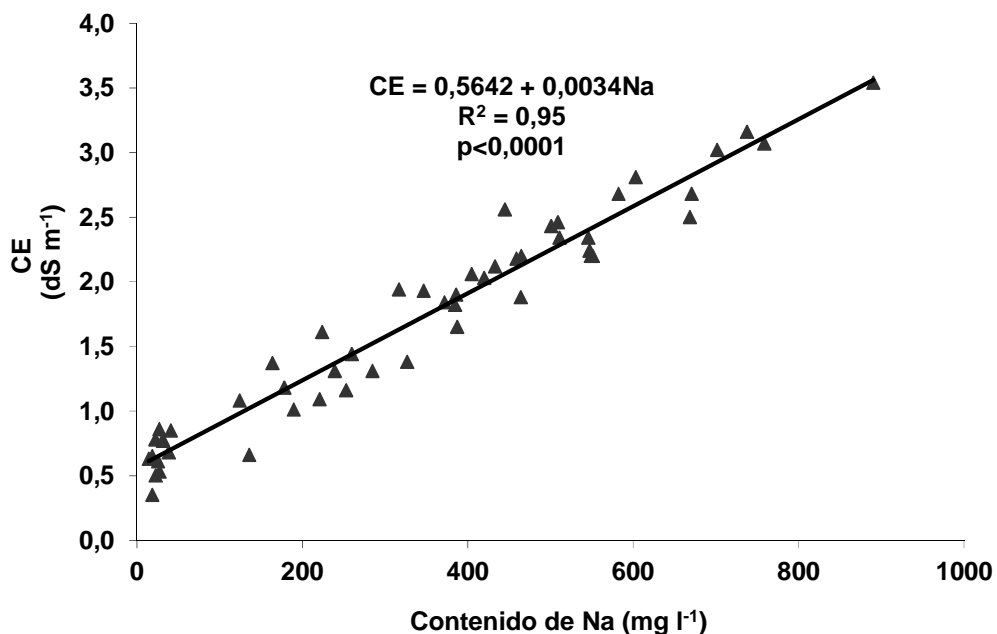


Figura 4.5. Relación entre la CE de la napa en función del contenido de Na.

Como puede observarse en la Tabla 4.4 la variación del contenido de Ca+Mg en la napa solamente ha tenido alguna influencia sobre el RAS pero la misma no incidió sobre la CE. Los valores de CE y RAS se asociaron de manera significativa con los contenidos de arcilla más limo de los primeros 0.20 m de suelo ($p < 0,0001$). Estos resultados coinciden con los encontrados por Pepi et al., (1998) en el Noroeste Bonaerense, quienes comprobaron que el 39 % de la variación en el nivel de salinidad de la napa freática fue explicado por la textura del suelo.

Por medio del análisis multivariado, se establecieron correlaciones entre las distintas variables de calidad de agua de napa freática determinadas al momento de la siembra del cultivo de maíz (Tabla 4.5).

Tabla 4.5. Matriz de correlación, coeficientes de correlación (r) para las distintas variables físico-químicas determinadas en las napas freáticas.

	pH	CE	B	Na	Mg	P	S	K	Ca	N-NO3	RAS	Prof. Napa	Cl	HCO3	CO3	Fe
pH	-															
CE	0,63*	-														
B	0,54*	0,84***	-													
Na	0,62*	0,99***	0,82***	-												
Mg	0,29	-0,26	-0,12	-0,37	-											
P	-0,33	0,14	0,1	0,17	-0,53*	-										
S	0,61*	0,72***	0,74***	0,66**	0,27	-0,14	-									
K	-0,62*	-0,27	-0,22	-0,29	-0,25	0,43	-0,31	-								
Ca	-0,12	-0,37	-0,44	-0,45	0,61*	-0,35	0,2	0,03	-							
N-NO3	0,69**	0,45	0,23	0,46	-0,01	-0,33	0,26	-0,44	-0,03	-						
RAS	0,47	0,9***	0,67**	0,94***	-0,59*	0,37	0,39	-0,16	-0,61*	0,39	-					
Prof. napa	-0,93***	-0,76***	-0,6*	-0,74***	-0,18	0,23	-0,72***	0,51	0,1	-0,55*	-0,6*	-				
Cl	0,92***	0,67**	0,53*	0,62*	0,35	-0,31	0,76***	-0,5	0,12	0,7**	0,42	-0,89***	-			
HCO3	0,63**	0,9***	0,76***	0,92***	-0,39	0,07	0,45	-0,4	-0,59*	0,49	0,91***	-0,69**	0,55*	-		
CO3	-0,45	0,1	-0,01	0,09	-0,43	0,7**	-0,23	0,63*	-0,39	-0,5	0,27	0,28	-0,41	-0,01	-	
Fe	-0,58*	-0,28	-0,34	-0,23	-0,5	0,46	-0,48	0,44	-0,05	-0,08	-0,05	0,54*	-0,54*	-0,3	0,38	-

***, **, * significativo a $P \leq 0,001$, $P \leq 0,01$ y $P \leq 0,05$, respectivamente.

Cuando se relacionó el contenido de N de NO₃ en la napa con la profundidad se observó una relación negativa y significativa ($p < 0,05$). Esto indicaría que el descenso de la napa entre siembra y cosecha de maíz como consecuencia del uso consuntivo también implicaría consumos de nitrógeno, con lo cual la concentración de este nutriente tendería a disminuir durante el ciclo del cultivo. Si bien se observan sitios con distinto comportamiento en cuanto a cambios en la CE, la tendencia general es a disminuir la CE cuando aumenta la profundidad de la napa. Este comportamiento podría estar relacionado con la presencia de sales de Na altamente solubles. De confirmarse esta dinámica de sales resultaría importante considerar que asociado con el ascenso de las napas y por incremento de la CE se incrementan también los riesgos de salinización. No obstante esta tendencia general, en determinados sitios entre la fecha de siembra y cosecha del cultivo, se observó entre la CE y la profundidad de la napa un comportamiento independiente.

El análisis de componentes principales (ACP) y los gráficos conocidos como *biplot* son técnicas generalmente utilizadas para la reducción de dimensión. Las técnicas de reducción de dimensión permiten examinar todos los datos en un espacio de menor dimensión que el espacio original de las variables. Con el

ACP se construyen ejes artificiales (*componentes principales*) que permiten obtener gráficos de dispersión de observaciones y/o variables con propiedades óptimas para la interpretación de la variabilidad y covariabilidad subyacente. Los biplots permiten visualizar observaciones y variables en un mismo espacio, así es posible identificar asociaciones entre observaciones, entre variables y entre variables y observaciones (Balzarini et al., 2008). Las observaciones (puntos filas) que se grafican en una misma dirección que una variable (punto columna) podría tener valores relativamente altos para esa variable y valores bajos en variables o puntos columnas que se grafican en dirección opuesta. Por otro lado, los ángulos entre los vectores que representan las variables pueden ser interpretados en términos de las correlaciones entre variables. Ángulos de 90° entre dos variables indican que ambas variables no se encuentran correlacionadas. Alejamientos de este valor (tanto sea en valores menores como mayores a 90°) implican correlación (positiva o negativa). Es decir, un ángulo cercano a cero implica que ambas variables están fuertemente correlacionadas en forma positiva y un ángulo cercano al ángulo llano entre dos variables indica que ambas muestran fuerte correlación negativa. Cuando las longitudes de los vectores son similares el gráfico sugiere contribuciones similares de cada variable en la representación realizada. En la Figura 4.6 (Biplot) se grafican las correlaciones entre las distintas variables físico-químicas presentes en el agua de napa en el plano de las dos primeras componentes principales.

Como puede observarse en el gráfico, la primera componente (CP1) separa principalmente aquellas variables que determinan la calidad del agua de la napa como por ejemplo RAS, contenido de Na, CE, pH, HCO_3 y elementos tóxicos para los cultivos en cantidades elevadas (Cl y B) de aquellos elementos o variables que condicionarían en menor medida la calidad de un acuífero (Ca, Mg). En estas dos primeras componentes principales (CP1 y CP2) se encuentra representado el 73 % de la variabilidad total en las observaciones.

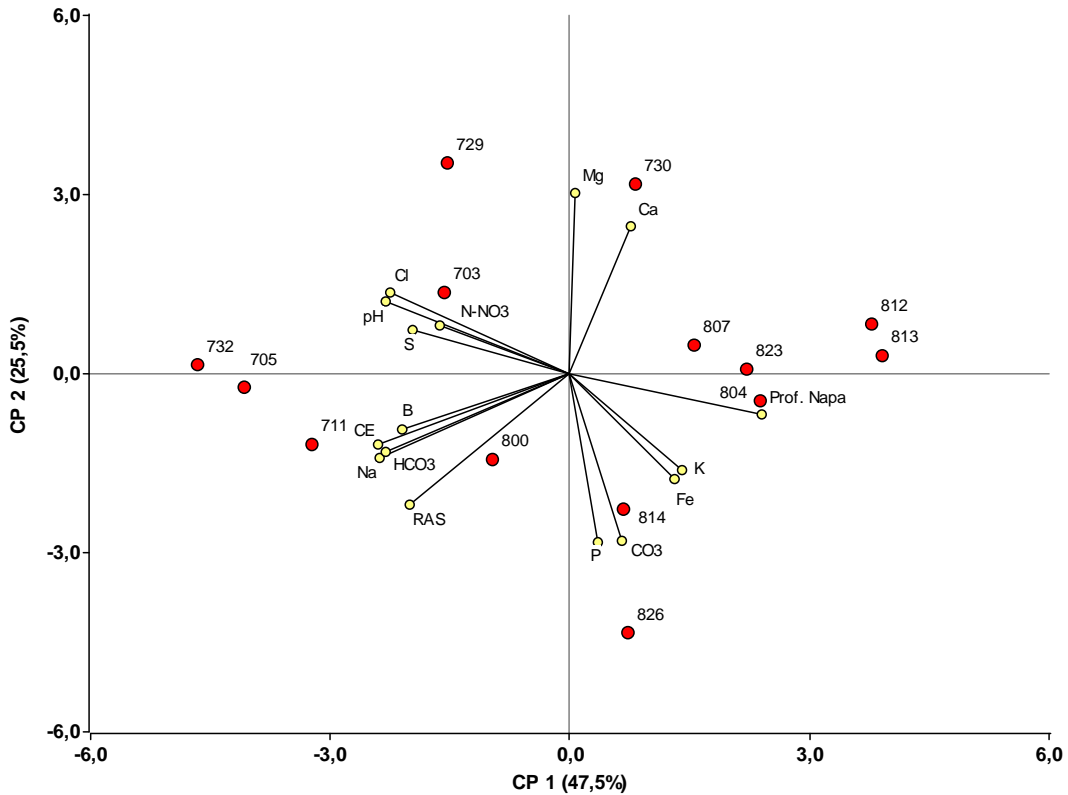


Figura 4.6. Grafico *biplots* para las dos primeras componentes principales de las correlaciones entre las variables físico-químicas de las napas determinadas al momento de la siembra de maíz. El sitio 822 fue excluido del análisis por presentar altos valores de CE ($6,7 \text{ dS m}^{-1}$) y RAS (52,7).

Los autovectores (e_1 y e_2) reportados muestran los coeficientes con que cada variable original fue ponderada para conformar las CP1 y CP2 (Tabla 4.6). Como puede observarse al construir la CP1 las variables CE, Na, Cl, HCO₃ y pH, los coeficientes reciben los valores negativos más altos y la variable profundidad de la napa el valor positivo más alto. De la observación del grafico *biplot* puede interpretarse que en los sitios estudiados en el primer año (serie 700) estarían condicionados en mayor medida por aspectos relacionados con la calidad de la napa. En cambio, en los sitios del segundo año bajo estudio (serie 800) la variable mayor peso fue la profundidad de la napa al momento de la siembra.

Tabla 4.6. Autovectores determinados para conformar las CP1 y CP2 para las distintas propiedades físico-químicas de las napas. Valores positivos subrayados indicarían una mayor variabilidad.

Variables	e1	e2
pH	-0,3185	0,1659
CE	-0,3307	-0,1636
B	-0,2887	-0,1278
Na	-0,3285	-0,1930
Mg	0,0091	<u>0,4189</u>
P	0,0485	-0,3898
S	-0,2719	0,1011
K	0,1938	-0,2222
Ca	0,1049	<u>0,3413</u>
N-NO3	-0,2241	0,1124
RAS	-0,2764	-0,3029
Prof. Napa	<u>0,3307</u>	-0,0939
Cl	-0,3103	0,1869
HCO3	-0,3172	-0,1793
CO3	0,0884	-0,3852
Fe	0,1798	-0,2449

De la misma manera cuando se analizan los autovectores de la CP2, se puede destacar que la mayor fuente de variabilidad la estarían aportando las variables Mg y Ca.

La Tabla 4.7 muestra la clasificación de los sitios CN de acuerdo a distintas propiedades físico-químicas de las napas como así también la posibilidad de aportar agua al cultivo (profundidad de la napa al momento de la siembra). La variable principal que define la influencia de la napa sobre distintos cultivos es la profundidad (Nosetto et al., 2011). De acuerdo a la clasificación propuesta por Jobbagy y Nosetto (2009) y Nosetto et al. (2009) en la banda I (> 5 m) no hay efectos de la napa sobre los cultivos ya que la zona capilar no alcanza a contactar a las raíces. En la banda II (2,4-5 m) el progresivo ascenso de la napa implica capacidades de transporte capilar a las raíces que crecen exponencialmente y por lo tanto aportes y rendimientos que crecen de la misma forma. La banda III (1,4-2,4 m) se alcanza una vez que la capacidad de transporte capilar supera la demanda del cultivo. En este caso mayores ascensos no provocan cambios en los rendimientos, ya que habrían alcanzado el óptimo esperable en condiciones de un abastecimiento hídrico ideal. Por ultimo en la banda IV (<1,4 m), se define un umbral muy crítico para el cultivo de maíz por encima del cual el sistema de raíces empieza a anegarse y el cultivo empieza a perder rendimiento. La banda III toma un rango de

profundidades óptimas para el cultivo de maíz de 1,4 a 2,4 m. En base a este rango de profundidades, 7 sitios sobre un total de 22 estarían ubicados dentro de la banda I. Para el caso de los sitios con napa, 11 sitios se encuentran dentro del rango de bandas II y III y solamente 4 sitios se ubicaron dentro de la banda IV. Esto indica que el 73 % de los sitios CN podrían contribuir con el aporte de agua al uso consuntivo del maíz, y dentro de los mismos el 47 % se ubicarían en la banda III pudiendo alcanzar mayores niveles de rendimiento respecto a sitios SN. Por otro lado, el 27 % de los sitios CN evaluados se encontrarían dentro del rango de la banda IV indicando de esta manera cierto condicionamiento de su desarrollo y una disminución de la productividad del cultivo tanto por condiciones de anegamiento como por salinidad. Por otra parte se analizó y se clasificó a los sitios CN de acuerdo al contenido de B en el agua de la capa freática, observando que el 20 % de los sitios estudiados estarían por encima del umbral de 2 mg l^{-1} de B (Bañuelos et al., 1999; FIA 2009) por encima del cual se podrían observar disminuciones de la productividad del cultivo. De acuerdo a los valores de CE, en el 20 % de los sitios el contenido de sales presente en el agua de la napa freática podría incidir sobre el rendimiento del cultivo produciendo pérdidas mayores al 25 %. Por otra parte, en el 80 % de los sitios CN los contenidos de sales presentes en la freática podrían condicionar entre el 10 y 25 % del rendimiento (6 sitios) o en su defecto, no afectar la productividad del cultivo (6 sitios). De similar manera, los valores de CE en el extracto de saturación estarían indicando que el aporte de sales desde la napa hacia horizontes superiores del suelo sería relativamente bajo. Este aspecto cobra importancia en varias zonas de la región pampeana, por ejemplo en el centro-sur de Córdoba donde existen entre 1,5 y 2,2 millones de hectáreas que están sometidas a procesos de hidrohalomorfismo, donde la principal limitación es una capa freática conectada con la superficie (Angeli et al., 2006).

Tabla 4.7. Clasificación de las napas según niveles de profundidad (m), tolerancia al Boro (mg l^{-1}), RAS, CE del suelo, agua gravitacional (mm) y CE del agua.

Sitio	Bandas (m) ¹			Toxicidad al Boro ² (mg l^{-1})			RAS ³				CE (dSm^{-1}) ^{4,5}		Aporte de agua gravitacional ⁶					
	II	III	IV	Baja	Media	Alta	S1	S2	S3	S4	Extrato de saturación		Napa					
	2450	1424	<1,4	<2	24	>4	0-10	10-18	18-26	>26	<0,7	0,7-3,0	<1,7	1,7-25	>25	<100mm	100-200mm	>200mm
703		x		x				x			x			x				
705			x	x					x			x			x			x
711			x	x					x			x					x	
729			x	x			x				x		x				x	
730		x		x			x				x		x				x	
732			x			x			x		x				x		x	
800		x			x				x		x			x			x	
804	x			x			x				x		x				x	
807		x		x			x				x		x				x	
812	x			x			x				x		x				x	
813	x			x				x			x		x				x	
814		x		x			x					x		x			x	
822		x				x				x		x			x		x	
823	x			x			x				x		x				x	
826		x		x					x		x			x			x	

¹Bandas de profundidad para el cultivo de maíz adaptado de Nosetto et al., 2009. ² Adaptado de Bañuelos et al., 1999. ³ Richards L.A. (1954). ⁴ Ayers, R.S. y Westcot, D.W. (1985). ⁵ Nivel de CE para producir disminución del rendimiento García (2012) adaptado de Maas and Hoffman (1977) y Maas (1984). ⁶ Contenido de agua gravitacional al momento de la siembra.

Los contenidos de agua total al momento de la siembra variaron ampliamente entre sitios (185 y 844 mm) con un valor promedio de 400 mm hasta los 200 cm de profundidad (Tabla 4.8). De similar manera asociado a las fracciones más finas del suelo se observó una amplia variación en los contenidos de agua a capacidad de campo (240-609 mm). En los sitios con presencia de napa freática al momento de la siembra del cultivo de maíz se determinaron contenidos de agua total que variaron entre 247 y 844 mm respecto a sitios sin presencia de napas (185-330 mm).

Tabla 4.8. Contenido de humedad (%) cada 0,20 m, lamina total en mm al momento de la siembra y contenido de agua a capacidad de campo (CC) para los distintos sitios hasta los 2,00 m de profundidad.

SITIO	Profundidad (m)										CC mm	Lamina Total mm
	0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0	1,0-1,2	1,2-1,4	1,4-1,6	1,6-1,8	1,8-2,0		
703	15,1	16,5	15,6	15,3	15,5	17,3	18,6	18,6	18,6	18,6	390	456
705	23,1	30,0	30,4	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	29,9	563	844
707	7,2	7,4	7,8	7,5	7,3	7,1	6,8	6,8	6,8	6,8	240	185
711	23,2	22,5	21,8	21,0	27,3	27,3	34,0	34,0	34,0	34,0	609	702
713	13,0	12,1	11,5	10,3	9,7	9,6	8,9	8,5	8,9	8,8	320	266
719	14,0	11,9	10,9	10,6	9,6	9,5	9,6	9,6	9,6	9,6	339	264
721	14,5	13,6	13,0	12,7	13,0	12,6	13,0	13,0	13,0	13,0	376	330
724	15,2	13,9	12,2	12,1	11,9	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	384	323
725	10,5	10,2	9,0	8,6	7,9	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	289	234
729	13,6	12,7	12,9	13,7	16,8	21,0	22,5	22,5	22,5	22,5	296	457
730	13,7	14,2	13,7	13,2	13,3	14,1	15,3	22,0	24,0	24,0	334	433
732	18,6	18,9	19,7	20,4	21,9	21,5	22,2	22,2	22,2	22,2	417	527
800	17,1	14,4	14,0	13,0	12,0	11,4	12,3	15,2	18,2	19,7	345	377
804	15,6	13,6	11,9	9,9	9,9	9,5	9,5	9,7	10,3	16,5	325	295
807	16,1	14,2	13,6	13,5	13,1	13,0	13,6	17,2	21,1	23,0	357	403
812	11,8	11,2	10,6	10,7	10,7	10,2	10,3	10,0	14,1	17,8	314	298
813	9,5	10,0	9,3	9,0	9,3	9,0	9,0	8,9	9,4	11,4	247	247
814	14,7	12,4	11,8	11,4	11,4	11,4	12,7	18,1	21,9	23,7	386	374
818	15,3	13,2	12,6	12,1	10,9	10,2	10,0	9,7	9,1	8,1	381	283
822	18,0	24,0	24,8	24,4	26,0	26,6	26,1	28,0	28,0	28,0	472	647
823	21,1	18,0	17,4	15,4	14,6	13,8	13,7	13,4	15,2	17,1	519	394
826	16,8	15,1	14,9	14,4	14,7	15,9	18,1	21,5	23,7	24,4	450	452

CAPITULO V

RESULTADOS

5.1. Caracterización de los perfiles hídricos y efecto de la fertilización sobre variables de cultivo.

En la Tabla 5.1 se presentan los contenidos de agua útil y nitrógeno disponible al momento de la siembra del cultivo de maíz, observándose un amplio rango de variación en ambas variables. Los contenidos de agua útil a 1,0 m variaron entre 46 y 245 mm, determinándose un valor promedio de 96 mm. Para la profundidad de 1,00 a 2,00 m el valor promedio fue de 116 mm, variando entre 30 y 273 mm. Por otro lado, se comprobó tanto en la profundidad de 0-1,00 m como 1,00-2,00 m que los contenidos de agua útil fueron superiores en los sitios con presencia de napa (115-517 mm), respecto de los sitios sin napa (82-154 mm). La disponibilidad de $N-NO_3$ (0-1.00m) a la siembra varió entre 33 y 195 $kg\ ha^{-1}$. En los sitios de mayor CRA la disponibilidad de $N-NO_3$ en los primeros 0.20 m se relacionó de manera significativa con los contenidos de agua útil al momento de la siembra y con la MO ($R^2= 0,74$). En los sitios sin napa (SN), los contenidos de $N-NO_3$ (0-1.00m) se relacionaron positivamente con los contenidos de MO joven determinada en la fracción granulométrica 50-2000 μm y con la relación C/N de la MO del suelo, correspondiente a los primeros 0,20 m del perfil.

$$N-NO_3\ (0-1,00\ m\ siembra) = 86,7 + 1,25\ MOJ\ Tn/ha\ (50-2000\ \mu m) + 3,95\ C/N.$$

$$R^2 = 0,96; p < 0,001$$

En la Tabla 5.2 se presentan los valores de agua útil, uso consuntivo y contribución hídrica total de la napa para los tratamientos testigos y fertilizados. Como se puede observar, los contenidos de agua útil a la siembra del cultivo variaron entre sitios, desde 82 hasta 518 mm. Los contenidos mayores de AUS se determinaron en los sitios con capas freáticas alcanzando un valor medio de 260 mm, con un rango de variación entre 115 y 518 mm. No obstante, este

valor promedio de AUS fue menor en los sitios sin napa (109 mm), variando entre 82 y 154 mm.

Tabla 5.1. Contenidos de agua útil (mm de 0-1,00 m y 1,00-2,00 m) y contenido de N-NO₃ (kg ha⁻¹) en suelos destinados al cultivo de maíz para los 22 sitios estudiados.

SITIO	Agua útil (mm)		Total	N-NO ₃ (kg ha ⁻¹)			Total
	0-1,0 m	1,0-2,0 m		0-0,2 m	0,2-0,6 m	0,6-1,0 m	
703	101	155	256	34	55	50	139
705	245	273	518	32	65	60	156
707	46	36	82	34	52	44	131
711	156	271	427	32	59	58	149
713	77	41	117	33	61	48	142
719	58	35	93	29	51	52	131
721	80	74	154	32	51	51	134
724	70	57	127	44	50	49	143
725	51	33	84	30	53	49	131
729	112	212	325	39	55	59	153
730	87	172	259	30	54	53	138
732	152	177	329	38	59	62	159
800	100	111	212	29	27	28	84
804	79	63	142	19	22	15	55
807	95	135	229	17	46	54	117
812	68	84	153	30	17	13	60
813	75	70	146	11	12	10	33
814	57	123	180	61	70	63	195
818	74	30	103	46	74	37	157
822	179	220	399	29	66	12	107
823	73	42	115	51	62	36	149
826	75	143	217	46	60	41	147
Max.	245	273	518	61	74	63	195
Min.	46	30	82	11	12	10	33
Promedio	96	116	212	34	51	43	128

En los sitios evaluados, la fertilización con nitrógeno prácticamente no tuvo influencia sobre la evapotranspiración total del cultivo, determinándose un valor de 503 mm para los tratamientos testigos y 511 mm para los tratamientos fertilizados. Esta diferencia fue similar cuando se analizaron separadamente los sitios con y sin influencia de napas, comprobándose incrementos por efecto de la fertilización nitrogenada del 1,2 % en los sitios CN y 1,5 % en los sitios SN. No obstante, el UC en los sitios SN (testigo) fue superior en un 11 % respecto a los sitios CN. Durante la primera parte del crecimiento del cultivo (siembra-floración), las precipitaciones cubrieron en una baja proporción el UC, registrándose una significativa disminución del contenido de agua útil en el

perfil de suelo evaluado (0-2,00 m). En la segunda etapa del cultivo (floración-madurez fisiológica) las precipitaciones resultaron similares al UC y en algunos casos fueron levemente superiores, dando lugar en algunos sitios a un balance hídrico positivo. Golberg et al. (2011) señalan que las necesidades de utilización del agua del suelo se acentúan en torno a las fases reproductivas, cuando el área foliar es máxima y por consiguiente también la superficie transpirante.

Tabla 5.2. Contenido de agua útil (mm), uso consuntivo (mm) y contribución hídrica de la napa (CHN) para los tratamientos testigo (T) y fertilizado (120 kg de N ha⁻¹) en 22 sitios destinados al cultivo de maíz.

SITIO	AÑO	Agua útil (mm)				Uso consuntivo (mm)						CHN (%)			
		Siembra	Floración		Cosecha		Siembra-Floración		Floración-Cosecha		Total		Total		
			T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	T	F	
703	I	256	130	116	160	151	262	277	228	219	490	496	23	24	
705		518	351	334	350	356	450	468	136	112	586	580	43	44	
707		82	31	32	29	21	317	316	168	183	484	499	0	0	
711		427	419	417	427	374	446	448	91	142	537	590	4	30	
713		117	72	75	103	98	499	490	52	65	550	555	0	0	
719		93	37	36	32	22	401	404	188	202	589	606	0	0	
721		154	93	90	60	56	355	360	186	187	540	547	0	0	
724		127	125	128	211	205	331	328	220	229	551	557	0	0	
725		84	10	11	71	54	442	442	221	242	664	684	0	0	
729		325	186	169	153	153	330	347	143	126	472	472	55	46	
730		259	110	120	87	82	343	333	134	148	477	482	33	34	
732		329	207	201	168	155	313	319	138	144	451	463	38	33	
800		II	212	106	99	225	230	282	289	177	165	459	454	9	9
804			142	29	23	138	120	299	307	177	187	476	494	5	5
807	229		151	164	242	256	256	242	204	204	460	446	9	11	
812	153		60	64	72	77	238	232	232	232	470	464	8	8	
813	146		101	70	108	78	188	219	239	238	427	456	6	4	
814	180		115	122	60	60	223	216	287	293	509	510	15	14	
818	103		8	9	127	135	297	289	95	95	392	384	0	0	
822	399		310	306	385	402	324	329	206	187	529	515	17	18	
823	115		106	102	153	136	245	250	207	219	452	469	1	1	
826	217		226	218	202	195	223	233	282	279	505	512	5	7	
Max.		518	419	417	427	402	499	490	287	293	664	684	54,6	46,2	
Min.		82	8	9	29	21	188	216	52	65	392	384	0,0	0,0	
Promedio		212	136	132	162	155	321	324	182	186	503	511	12,3	13,1	

La contribución hídrica de la napa (CHN) media fue del 13 % alcanzando valores máximos de aporte al UC del cultivo de maíz del 55 %. Estos valores de extracción de agua requerida por el cultivo de maíz se ubican dentro del promedio del 18 % reportado por Babajimopoulos et al. (2007) y del 70 % reportado por Sepaskhah et al. (2003). El periodo siembra-floración presentó valores mayores de CHN (13 %) respecto al periodo floración-cosecha (6,3 %), coincidiendo con el período de menores precipitaciones y con un marcado

balance hídrico negativo. En concordancia con ello, la mayor CHN se presentó en los tratamientos fertilizados con nitrógeno durante el período siembra-floración (43,8 %), mientras que la menor CHN se registró en el periodo floración-cosecha (28 %).

La biomasa aérea total y el rendimiento de grano variaron ampliamente entre los distintos sitios y niveles de fertilización nitrogenada (Tabla 5.3 y 5.4). Durante el primer año de estudio se registraron por efecto de la fertilización, incrementos significativos ($p < 0,1$) en la producción de biomasa aérea (7 sitios), y en el rendimiento de grano (9 sitios). Para el análisis de la campaña 2008/09, se registraron incrementos estadísticamente significativos ($p < 0.1$) por efecto de la fertilización con nitrógeno en 3 sitios para la variable biomasa área y en 2 sitios para la variable rendimiento. Esto indica que la fertilización incremento la producción de biomasa aérea y el rendimiento de grano en el 58 y 75 % de los sitios experimentales en el primer año. Sin embargo, en el segundo año debido a una mayor profundidad de la napa, se pudieron comprobar incrementos significativos de la producción de biomasa aérea y del rendimiento de grano por efecto de la fertilización, tan solo en el 30 % y en el 20% de los sitios respectivamente.

El rendimiento promedio durante el primer año fue de 7800 kg ha^{-1} (rango de 829 a 18113 kg ha^{-1}) y de 7127 kg ha^{-1} para el segundo año (rango de 112 a 11935 kg ha^{-1}). En los sitios CN se alcanzó un mayor rendimiento promedio de 9212 kg ha^{-1} (rango de 2566 a 18113 kg ha^{-1}), mientras que en los SN el rendimiento promedio fue menor (3814 kg ha^{-1}) presentando también un menor rango de variación (112 a 8017 kg ha^{-1}). La mayor cantidad de sitios con respuesta significativa a la fertilización nitrogenada para ambas variables (biomasa y rendimiento), se registró en los sitios CN, respecto de los sitios SN. Para la variable rendimiento únicamente, en el 47 % de los sitios CN se comprobaron incrementos significativos y en el 57 % de los sitios SN. Si se realiza una comparación entre los dos años de estudio, en el primer año el 83 % de los sitios CN tuvieron incrementos significativos en el rendimiento.

Tabla 5.3. Biomasa aérea (kg ha^{-1}) y eficiencia de uso de agua para los tratamientos testigos y fertilizados con nitrógeno.

SITIO	AÑO	Biomasa aérea Kg ha^{-1}					EUA B	
		Dosis de N (kg ha^{-1})				Valor p	$\text{Kg MS ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$	
		0	40	120			0	120
703		9702 a	11093 ab	14359 b	0.08	37	52	
705		10501 a	12482 b	12993 b	0.01	23	28	
707		3381	3951	3276	ns	11	10	
711		5980 a	6667 a	8122 b	0.01	13	18	
713		5051	5888	5788	ns	10	12	
719	I	4620	5608	6815	ns	12	17	
721		4520 a	5825 b	6528 b	0.01	13	18	
724		7797	9468	10110	ns	24	31	
725		4312 a	4247 a	5537 b	0.04	10	13	
729		4456	4169	4353	ns	14	13	
730		4138 a	4910 a	7333 b	0.03	12	22	
732		3810 a	4646 b	4945 b	0.01	12	16	
800		8298	10319	10866	ns	29	38	
804		11885	13504	13348	ns	40	44	
807		11499	10515	11895	ns	45	49	
812		11353 a	14872 ab	17470 b	0.03	48	75	
813	II	10314 a	13312 b	16145 c	0.00	55	74	
814		8983 a	11766 ab	13723 b	0.07	40	63	
818		9691	10034	10620	ns	33	37	
822		11838	11902	15820	ns	37	48	
823		15724	16664	19333	ns	64	77	
826		16527	18658	18544	ns	74	74	

ns= no significativo a $p<0,05$.

En el segundo año, tan solo el 22 % de los sitios CN presento incrementos significativos. Esto estaría relacionado con la profundidad media de la capa freática al momento de la siembra. Durante la primer campaña la napa apporto más agua y nutrientes al cultivo con respecto al segundo año (1.10 vs. 2.27 m de profundidad).

El rendimiento medio del tratamiento testigo fue de 6738 kg ha^{-1} , con una amplia variación entre sitios (112 vs 13322 kg ha^{-1}). La fertilización con nitrógeno incrementó el rendimiento de maíz en 640 , 1114 y 1271 kg ha^{-1} para las dosis de 40, 80 y $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$ respectivamente. En los sitios SN el rendimiento medio de los tratamientos sin fertilización fue de 3455 kg ha^{-1} y en los sitios CN este valor fue superior (8270 kg ha^{-1}). Similar tendencia se observó en la respuesta a la fertilización nitrogenada en los sitios CN, determinándose incrementos del rendimiento de 578, 1470 y 1718 kg ha^{-1} para las dosis de 40, 80 y $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$.

Tabla 5.4. Rendimiento de grano (kg ha^{-1}) y eficiencia de uso de agua (EUA R) para los tratamientos testigos y fertilizados con nitrógeno.

SITIO	AÑO	Rendimiento Kg ha^{-1}					EUA R	
		Dosis de N (kg ha^{-1})					$\text{Kg grano ha}^{-1}\text{mm}^{-1}$	
		0	40	80	120	Valor p	0	120
703		5229	5412	4945	5703	ns	11	12
705		6678	a 7700	a 10318	b 10154	b 0.00	11	18
707		1308	bc 1684	c 1077	ab 829	a 0.01	3	2
711		8637	a 11008	b 11220	b 10887	b 0.02	16	18
713		1262	a 1303	a 1888	b 2628	c 0.00	2	5
719	I	5047	6012	5273	4774	ns	9	8
721		6889	8017	7699	7771	ns	13	14
724		5263	a 7111	b 7226	b 7447	b 0.00	10	13
725		4303	bc 5335	c 3325	ab 2781	a 0.00	6	4
729		10099	a 9819	a 11536	b 13399	c 0.00	21	28
730		13322	a 14573	b 16222	c 17715	d 0.00	28	37
732		12761	a 15057	b 17656	c 18113	c 0.00	28	39
800		8481	9004	8090	7593	ns	18	17
804		10861	10203	11935	11054	ns	23	22
807		9358	8829	9425	10208	ns	20	23
812		6994	a 8333	b 9809	c 9516	c 0.00	15	21
813	II	6435	a 8190	b 9367	c 8952	c 0.00	15	20
814		3932	2566	4427	3095	ns	8	6
818		112.4	139.8	140	145	ns	0	0
822		4422	3792	3628	5106	ns	8	10
823		10429	10807	10283	10664	ns	23	23
826		6418	7433	7249	7664	ns	13	15

ns= no significativo a $p < 0,05$.

En sitios SN, el incremento del rendimiento por la aplicación de nitrógeno fue menor (774 , 349 y 313 kg ha^{-1} para 40 , 80 y $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$ respectivamente). Los valores medios de respuesta a la fertilización variaron entre años y dosis de fertilización. Las mayores respuestas a la fertilización se observaron durante el primer año de estudio ($40 \text{ N}:1019$, $80 \text{ N}:1466$ y $120\text{N}: 1784 \text{ kg ha}^{-1}$) respecto al segundo año ($40 \text{ N}: 186$, $80 \text{ N}: 691$ y $120\text{N}: 655 \text{ kg ha}^{-1}$). La fertilización produjo mejoras en la eficiencia de uso del agua del cultivo tanto en biomasa (+27%) como en rendimiento de grano (+ 17 %). Sin embargo, en los sitios CN la EUA en los tratamientos testigo fue mayor ($17,3 \text{ kg grano ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) respecto a los sitios SN ($6,1 \text{ kg grano ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) observándose incrementos en la EUA por efecto de la fertilización del 19 % en sitios CN y del 8.5 % en los sitios SN. Cerrudo et al. (2013) mencionaron que la fertilización en ambientes con restricciones hídricas permite incrementar la eficiencia del uso del agua disponible en el cultivo de maíz. Los resultados obtenidos coinciden con los

reportados por Saks et al. (2012a) en la Región Semiárida Pampeana y por Barbieri et al. (2012) en el Sudeste de Buenos Aires en donde la eficiencia en el uso del agua se incrementó en biomasa y en grano por efecto de la fertilización con nitrógeno sin modificar la evapotranspiración del cultivo.

5.2. Efecto de la disponibilidad hídrica sobre la productividad del cultivo de maíz.

En regiones semiáridas y subhúmedas se ha comprobado que las precipitaciones ocurridas durante el ciclo del cultivo no cubren los requerimientos de uso consuntivo de los mismos (Quiroga et al., 2009). Cuando se relacionó el rendimiento en función de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo, se comprobó que las precipitaciones no lograron explicar la productividad del maíz ($R^2 = 0,21$). No obstante, cuando se analizó la variable precipitaciones en los sitios CN se comprobó una relación positiva con el rendimiento ($R^2 = 0,47$, $p < 0,05$), determinándose además que las precipitaciones durante el periodo floración-cosecha contribuyeron significativamente a la productividad del cultivo ($R^2 = 0,48$, $p < 0,06$). Por otra parte, en los sitios SN se comprobó que las precipitaciones durante el periodo siembra-floración condicionaron en mayor medida el rendimiento ($R^2 = 0,70$) respecto al periodo floración-cosecha ($R^2 = 0,04$).

Los contenidos de AUF se relacionaron positivamente con los contenidos de AUS (Figura 5.1), variando entre sitios CN y SN. En los sitios CN se determinaron contenidos de AUS promedio de 260 mm variando entre 115 y 518 mm. En los sitios SN el contenido de AUS fue de 109 mm con un rango de variación entre 82 y 154 mm. Por otra parte en los sitios CN se determinaron contenidos de AUF mayores (174 mm) respecto a los sitios SN (54 mm). No obstante, en los sitios SN se comprobó un menor rango de variación (8 y 128 mm) respecto a los sitios CN (23 y 419 mm), indicando de esta manera que la profundidad de la capa freática al momento de la siembra varió entre sitios y años de estudio condicionando la disponibilidad hídrica durante el periodo de floración del cultivo.

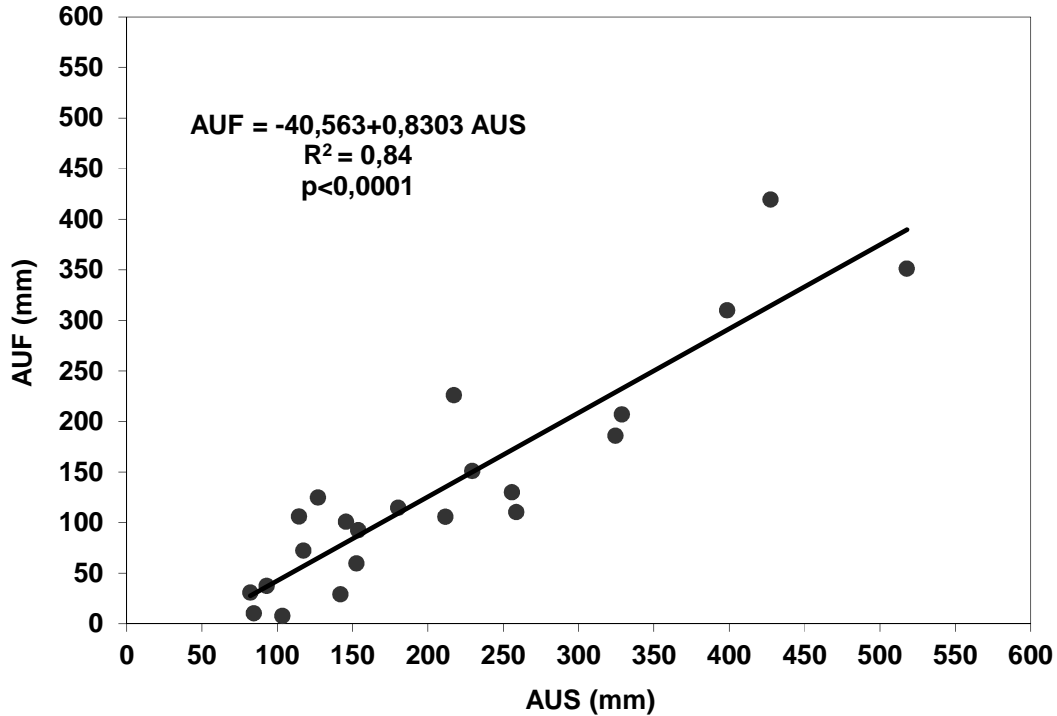


Figura 5.1. Contenido de agua útil en floración (AUF) en función del contenido de agua útil a la siembra (AUS).

De acuerdo a la propuesta por Andrade y Sadras, (2000) y Micucci y Alvarez, (2005) el agua acumulada durante el periodo 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, principalmente en regiones áridas y semiáridas. La biodisponibilidad de agua al momento de la siembra y en el periodo de floración son la principal fuente de variación del rendimiento de los cultivos (Quiroga y Paccapelo, 1990). En sitios con menor reserva de agua útil a la siembra el aporte de N no influyó positivamente sobre el cultivo, registrándose similares rendimientos que el testigo. Esto puede deberse a que un mayor aporte temprano de N puede favorecer a una mayor producción de biomasa y mayor UC. Del análisis de todos los datos de rendimientos durante los dos años de experiencias, se comprobó una relación positiva significativa entre el rendimiento y el contenido de AUS para los tratamientos testigos ($R^2 = 0,34$) y fertilizados ($R^2 = 0,39$). En las Figuras 5.2 y 5.3 se muestran los rendimientos de los tratamientos testigos en función del contenido de AUS y AUS+precipitaciones para los distintos años de estudio.

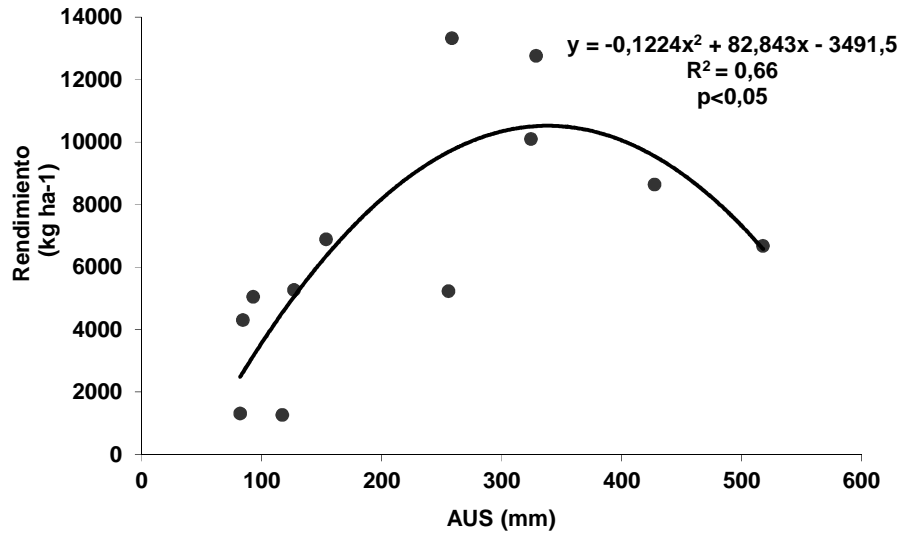


Figura 5.2. Rendimiento de maíz en función del contenido de agua útil a la siembra para la campaña 2007/08 (Año 1).

Se comprobó que el rendimiento del cultivo de maíz se relacionó con la biodisponibilidad de agua a la siembra en el primer año de estudio ($R^2=0,66$) y con el contenido de AUS+precipitaciones en el segundo año de estudio ($R^2=0,65$). Esta mayor dependencia del rendimiento con las precipitaciones durante el segundo año podría estar relacionada con la menor contribución de las napas como se expresó anteriormente.

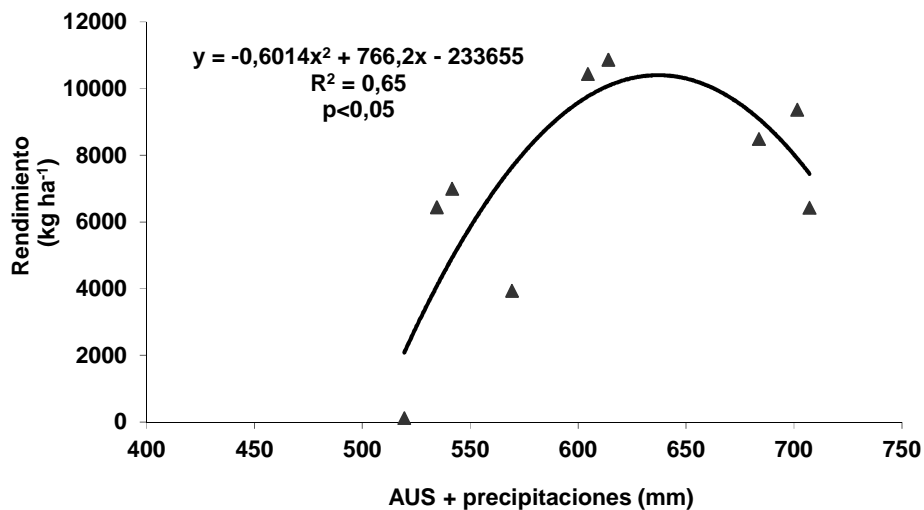


Figura 5.3. Rendimiento de maíz en función del contenido de agua útil a la siembra + precipitaciones durante el ciclo del cultivo para la campaña 2008/09 (Año 2). Se excluyó del análisis al sitio 822 por presentar napa freática con alta CE a 1,40 m de profundidad.

Se comprobó además que la respuesta a la fertilización nitrogenada fue condicionada por el contenido de agua útil al momento de la siembra comprobándose una relación positiva. Estos resultados concuerdan con los encontrados por Esposito et al. (2006) que indican que la respuesta a la fertilización nitrogenada de maíz depende de las condiciones hídricas desde un mes previo a la siembra hasta el estadio de V6.

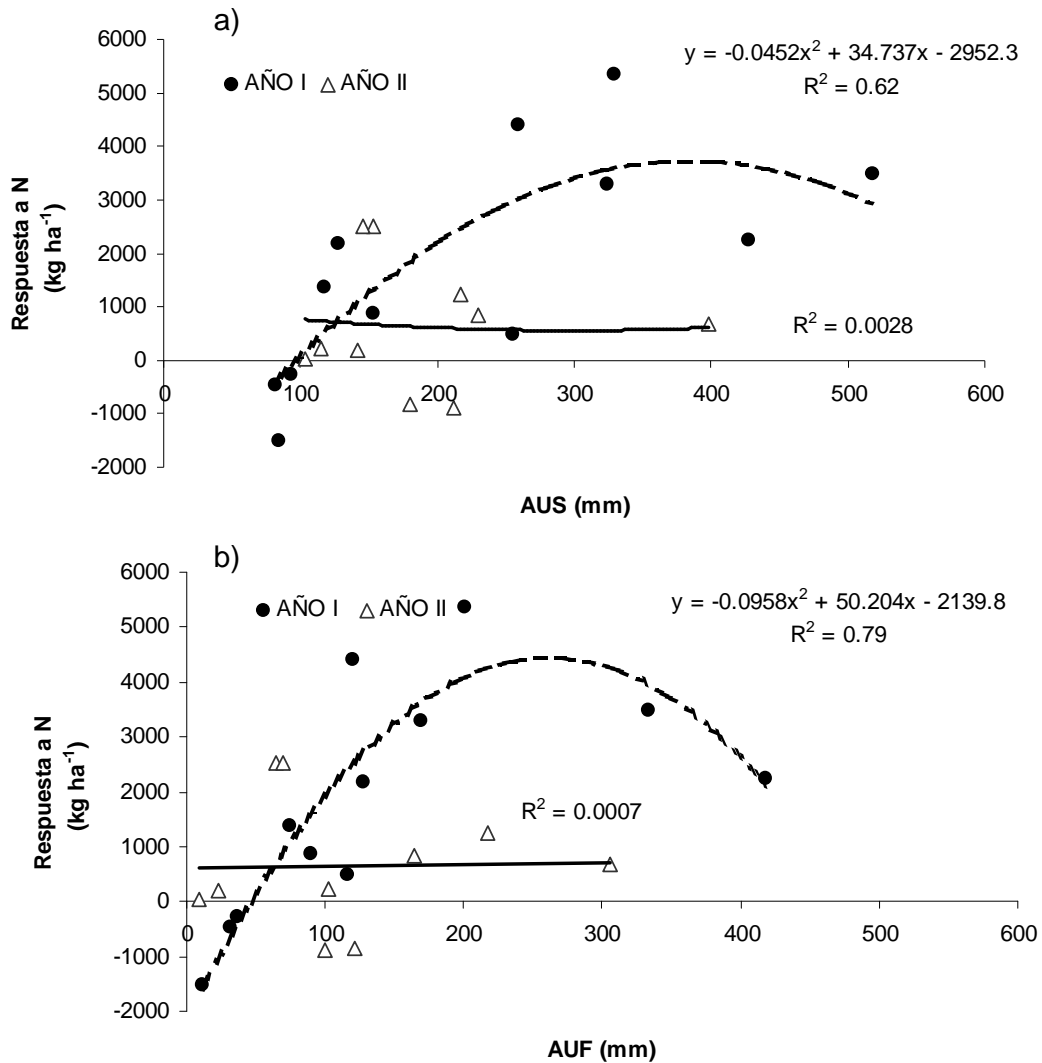


Figura 5.4. Respuesta a la fertilización con nitrógeno (120N) en función: a) del contenido de agua útil a la siembra (AUS) y b) del contenido de agua útil en floración (AUF) para los dos años de estudio.

Cuando se evaluó la respuesta a la fertilización en los dos años de estudio se pudo observar que el primer año se relacionó con los contenidos de AUS ($R^2 =$

0,62) y con los contenidos de AUF ($R^2=0,79$) (Figura 5.4 a y b). Resultados similares fueron observados por Rimski-Korsakov et al. (2010) comprobando que el rendimiento del cultivo de maíz fue mayor con fertilización nitrogenada y sin estrés hídrico (efecto aditivo). Ante condiciones de estrés hídrico parte del N del fertilizante no es utilizado por el cultivo y queda en el sistema susceptible a pérdidas o retenido por el suelo.

La Figura 5.5 muestra la relación entre la respuesta a la fertilización en los sitios sin presencia de capas freáticas al momento de la siembra y el contenido de agua útil en floración. Se puede observar que en sitios SN con bajos contenidos AUF la respuesta a la fertilización fue condicionada, comprobándose incluso en algunos sitios respuestas negativas. Este efecto podría atribuirse a un mayor desarrollo de biomasa en los tratamientos fertilizados con N que podrían generar mayores consumos hídricos respecto a los tratamientos testigos. No obstante, estas diferencias no fueron observadas en los contenidos de AUF entre tratamientos testigo y fertilizado, tampoco en el uso consuntivo siembra-floración, floración-madurez fisiológica y uso consuntivo total.

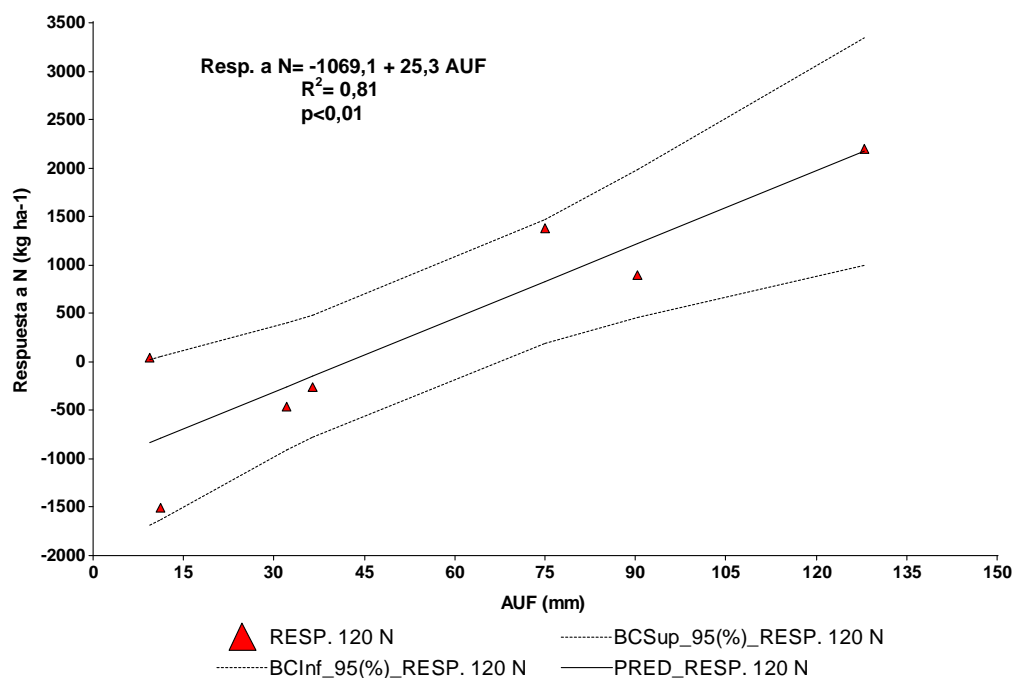


Figura 5.5. Relación entre la respuesta a la fertilización con N y el contenido de agua útil en floración (AUF) para los sitios sin presencia de capas freáticas. Las líneas discontinuas representan el intervalo de confianza del 95% para el conjunto de datos.

Cárcova et al. (1998) y Andrade y Sadras, (2000) señalan que el rendimiento de maíz se encuentra altamente relacionado con la disponibilidad de agua próximo a la floración del cultivo. En los sitios CN, se observó un aumento en la profundidad de la capa freática durante el ciclo del cultivo que varió entre sitios y años de estudio. La profundidad promedio de los dos años de observaciones fue de 1,80 m (siembra), 2,09 (floración) y 2,30 m (cosecha) respectivamente (Figura 5.6).

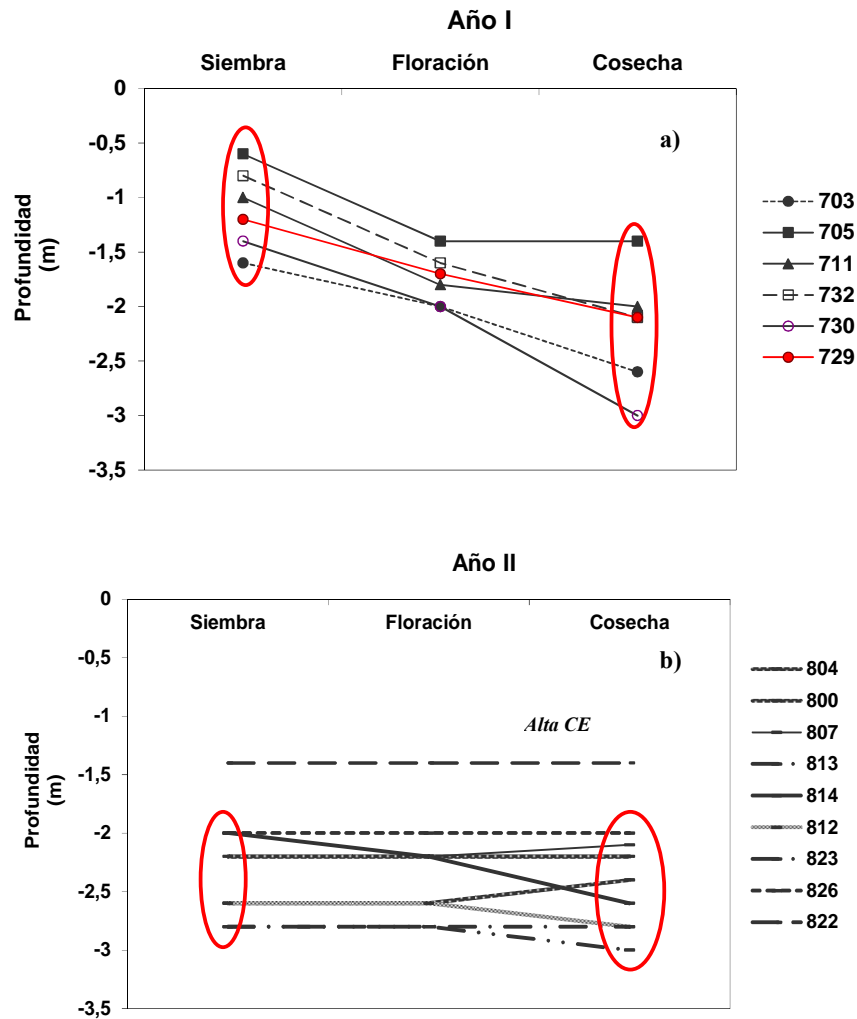


Figura 5.6. Evolución de la profundidad de la napa freática al momento de la siembra, floración y cosecha de maíz en los distintos sitios y campañas bajo estudio (a-2007/08 y b-2008/09).

La profundidad de la capa freática para el primer año de estudio al momento de la siembra fue de 1,10 m, en floración 1,75 m y de 2,20 m al momento de la cosecha del cultivo. La evolución de la capa freática entre siembra y cosecha fue de -1,10 m, determinándose incrementos en la profundidad que variaron entre 0,80 y 1,60 m. La profundidad del nivel freático se incrementó durante el desarrollo del cultivo coincidiendo con los resultados registrados por Nosetto et al. (2009) para el cultivo de maíz y Scilingo et al. (2012) para cultivos de maní y soja. En el segundo año de estudio la profundidad promedio de las napas al momento de la siembra, floración y cosecha fue de 2,38, 2,43 y 2,49 m respectivamente (excluyendo al sitio 822). Cuando se analizó la variación entre siembra y cosecha se determinó un valor de incremento en la profundidad de la napa de 0,10 m. Esto indica que la profundidad de las capas freáticas durante el ciclo del cultivo fue mayor a la profundidad efectiva de crecimiento de las raíces, condición por la cuál se puede inferir que bajo estas condiciones el acuífero freático no contribuyó significativamente al uso consuntivo (Nosetto et al., 2009).

5.3 Efecto de la disponibilidad hídrica y la fertilización sobre los componentes del rendimiento.

La relación entre el rendimiento y los distintos componentes se analizó por medio de un análisis multivariado representado en un gráfico Biplot (Figura 5.7). El rendimiento del cultivo de maíz se asoció de manera significativa con los componentes número de granos m^{-2} ($p < 0,0001$), el número de granos por hilera ($p < 0,0001$) y número de espigas por planta ($p < 0,0001$). En menor grado se asociaron con el rendimiento las variables peso de 1000 granos ($r = 0,39$, $p < 0,0007$) y número de granos por circunferencia ($r = 0,39$, $p < 0,0006$). El plano de las dos componentes principales (CP1 y CP2) contiene el 88 % de la variabilidad total de las observaciones.

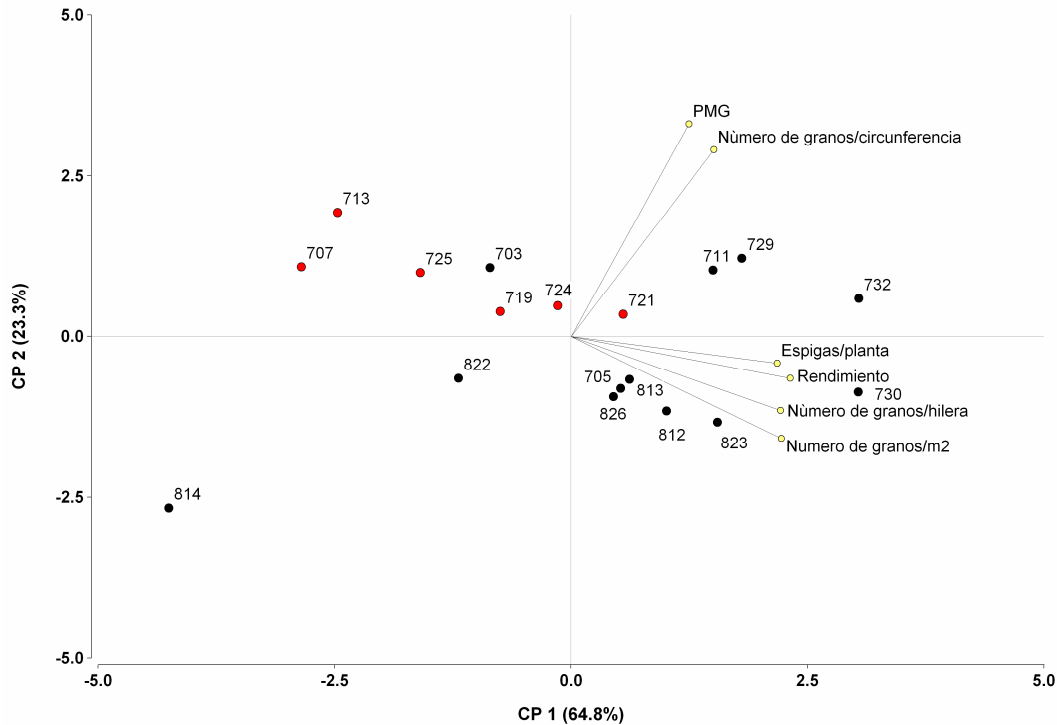


Figura 5.7. Gráfico *biplots* para las dos primeras componentes principales de las correlaciones entre las variables que componen el rendimiento del cultivo. Círculos pintados de negro y rojo corresponden a los sitios CN y SN respectivamente.

En los sitios CN el número de granos m^{-2} fue mayor (3588) respecto a los sitios SN (1642), variando ampliamente entre las distintas dosis de N. En los sitios CN el número de granos m^{-2} varió entre 1772 y 4883 para los tratamientos testigos y entre 1531 y 6037 para los tratamientos fertilizados (120 N) respectivamente. En los sitios SN se observó un rango menor, variando esta componente entre 442-2562 y 311-2945 para los tratamientos testigos y fertilizados respectivamente (Figura 5.8).

La Tabla 5.5 muestra los contenidos de NO_3 en la base de los tallos correspondientes al estadio V12-V14 del cultivo de maíz y los valores de las lecturas de SPAD para distintas dosis de N. Para la variable NO_3 en savia en 16 sitios se comprobaron efectos significativos por efecto de la fertilización con N. En el primer año de estudio en el 83% de los sitios se comprobaron incrementos significativos en los contenidos de NO_3 en savia, mientras que en el segundo año solamente en el 60 % de los sitios experimentales. Por otro lado, cuando se analizó el efecto de la fertilización con N sobre el índice de

verdor en el cultivo de maíz, en el 74 % de los sitios evaluados se comprobaron efectos positivos y estadísticamente significativos.

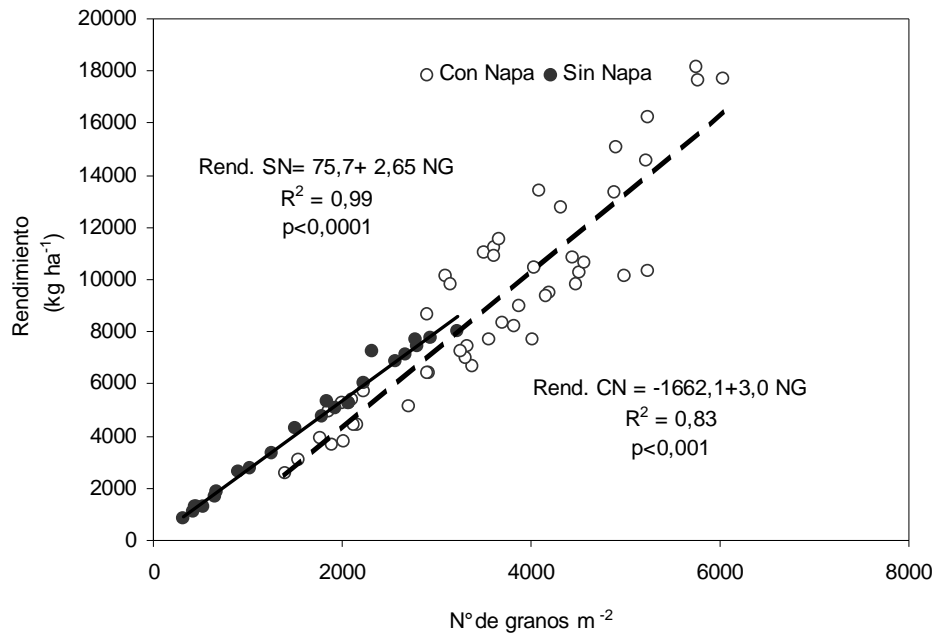


Figura 5.8. Relación entre el rendimiento y el número de granos en sitios con y sin presencia de napa.

El índice de verdor determinado con el clorofilómetro SPAD varía en función de la disponibilidad de N y de los materiales genéticos (Echeverría et al., 2000). Es por ello que el índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) podría utilizarse como un indicador promisorio para evaluar la nutrición nitrogenada (Echeverría et al., 2000; Pietrobón et al., 2012) y azufrada de los cultivos (Pagani y Echeverría, 2011). Mediante el uso de un modelo lineal mixto, se comprobó que las variables biomasa aérea y nitratos en savia presentaron diferencias estadísticas significativas (Tabla 5.6) entre tratamientos de fertilización con N ($p < 0,0001$). Las combinaciones de año, N y napa no presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$).

Tabla 5.5. Contenido de NO₃ en la base de los tallos y valores de unidades SPAD (rango de 0,0 a 99,9) para distintos niveles de nitrógeno en los sitios experimentales.

SITIO	NO ₃ en savia mg l ⁻¹				Unidades SPAD				
					Dosis de N (kg ha ⁻¹)				
	0	40	120	Valor p	0	40	80	120	Valor p
703	347 a	4013 ab	7200 b	0.08	48.4	50.4	50.1	50.3	ns
705	180 a	420 a	720 b	0.01	39.0 a	44.1 b	47.0 b	46.1 b	0.01
707	387 a	1247 a	7240 b	0.00	37.7 a	44.8 b	43.0 b	45.8 b	0.00
711	193 a	1147 a	5260 b	0.03	43.1 a	46.9 b	46.7 b	49.0 b	0.01
713	780	1960	4240	ns	42.4 a	46.2 b	46.3 b	49.4 c	0.00
719	867 a	1313 a	2830 b	0.01	37.3 a	41.9 b	39.3 ab	41.1 b	0.03
721	207 a	340 a	3086.7 b	0.00	39.7 a	42.3 b	43.5 b	44.8 b	0.01
724	300 a	1300 b	4746.7 c	0.00	44.7	44.6	46.9	44.8	ns
725	1353	3673	5160	ns	46.0	46.3	46.8	46.3	ns
729	1160 a	1460 ab	4407 b	0.07	46.6	46.3	48.0	48.7	ns
730	340 a	1230 b	4720 c	0.00	40.6	42.0	44.2	43.3	ns
732	927 a	1867 a	3360 b	0.02	46.2 a	48.9 b	48.9 b	50.4 b	0.02
800	200 a	1127 b	4493.3 c	0.00	sd	sd	sd	sd	
804	340 a	940 a	4646.7 b	0.04	sd	sd	sd	sd	
807	6180 a	7120 ab	8470 b	0.04	47.5 a	47.2 a	48.67 a	54.33 b	0.01
812	353 a	340 a	3013.3 b	0.07	32.9 a	34.9 a	42.0 b	42.8 b	0.00
813	507	500	2806.7	ns	29.0 a	33.2 a	41.2 b	45.1 b	0.00
814	7967	7487	8286.7	ns	sd	sd	sd	sd	
818	6580	8493	8220	ns	46.3 a	46.3 a	47.33 ab	49.17 b	0.02
822	2353	3680	6160	ns	38.0	37.3	37.3	38.6	ns
823	253 a	353.3 a	3006.7 b	0.00	50.7 a	54.8 b	54.9 b	55.8 b	0.00
826	230 a	1593 a	5030 b	0.01	53.7 a	55.1 b	56.1 c	59.2 d	0.00

ns= no significativo a p<0,05.

En el segundo año de estudio, se comprobó que los contenidos de nitratos en savia, fueron mayores como consecuencia de la fertilización con N. Por otro lado, la fertilización con N incremento tanto la producción de biomasa como los contenidos de nitratos en savia hasta la dosis máxima de N aplicado como fertilizante (Figura 5.9 a y b).

Tabla 5.6. Análisis de las variables biomasa aérea y nitratos en savia utilizando un modelo lineal mixto.

Variables	Num. gl	Den. gl	Valor F	Valor P
Biomasa aérea (kg/ha)				
Año	1	18	31.19	<0.0001
Napa	1	18	2.38	ns
Nitrógeno	2	36	36.03	<0.0001
Año x Napa	1	18	0.24	ns
Año x Nitrógeno	2	36	2.71	ns
Nitrógeno x Napa	2	36	1.77	ns
Año x Nitrógeno x Napa	2	36	0.57	ns
Nitratos en savia (mg l⁻¹)				
Año	1	18	3.31	ns
Napa	1	18	1.41	ns
Nitrógeno	2	36	74.78	<0.0001
Año x Napa	1	18	3.79	ns
Año x Nitrógeno	2	36	1.23	ns
Nitrógeno x Napa	2	36	0.17	ns
Año x Nitrógeno x Napa	2	36	1.83	ns

ns= no significativo a $p < 0.05$.

Cuando se relacionó el ISN con la disponibilidad de nitrógeno (suelo+fertilizante), se comprobó que niveles de 140 kg ha^{-1} de N disponible son necesarios para alcanzar valores de ISN de 0,96-0,97. Esto indica que situaciones de deficiencia o exceso de nitrógeno podrían ser detectados en estadios previos a la floración del cultivo.

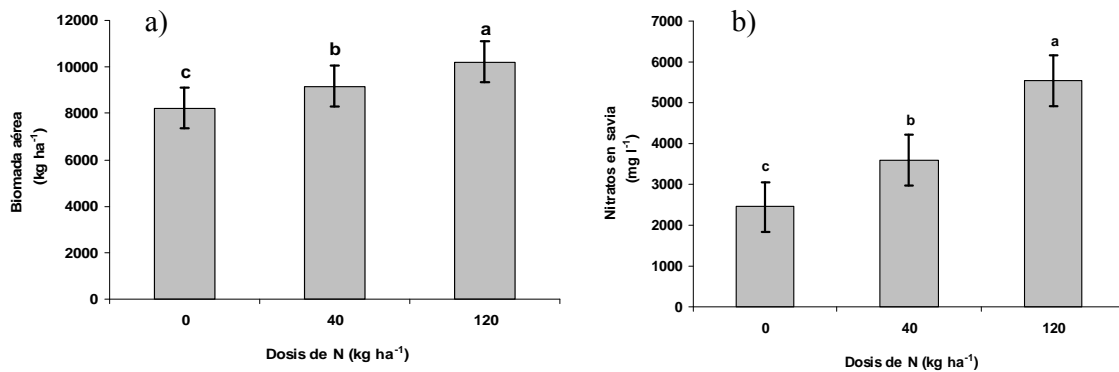


Figura 5.9. Producción de biomasa aérea a) y contenido de nitratos en savia b) para distintos niveles de nitrógeno aplicado como fertilizante. Letras distintas indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$). Las barras verticales corresponden al error estándar medio.

De acuerdo a lo mencionado, el medidor de clorofila detecta con gran precisión situaciones de deficiencia de N especialmente en estadios avanzados de

desarrollo del cultivo (Sainz Rozas y Echeverría, 1998; Blackmer y Schepers, 1995; Sánchez et al., 2012).

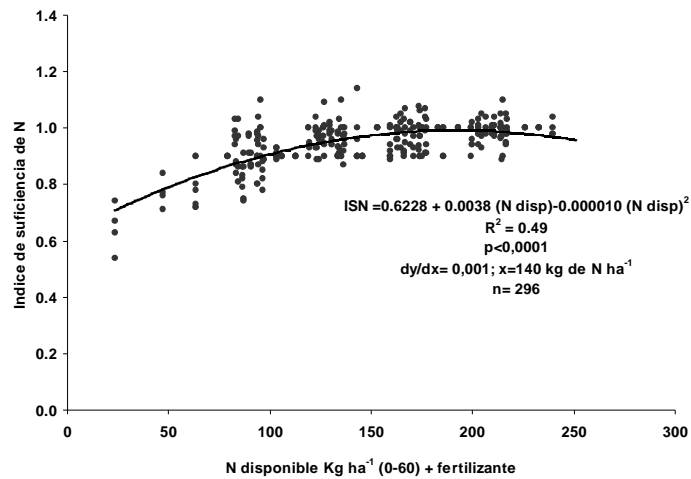


Figura 5.10. Relación entre el índice de suficiencia de nitrógeno (ISN) y el N disponible (suelo+fertilizante).

Para el análisis de la variable rendimiento, mediante un modelo lineal mixto, se observó una interacción significativa ($p < 0,0002$) entre las variables napa y nitrógeno (Tabla 5.7). Esto indica que las diferencias de rendimiento observadas en los sitios bajo estudio variaron por la presencia de la napa freática, determinándose en sitios CN respuestas significativas a la aplicación de nitrógeno hasta la dosis de $80 \text{ kg de N ha}^{-1}$ (Figura 5.11).

Tabla 5.7. Análisis del rendimiento utilizando un modelo lineal mixto para los efectos de las variables año, presencia de napa y dosis de nitrógeno.

<i>Variab</i> les	Num. gl	Den. gl	Valor F	Valor P
Rendimiento (kg ha^{-1})				
Año	1	18	0.26	ns
Napa	1	18	20.32	0.0003
Nitrógeno	3	54	10.50	<0.0001
Año x Napa	1	18	0.08	ns
Año x Nitrógeno	3	54	1.85	ns
Nitrógeno x Napa	3	54	7.68	0.0002
Año x Nitrógeno x Napa	3	54	1.12	ns

ns= no significativo a $p < 0.05$

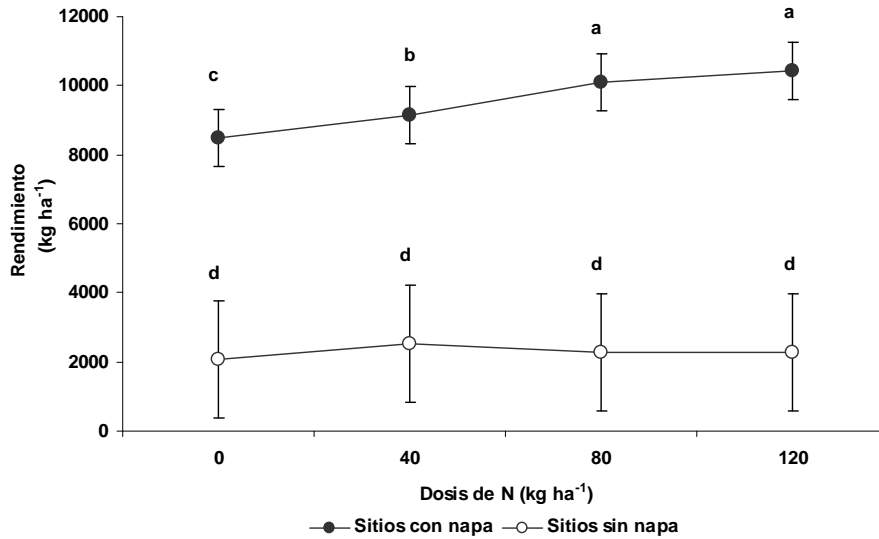


Figura 5.11. Rendimiento de grano de maíz para distintos niveles de nitrógeno aplicado como fertilizante en sitios con y sin presencia de napa freática obtenidos mediante el uso de un modelo lineal mixto. Letras distintas indican diferencias significativas (LSD, $p < 0,05$). Las barras verticales corresponden al error estándar medio.

La Figura 5.12 muestra los valores de rendimiento medio observados y simulados mediante el uso de un modelo lineal mixto para sitios con y sin napa.

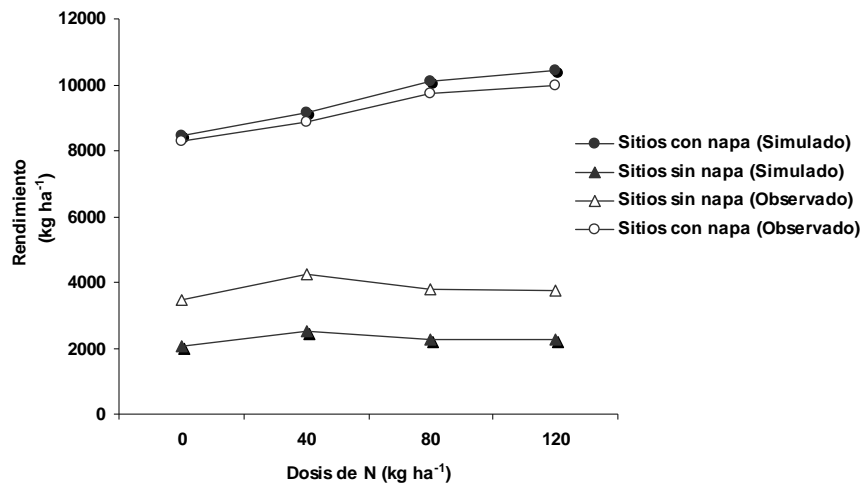


Figura 5.12. Rendimiento de grano de maíz simulado y observado en sitios con y sin presencia de napa freática para distintos tratamientos con nitrógeno.

Los valores obtenidos por el modelo indican que en sitios CN la diferencia entre los valores medidos y simulados para distintas dosis de N es menor respecto a los sitios SN que podrían haber presentado severas restricciones hídricas

durante el período de crecimiento del cultivo. Por otra parte, en algunos sitios SN (sitios 707 y 818) los niveles de rendimiento obtenidos y el número menor de sitios SN respecto a sitios CN podrían haber afectado la predicción del modelo lineal mixto, observándose una mayor diferencia entre los valores observados y simulados.

Para el análisis de los componentes del rendimiento de maíz se observó que las variables número de granos m^{-2} ($p < 0,001$) y número de granos por hilera ($p < 0,05$) presentaron una interacción doble significativa entre la variable fertilización con N y la presencia de la napa freática (Tabla 5.8). Esto indicaría que estos componentes del rendimiento fueron afectados por la presencia de la napa y también por la fertilización nitrogenada. Por otra parte, las variables peso de 1000 granos, número de granos por circunferencia y espigas por plantas no fueron afectadas por la presencia de la napa ni tampoco por la fertilización con N.

Tabla 5.8. Análisis de los componentes del rendimiento utilizando un modelo lineal mixto para los efectos de las napa y dosis de nitrógeno.

<i>Variables</i>	Num. gl	Den. gl	<i>Valor F</i>	<i>Valor P</i>
PMG (grs)				
Nitrógeno	3	48	1.21	ns
Napa	1	16	1.31	ns
Nitrógeno x Napa	3	48	0.42	ns
Número de granos m^{-2}				
Nitrógeno	3	48	11.89	<0.0001
Napa	1	16	12.23	0.0030
Nitrógeno x Napa	3	48	5.85	0.0017
Número de granos por hilera				
Nitrógeno	3	54	1.32	ns
Napa	1	18	6.92	0.0170
Nitrógeno x Napa	3	54	2.86	0.0452
Número de granos por circunferencia				
Nitrógeno	3	54	0.48	ns
Napa	1	18	0.01	ns
Nitrógeno x Napa	3	54	0.35	ns
Espigas por planta				
Nitrógeno	3	54	0.97	ns
Napa	1	18	3.26	ns
Nitrógeno x Napa	3	54	1.2	ns

ns= no significativo a $p < 0.05$.

5.4 Factores edafoclimáticos que inciden sobre el rendimiento de maíz.

Mediante el análisis multivariado entre distintas variables se observó que las CP1 y CP2 explicaron el 73,1 % de la variabilidad de los datos (Figura 5.13). Por otra parte, se comprobó que la variable rendimiento de grano se asoció principalmente con los contenidos de AUS ($r= 0,51$, $p<0,0001$), con los contenidos de AUF ($r= 0,42$, $p<0,0001$) y con los contenidos de MOJ ($r= 0,43$, $p<0,0001$). Sin embargo, el rendimiento de grano se asoció de manera negativa con la profundidad de la napa a la siembra ($r= -0,68$, $p<0,0001$), observándose similar tendencia para número de granos m^{-2} ($r= -0,68$, $p<0,0001$). Esto indica que la profundidad de la napa a la siembra del cultivo de maíz podría estar condicionando tanto el rendimiento como así también la respuesta a la fertilización con N. Cuando se analizó la asociación entre el contenido de AUS y la profundidad de la napa se observó una relación negativa entre ambas variables ($r= -0,90$, $p<0,0001$), indicando que la profundidad de la napa condiciona de manera significativa la oferta hídrica al momento de la siembra del cultivo. Similar tendencia se observó con los contenidos de AUF ($r= -0,76$, $p<0,0001$).

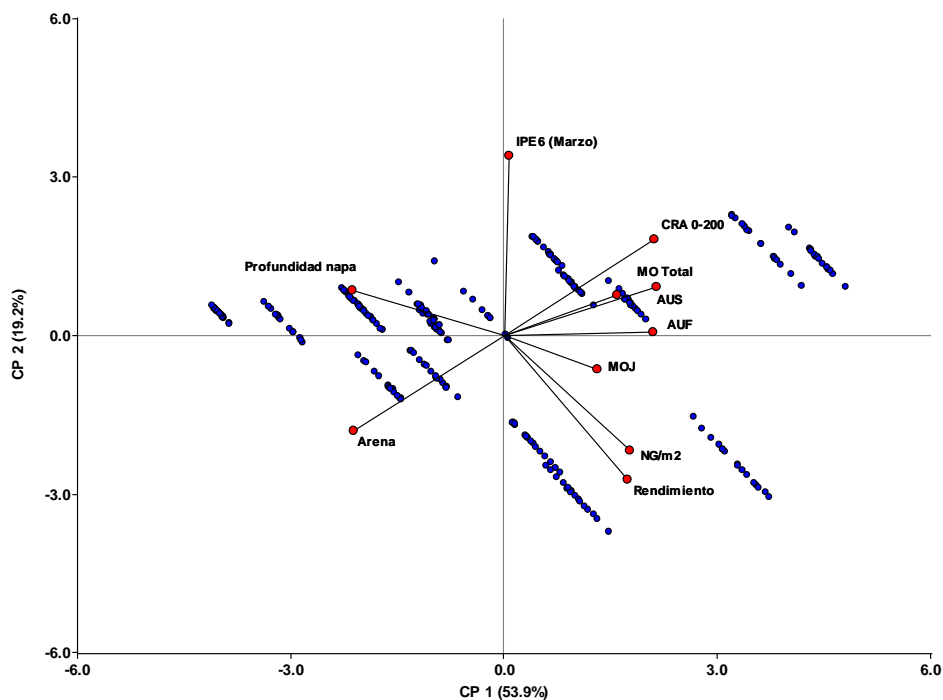


Figura 5.13. Gráfico *biplots* para las dos primeras componentes principales de las correlaciones entre variables edafoclimáticas.

La Figura 5.14 representa las dos primeras componentes principales (*biplots*) de los factores que condicionan el rendimiento de maíz en los sitios SN. En estos sitios, las CP1 y CP2 explicaron el 84,3 % de la variabilidad de las observaciones. El rendimiento de grano se asoció de manera positiva y significativa con el IPE 6 ($r= 0,82$, $p<0,0001$) y con la CRA ($r= 0,75$, $p<0,0001$) y negativamente con el contenido de arena ($r= -0,85$, $p<0,0001$) y con la profundidad de la napa ($r=-0,56$, $p<0,0001$).

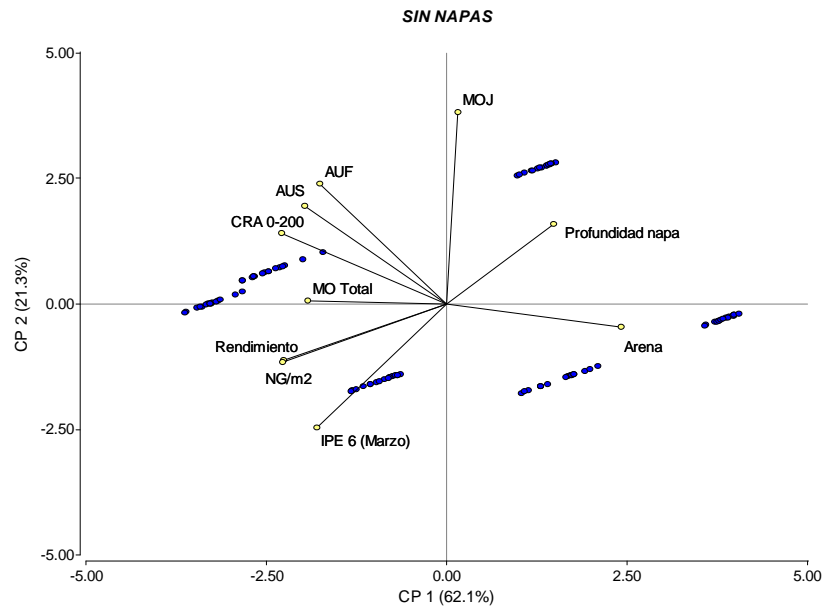


Figura 5.14. Gráfico biplots para las dos primeras componentes principales de las correlaciones entre variables edafoclimáticas para sitios SN. En sitios SN se asumió un valor de profundidad de la napa mayor a 3 m.

Los contenidos de AUS y AUF se asociaron positivamente con la CRA de los suelos (AUS; $r=0,94$, $p<0,0001$), (AUF; $r=0,84$, $p<0,0001$).

En sitios CN (Figura 5.15) las CP1 y CP2 explicaron el 68 % de la variabilidad de las observaciones. La variable rendimiento de grano se asoció negativamente con el IPE 6 ($r= -0,75$, $p<0,0001$) y positivamente con los contenidos de MOJ ($r=0,4$, $p<0,0001$). Esto indicaría que los sitios CN serían menos dependientes de las precipitaciones durante el ciclo del cultivo y por otra parte que el rendimiento de grano en sitios CN estaría asociado a la oferta de N.

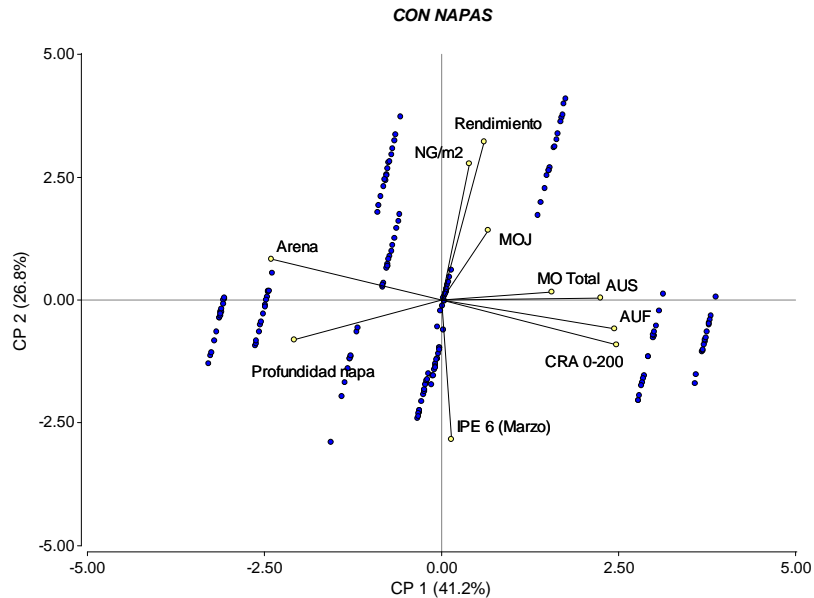


Figura 5.15. Gráfico biplots para las dos primeras componentes principales de las correlaciones entre variables edafoclimáticas para sitios CN.

La Figura 5.16 muestra la relación entre el rendimiento de maíz y la profundidad de la napa al momento de la siembra del cultivo. Para el rango de profundidades observadas, la productividad del cultivo se relacionó de manera lineal y estadísticamente significativa, determinándose una disminución del rendimiento de 21,7 kg de grano por cm de aumento en la profundidad del nivel freático. Resultados similares fueron observados por Scilingo et al. (2012) en el cultivo de maní y soja, determinando pérdidas lineales de rendimiento de 26,4 kg y 14 kg de grano por cm de incremento en la profundidad de la napa respectivamente. Por otra parte, si se considera la profundidad efectiva de raíces del cultivo de maíz (2 m), se observó que el mayor nivel de productividad del cultivo se alcanzó en sitios CN que se encontraban a menos de 2 m de profundidad permitiendo obtener diferenciales de rendimiento mayores a 5000 kg ha⁻¹. Nosetto et al. (2009) y Kahlow et al. (2005) observaron que el rango de profundidades de napas para obtener altos niveles de rendimiento de maíz se encontraban entre 1,40 a 2,45 m. Por otra parte, en nuestro estudio se comprobó que napas ubicadas a 2 m, la contribución hídrica al cultivo fue más baja respecto a profundidades menores. Esto indicaría que los mayores niveles de rendimiento se observaron en sitios con menores profundidades de napas (<2 m) en donde el cultivo comenzó a captar agua en estadios tempranos de desarrollo hasta alcanzar la máxima profundidad efectiva de raíces. Resultados

similares fueron obtenidos por Soppe y Ayars, (2003) quienes determinaron contribuciones hídricas del 25 % del total (170 mm) de agua requerida por el cultivo de cártamo, demostrando que la contribución mayor se realiza al final del ciclo del cultivo cuando las raíces están completamente desarrolladas.

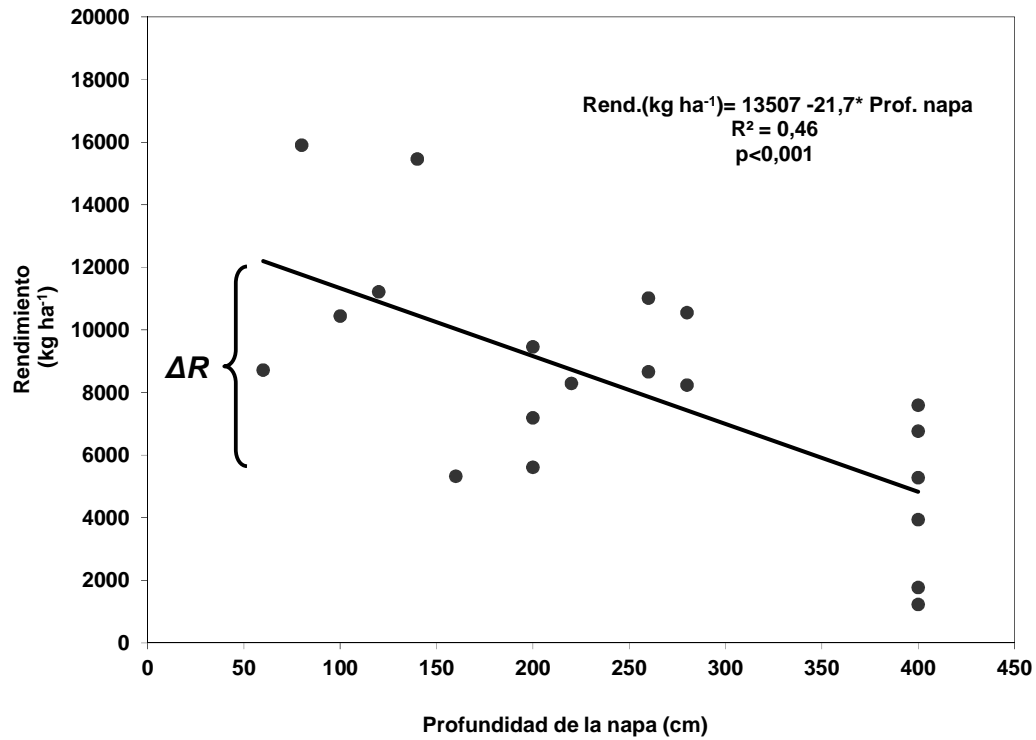


Figura 5.16. Rendimiento de maíz en función de la profundidad de la napa al momento de la siembra. ΔR = variación del rendimiento.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES GENERALES

Del análisis de los 22 sitios destinados al cultivo de maíz, se puede concluir que existe una estrecha relación entre los factores edafoclimáticos y la disponibilidad de agua en el momento de la siembra del cultivo, tanto entre años como así también entre sitios dentro de un mismo año. Con respecto al clima, y mediante el uso del IPE se pudo comprobar que durante el primer año el cultivo estuvo sujeto a un mayor balance hídrico negativo que durante el segundo año (moderadamente húmedo). Los suelos con mayor contenido de limo + arcilla tuvieron mayores CRA, y se relacionaron de manera positiva con los contenidos de agua útil al momento de la siembra. A la influencia de ambos factores (precipitaciones y CRA), se suma la presencia de la napa freática localizada a distintas profundidades y diferenciada también por su calidad (RAS, CE). Con respecto a la calidad del agua de la napa, el rendimiento de maíz resultó severamente afectado cuando la CE fue superior a 6 dS m^{-1} . Por el contrario valores de salinidad inferiores a 3 dS m^{-1} no condicionaron el rendimiento de maíz. Por otra parte, en nuestro estudio se comprobó que la profundidad óptima de la napa correspondió a la banda III (entre 1,4 m y 2,4 m) mientras que la banda IV ($<1,4 \text{ m}$) si bien presentó altos valores de CHN existen riesgos de anoxia en años muy húmedos con exceso de precipitaciones. Esto indicaría que los mayores niveles de rendimiento se observaron en sitios con menores profundidades de napas ($<2 \text{ m}$) en donde el cultivo comenzó a captar agua en estadios tempranos de desarrollo hasta alcanzar la máxima profundidad efectiva de raíces. La productividad del cultivo se relacionó de manera lineal y estadísticamente significativa, determinándose incrementos de rendimiento de $21,9 \text{ kg}$ de grano por cm de aumento en el nivel freático. En los sitios sin napa el rendimiento de grano se asoció de manera positiva y significativa con el IPE 6 y con la CRA de los suelos. Mientras que en sitios CN el rendimiento de granos se asoció negativamente con el IPE 6 y positivamente con el contenido de Materia orgánica joven, indicando que sitios con presencia de napa freática serían menos dependientes de las precipitaciones atmosféricas.

En relación con la variación del rendimiento de maíz se comprobó una estrecha relación con la disponibilidad de agua a la siembra. Sitios con mayor disponibilidad de agua a la siembra presentaron mayor rendimiento de grano y mayor respuesta a la fertilización nitrogenada. En sitios con presencia de napas se determinó un mayor rendimiento de grano y se comprobaron respuestas significativas a la fertilización con nitrógeno hasta la dosis de 80 kg de N ha⁻¹. Sin embargo, en los sitios sin napa los rendimientos de grano fueron inferiores y no hubo incrementos significativos por la adición de nitrógeno.

Finalmente se puede concluir que el rendimiento de maíz depende principalmente de la disponibilidad hídrica. En el caso de ser insuficiente el volumen de precipitaciones, los requerimientos de uso consuntivo pueden ser cubiertos por la presencia de la napa si la misma se encuentra a < 2 m de profundidad. La fertilización nitrogenada, en cambio, permitirá aumentar el rendimiento siempre y cuando se vean satisfechas en primera instancia las necesidades hídricas del cultivo.

Si bien los estudios realizados deben considerarse preliminares, fue posible identificar factores edafoclimáticos (presencia de napa, AUS y CRA) que condicionaron tanto el rendimiento como la respuesta a la fertilización nitrogenada del cultivo de maíz. Además, los mismos tienen un carácter predictivo, es decir, pueden ser determinados previo a la siembra del cultivo y constituyen una importante ayuda en el momento de la toma de decisiones. Por otro lado, los mismos permitieron identificar la importancia del factor napa, al momento de elaborar estrategias de manejo-sitio específico tendientes a optimizar la eficiencia en el uso de insumos y tecnología.

BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, F., A. CIRILO; S. UHART y M.E OTEGUI. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. 1°Ed. Buenos Aires. Editorial la Barrosa. 289 p.

ANDRADE F.H., y V.O. SADRAS. 2000. Efectos de la sequía sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos. En: Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. (Eds) F.H. Andrade y V.O. Sadras. EEA-INTA Balcarce, Fac. de Ciencias Agrarias UNMP. pp 173-206.

ANDRADE F.H., 1995. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. Field Crops Research 41: 1-12.

ANDRIULO A., J. GALANTINI, C. PECORARI y E. TORIONI. 1991. Materia orgánica del suelo en la región Pampeana Argentina. I. Un método de fraccionamiento por tamizado. INTA Pergamino, Inf. Téc. 250:18pp.

ANGELI A.R., C. CHOLAKY, A. CANTERO y J.M. CISNEROS. 2006. Biodrenaje forestal: Efecto de la salinidad del suelo y el nivel freático en el sur cordobés. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Salta – Jujuy. Actas en CD.

ALVAREZ C., N. PEINEMANN, A. QUIROGA. 2006. Sistemas de labranza, propiedades edáficas y rendimiento en Molisoles con diferentes régimen hídrico. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Salta – Jujuy. Actas en CD.

AYERS R.S., and D. W. WESTCOT.1985. Water quality for agriculture (No. 29). Rome,, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

BABAJIMOPOULOS C., A. PANORAS, H. GEORGOUSSIS, G. ARAMPATZI, E. HATZIGIANNAKIS & D. PAPAMICHAIL. 2007. Contribution to irrigation from shallow water table under field conditions. Agricultural Water Management 92:205-210.

BALZARINI M.G., L. GONZALEZ, M. TABLADA, F. CASANOVES, J.A. DIRIENZO, C.W. ROBLEDO. 2008. Infostat. Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.

BARBIERI P.A., A. DELLA MAGGIORA, H.E. ECHEVERRIA, M. PIETROBON, F. ALVAREZ. 2012. Evapotranspiración y eficiencia en el uso de agua del cultivo de maíz en respuesta a la fertilización con nitrógeno. XIX Congreso latinoamericano de la ciencia del suelo y XXIII Congreso argentino de la ciencia del suelo. Actas en CD.

BARRACO M. y M. DIAZ-ZORITA. 2005. Momento de Fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en Hapludoles Típicos. Cl. Suelo (Argentina) 23 (2) 197-203.

BAÑUELOS G. S., H.A. AJWA, L. CACERES, D. DYER. 1999. Diferencias de acumulación y tolerancia a altas concentraciones de boro de especies agrícolas entre el Norte de Chile y California, Estados Unidos. In Proceedings of Congreso Internacional de Agricultura Para Zonas Áridas. 31-40 pp.

BLACKMER T.M., and J.S. SCHEPERS. 1995. Use of chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. *J. Prod. Agric.* 8:56-60.

BRAY, R.H. and L.T. KURTZ. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soil. *Soil Science* 134: 376-380.

CALVIÑO P.A., F.H. ANDRADE and V.O. SADRAS. 2003. Maize yield as affected by water availability, soil Depth, and crop management. *Agronomy Journal* 95:275-281.

CARCOVA J.; G. A. MADDONI and C. M. GHERSA. 1998. Crop water stress index of three maize hybrids grown in doils with different quality. *Field Crops Research* 55:165-174.

CASAGRANDE G., G. VERGARA. 1996. Características climáticas de la región. *Labranzas en la región semiárida pampeana*. Pp. 11-17.

CASAGRANDE G.A., G.T. VERGARA y Y. BELLINI. 2006. Cartas agroclimáticas actuales de temperaturas, heladas y lluvia de la provincia de La Pampa (Argentina). *Rev. Fac- Agronomía - UNLPam* Vol. 17, 1/2.

CIAMPITTI I. A., G. RUBIO, L. I. PICONE, F. GARCIA. 2009. El fósforo en la agricultura: Mejores Prácticas de Manejo (MPM). *Actas Simposio Fertilidad 2009. IPNI-FERTILIZAR*. págs. 35-51

CERRUDO A., J.P MONZÓN, J. DIMATTEO, F. ARAMBURU, R. RIZALLI, y F. ANDRADE. 2013. Manejo del cultivo de maíz en ambientes con restricciones hídricas. *Revista Técnica de Maíz. Siembra Directa. Aapresid*. Agosto 2013. 15-19 pp.

DARDANELLI J. L. y O. A BACHMEIER. 1993. Profundidad efectiva de raíces y límite inferior de agua útil determinado en campo para diferentes cereales y oleaginosos. *Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*.

DARDANELLI J.L., O.A. BACHMEIER, R. SERENO and R. GIL. 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll. *Field Crops Research* 54:29-38.

DI RIENZO J.A., CASANOVES F., BALZARINI M. G., GONZALEZ L., TABLADA M. y ROBLADO C. W. *InfoStat versión 2009*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

EGHBALL B. y J. MARANVILLE. 1993. Root development and N influx of corn genotypes grown under convined drought and N stress. *Agronomy Journal*, 85:147-152.

ECHEVERRIA H.E., R.A. STRADA, G.A. STUDDERT. 2000. Métodos rápidos de análisis de plantas para evaluar la nutrición nitrogenada del cultivo de trigo. *Ciencia del Suelo* 18 (2) 2000. 105-114.

ECHEVERRIA H. E. y H. SAINZ ROZAS. 2006. Maíz. In: H.E. Echeverria y F.O. Garcia (eds). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Editorial INTA, Buenos Aires, Argentina. 255-282.

ECHEVERRIA H. E., H. SAINZ ROZAS, E. HERFURTH, S.A. UHART. 2001. Nitrato en la base del tallo del maíz: I Cambios durante la estación de crecimiento. *Ciencia del Suelo* 19(2):115-124.

ECHEGARAY S., N. BALDASSINI; G. TRAVERIA, M. VALDEZ, P. RUSCH, M. S. ZUBILLAGA, H. RIMSKI-KORSAKOV. 2006. Fertilización nitrogenada y estrés hídrico en maíz. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Salta – Jujuy. Actas en CD.

ESPOSITO G., C. CASTILLO, R. BALBOA. 2006. Calibración y validación de un método de diagnóstico de fertilización nitrogenada en maíz para el sur de Córdoba (Argentina). *RIA*, 35 (3):45-63. INTA ARGENTINA.

FAO. 1992. Anuario. Producción. Vol. 45. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 1992. En: Andrade, F.; A. Cirilo; S. Uhart y M.E Otegui. 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. 1° Ed. Buenos Aires. Editorial la Barrosa. 289 p.

FERNÁNDEZ J., A. QUIROGA, G. CASAGRANDE. 2003. Caracterización Agroedáfica y agroclimática del área trigueña de la provincia de La Pampa. Trigo. Actualización 2003. INTA Anguil. Publicación de divulgación técnica N° 76.

FONTANA F., M. PATURLANE, M. SAKS, A. QUIROGA. 2006. Efecto del espesor de suelo sobre propiedades edáficas y rendimiento de trigo en la región semiárida pampeana. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo Salta - Jujuy. Actas en CD.

FUNARO D., R. FERNANDEZ, A. QUIROGA. 2004. Aspectos edáficos relacionados con el manejo del agua y la nutrición del maíz. En *Producción de Maíz en Sistemas Mixtos*, INTA Anguil, Bol. 81:18-30.

FUNARO D., N. PEINEMANN, E. NOELLEMAYER, M. SAKS, A. QUIROGA. 2006. Efecto de la disponibilidad de agua y nitrógeno para girasol en la región semiárida pampeada. XX Congreso Argentino de Ciencia del Suelo Salta - Jujuy. Actas en CD.

Fundación Innovación Agraria (FIA). 2009. Sistema para reducir la concentración de Boro en aguas de riego. Ministerio de Agricultura, Gob. de Chile, 28 pp.

GAGGIOLI C., D. FUNARO, E. NOELLEMAYER, M. JUAN. 2010. Abundancia de raíces y rendimiento de diferentes híbridos de maíz en la región semiárida pampeana. Actas IX Congreso Nacional de Maíz. Simposio de Sorgo, Rosario, Argentina.

GARCIA O. A. 2012. Criterios modernos para la evaluación de la calidad del agua para riego. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. (6); 27-36. IPNI Cono Sur.

GARNERO G., A. QUIROGA. 2003. Caracterización de ambientes para el cultivo de soja y la influencia de la napa de agua. Cultivos de cosecha gruesa. Actualización 2003. Boletín de Divulgación Técnica N°77. 230-235.

GOLBERG D.A., M. A. RUIZ, A. QUIROGA, O. A. FERNANDEZ. 2011. ¿Qué le sucede a un cultivo cuando no llueve?. Ediciones INTA. EEA INTA ANGUIL. (1); 11-44.

GOMEZ M. L. 2009. Definición de la aptitud de agua para riego en un agroecosistema del Sur de la Provincia de Córdoba, Argentina. Investigación y Ciencia, 17(45), 38-43.

GUROVICH L. A., & R. RAMOS. 1985. Spatial variability of rainfall and yield of maize in a semiarid region. Agricultural water management, 10 (1); 13-29.

INRA-ITCF-AGPM-Challenge Agriculture. 1996. Dosage du nitrate dans le jus de bas de tige du maïs. INRA-ITCF-AGMP- Challenge Agriculture. Fondettes. Francia. pp 10.

JOBAGY EG., R.B. JACKSON. 2004. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. Global Change Biology 10:1299–1312

JOBAGY E., G. SZNAIDER, M. NOSETTO, R. ARAGON, G. MANGAS, S. DE FORTEZA. 2007. Dinámica de napas y riesgo de inundación: Influencias y efectos en la variabilidad de los cultivos. Mundoagro.

JOBAGY E. G y M. D. NOSETTO. 2009. Napas freáticas: pautas para comprender y manejar su impacto en la producción. Actas XVII Congreso AAPRESID : 151-156.

KAHLON M.A, M. ASHRAF, ZIA-UL-HAQ. 2005. Effect of shallow groundwater table on crop water requirements and crop yields. Agricultural Water Management 76: 24-35.

KARAVITIS C. A., S. ALEXANDRIS, D.E. TSESMELIS, y G. ATHANASOPOULOS. 2011. Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece. Water (3); 787-805.

KRAMER P. J. 1983. Water relations of plant. Academic Press. 480 pp. *In*: Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. 2000, (7); 173-206.

LORENS G. F., J. M. BENNETT, L. B. LOGGALE. 1987. Differences in drought resistance between two corn hybrids. I. Water relations and root length density. *Agronomy Journal*, 77: 519-523.

LÓPEZ M.V., ARRÚE J.L. 1997. Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage in a semi-arid region of Spain. *Soil & Tillage Research* 44: 35-54.

MAAS, E. 1984. Salt tolerance of plants. In: *The Handbook of Plant Science in Agriculture*. B.R. Christie (ed). CRC Press, Boca Raton, Florida.

MAAS E.V., C.J. HOFFMAN. 1977. Crop salt tolerance current assessment. *Journal of irrigation and Drainage Division*. ASCE, Vol. 103, No. 1R 2. Proc. Paper 12993, 115-134.

MCKEE T. B., N. J. DOESKEN, and J. KLEIST. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints, 8th Conference on Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA, 179-184.

MICUCCI F., C. ALVAREZ. 2005. 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. In: <http://www.ipni.net>

MOREIRA E., A.A. PAULO, L.S. PEREIRA and J.T. MEXIA. 2006. Analysis of SPI drought class transitions using loglinear models. *Journal of Hydrology* 33: 349-359.

MUELLER L., A. BEHRENDT, G. SCHALITZ and U. SCHINDLER. 2005. Above ground biomass and water use efficiency of crops at shallow water tables in a temperate climate. *Agr. Wat. Management*: 75:117-136.

NESMITH D.S and J.T RITCHIE. 1992. Effects of soil water-deficits during tassel emergence on development and yield component of maize (*Zea mays*). *Field Crops Research*: 28:251-256.

NOSETTO M.D., E.G. JOBBÀGY, R.B. JACKSON & G.A. SZNAIDER. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research* 113: 138-148.

NOSETTO M.D., E.G. JOBBÀGY, J.L. MERCAU. 2011. Ambientación y aplicación variable de insumos en áreas con influencia freática. *Revista Especial AAPRESID. Agricultura de Precisión y Manejo por Ambientes*. In: www.aapresid.org.ar

NOVÁK, V. 1994. Water uptake of maize roots under conditions of non-limiting soil water content. *Soil Technology* 7: 37-45.

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 Magíster Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Buenos Aires, Argentina. 93 págs.

OTEGUI M. E, F.H. ANDRADE, E.E. SUERO. 1995. Growth, water use, and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research* 40: 87-94.

PAGANI A., H. ECHEVERRIA. 2011. Evaluación de métodos de diagnóstico de azufre en maíz: Indicadores de suelos e indicadores vegetales. Utilidad del medidor de clorofila. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* - No. 2. IPNI, 38-45.

PASSIOURA, J.B. 1994. The yield of crops in relation to drought. P. 343-359. En: K. J. Boote, J.M. Bennett, T. R. Sinclair, y G. M. Paulsen (ed). « *Physiology and Determination of Crop Yield* ». ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, USA. En: Fertilidad física de los suelos. Miguel A. Taboada y Federico G. Micucci, 11-26.

PANDEY R.K., J.W. MARANVILLE, A. ADMOU. 2000a. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment I. Grain yield and yield component. *Agricultural Water Management* 46: 1-13.

PANDEY R.K, J.W. MARANVILLE, M.M. CHETIMA. 2000b. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment II. Shoot growth, nitrogen uptake and water extraction. *Agricultural Water Management* 46: 15-27.

PEPI M.L., G.A. GROSSO, M. DIAZ-ZORITA. 1998. Contenido salino del agua freática vinculado al tamaño de partículas de los suelos del Noroeste Bonaerense (Argentina). *Ciencia del suelo* 16: 122-124.

PIERI C. 1995. Long-term soil management experiments in semiarid Francophone Africa. *Adv. Soil Sci.*, 225-264.

PIETROBÓN M., P.A. BARBIERI, F.H. ANDRADE, H.E. ECHEVERRIA. 2012. Diagnóstico del estatus nitrogenado del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) mediante el uso de spad y de greenseeker. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina. Actas en CD.

PORTELA S.I., A.E. ANDRIULO, E.G. JOBBÁGY, M.C. SASAL. 2009. Water and nitrate exchange between cultivated ecosystems and groundwater in the Rolling Pampas. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 134: 277-286.

QUIROGA A., D. BUSCHIAZZO, N. PEINEMANN. 1996. Soil organic matter particle size fractions in soils of semiarid Argentinean Pampas. *Soil Sci.* 161: 104-108.

QUIROGA A., D. BUSCHIAZZO, N. PEINEMANN. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil & Tillage Research* 52: 21-28.

QUIROGA A., R. FERNÁNDEZ, P. AZCARATE, A. BONO, C. GAGIOLI. 2012. Agua del suelo. Bases funcionales para su manejo. Capítulo IV. Publicación Técnica N°89 . EEA INTA Anguil.

QUIROGA A., R. FERNANDEZ, O. ORMEÑO, I. FRASIER, E. NOELLEMAYER. 2009. Influencia del ambiente edáfico u la fertilización nitrogenada, en cultivares de trigo diferenciados por su potencial. "Revista de la Facultad de Agronomía", UNLPam 19: 31-39.

QUIROGA A., y D. FUNARO. 2004. Materia orgánica. Factores que condicionan su utilización como indicador de calidad en Molisoles, de las Regiones Semiárida y Subhúmeda Pampeana. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas Pp: 476.

QUIROGA A., D. FUNARO, O. ORMEÑO, A. BONO, C. SCIANCA. 2003. Manejo del agua para los cultivos de girasol y maíz en suelos de las regiones semiárida y subhúmeda pampeana. En: Cultivos de cosecha gruesa. Actualización 2003. Publicación Técnica N°77: 55-59.

QUIROGA A., D. FUNARO, E. NOELLEMAYER, N. PEINEMANN. 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research* 90: 63-68.

QUIROGA A., H. PACCAPELO. 1990. Evaluación de algunos aspectos de las relaciones hídricas en trigo, en la Región Semiárida Pampeana. *Revista de la facultad de Agronomía. Universidad Nacional de La Pampa.* Vol 5 (2): 109:115.

QUIROGA A., M. SAKS, D. FUNARO, R. FERNÁNDEZ. 2006. Aspectos del manejo del agua y la nutrición nitrogenada de maíz en la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana. XX Congreso Argentino de Cs. del Suelo Salta-Jujuy. Actas en CD.

QUIROGA A., M. SAKS, R. FERNANDEZ, H. OTAMENDI, D. FUNARO. 2007. Efectos directos y residuales de la fertilización sobre la productividad y propiedades de un Haplustol Entico. Aspectos de la evaluación y el manejo de los suelos en la región semiárida pampeada. Ensayos de larga duración. Publicación Técnica N°69. EEA INTA Anguil.

RAY J.D., B.K SAMSON, T. SINCLAIR. 1997. Vegetative growth and soil water extraction of two maize hybrids during water deficit. *Field Crops Research* 52:135-142.

RIAP 2006. Zonas agroecológicas de La Pampa. Planicie Medanosa. <http://riap.inta.gov.ar>

RICHARDS, L.A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agricultural Handbook 60, 160 pp.

RIMSKI-KORSAKOV H., M.S. ZUBILLAGA, M. R. LANDRISCINI, I. PINO, S. ETCHEGARAY, N. BALDASSINI y R. S. LAVADO. 2010. Fertilización nitrogenada y estrés hídrico en maíz: II. Destino del fertilizante en la planta y producción de biomasa. XXII Congreso argentino de la ciencia del suelo-Rosario. Actas en CD.

RITCHIE S. W., J. J. HANWAY. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames, Iowa. Special Report N°48. 24pp.

SADRAS V.O., and P.A CALVIÑO. 2001. Quantification of Grain Yield Response to Soil Depth in Soybean, Maize, Sunflower, and Wheat. Agron. J. 93: 577–583.

SAGPyA. 2008. Estimaciones agrícolas, cereales. Secretaría de agricultura, ganadería, pesca y alimentos, Ministerio de agricultura, Buenos Aires, Argentina. Disponible on-line en <http://www.sagpya.mecon.gov.ar> (Consultado, 2 de junio, 2008).

SAINZ ROZAS H. R., H.E. ECHEVERRIA, E. HERFURTH, G.A. STUDDERT. 2001. Nitrato en la base del tallo de maíz. II. Diagnóstico de nutrición nitrogenada. Ciencia del Suelo 19(2):125-135.

SAINZ ROZAS H., & H. E. ECHEVERRÍA. 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. Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata 103 (1): 37-44.

SAKS M.G., R. FERNÁNDEZ, A. GILI, A. QUIROGA. 2012a. Efecto de la Fertilización nitrogenada en distintos genotipos de maíz en la Región Semiárida Pampeana. XIX Congreso Latinoamericano de la ciencia del suelo y XXIII congreso argentino de la ciencia del suelo. Actas en CD.

SAKS M.G., A. QUIROGA, R. FERNANDEZ, P. ZALBA. 2012b. Contribución de las napas al rendimiento de maíz en Molisoles de la Planicie Medanosa. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina. Actas en CD.

SAKS M.G., A. QUIROGA, R. FERNANDEZ, P. ZALBA. 2010. Efecto de la disponibilidad de agua y nitrógeno sobre la productividad de maíz en Molisoles de la Región Semiárida y Subhúmeda Pampeana. Actas XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.

SANCHEZ A., R. DELGADO, J. LORBES, V. RODRIGUEZ. 2012. Uso del clorofilómetro en el diagnóstico nitrogenado en el cultivo de maíz. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina. Actas en CD.

SCIAN B. 2002. Variabilidad de las condiciones hídricas en la región semiárida pampeana, Argentina. *Geoacta*, 27, 30-52.

SCILINGO J.M., J.M. CISNEROS, O. GIAYETTO, E. JOBBAGY. 2012. Producción de maní y soja y uso del agua freática en ambientes medanosos. XIX Congreso latinoamericano de la ciencia del suelo y XXIII congreso argentino de la ciencia del suelo. Mar del Plata, Argentina. Actas en CD.

SEBER G. 1984. *Multivariate observations*. J. Wiley & Sons, New Cork, 686 pp.

SEILER A., L. BRESSAN. 2000. Uso del índice estandarizado de precipitación para la evaluación permanente del riesgo de inundaciones. *Rev. Facultad de Agronomía* 20 (2): 229-234.

SEPASKHAH A.R., A. KANOONI, M.M. GHASEMI. 2003. Water table contributions to corn and sorghum water use. *Agricultural Water Management* 58, 67-79.

SERIO L., P. MARTIN y G. MURPHY. 2010. Evaluación de una metodología de pronóstico estadístico para la condición hídrica del suelo en la región pampeana argentina. *Agriscientia*, vol. XXVI: 11-17.

SOPPE R.W.O., J.E. AYARS. 2003. Characterizing ground water use by safflower using weighing lysimeters. *Agricultural Water Management* 60: 59–71.

TOLLENAR M., and E.A. LEE. 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research* 75: 161-169.

UHART S. A., and F.H. ANDRADE. 1995. Nitrogen deficiency in maize. I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning and kernel set. *Crop Sci.* 35: 1376-1383.

WALKLEY A., A. BLACK. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29–37.

YAMOAH C. F., D.T. WALTERS, C. A. SHAPIRO, C.A. FRANCIS, M.J. HAYES. 2000. Standardized precipitation index and nitrogen rate effects on crop yields and risk distribution in maize. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 80: 113-120.

ANEXOS

En el soporte digital adjunto (CD) se presenta la información organizada en tablas de datos para las distintas variables de suelo, napa y de cultivo determinadas durante el desarrollo de este trabajo de tesis.