



**UNIVERSIDAD DE CASTILLA-
LA MANCHA**
Departamento de Producción
Vegetal y Tecnología Agraria
Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Agrónomos
España



**CENTRO REGIONAL DE ESTUDIOS
DEL AGUA**
Universidad de Castilla- La Mancha
España



**INSTITUTO NACIONAL DE
TECNOLOGIA AGROPECUARIA**
Pergamino, Buenos Aires
Argentina



ESTUDIO DEL USO DEL AGUA Y DEL NITROGENO DENTRO DEL MARCO DE UNA AGRICULTURA SOSTENIBLE EN LAS REGIONES MAICERAS CASTELLANO-MANCHEGA Y ARGENTINA

**Tesis Doctoral presentada por
Marisa Maturano**



**Directores de Tesis:
Arturo de Juan Valero
Edgardo Guevara
Jose Maria Tarjuelo Martin-Benito**

Albacete, 2002

*a Martha, Pipo y Daniela
a Alberto
a mis amigos*

Abstract

The objective of this work is to get a better understanding about the effects of water, nitrogen, and carbon economy on development, growth, and grain yield of corn (*Zea Mays* L.) at Pergamino (Argentina), and Albacete (España).

Changes in development and growth as a result of water and nitrogen interactions (Pergamino, 33° 56' S; 60° 33' W; and 65.5 m altitud); and nitrogen levels (Albacete, 39° 02' 50" N, 02° 05' 10" W, and altitud: 699) were studied. The study was carried out during 1999-2000 growing cycle at Pergamino, and in a two-year study (1999 and 2000) at Albacete. Growth was analyzed trough a classic growth analysis, and trough the LAI behavior, photosynthetic active radiation interception and absorption, radiation use efficiency, dry matter partitioning to ear, effective grain filling period and yield components. The effect of water and nitrogen levels on root volumetric length, water consumption, and water use efficiency were evaluated. Nitrogen uptake, translocation, nitrogen use efficiency, and nitrogen residual levels depended on crop management were also studied.

Results showed that at Pergamino, water was the principal factor limiting corn production, because it affected all the process that have been under studied. Meanwhile, nitrogen starvation had its principal effect on radiation use efficiency, ear growth rate, and dry matter partitioning to reproductive sinks. There were no positive responses on the different physiological process under studied with nitrogen levels up to 90 kgN ha⁻¹. N availability was hardly related to water availability. Probability of drought makes difficult to design a fertilization scheduling.

At Albacete, nitrogen levels over 150 kgN ha⁻¹ have a principal risk on environment degradation and promote a luxurious consumption. According to the fertilization management that farmers do, taking into account residual N in the fertilization prevision is a fundamental goal.

We propose to continue this kind of work in order to modeling crop behavior in each environment, under different management practices as a function of climatic frequency studies. This kind of studies will allow us to identify limiting factors that affects crop yield, to know the risk of applying a practice management, and to improve crop practices to preserve environment quality.

Resumen

El objetivo del presente trabajo es generar y profundizar los conocimientos sobre los efectos del agua, nitrógeno y economía del carbono asociados al crecimiento, desarrollo y formación del rendimiento del cultivo de maíz (*Zea Mays* L.) en el ambiente Pergamino (Argentina) y Albacete (España).

Se estudiaron las modificaciones producidas por la interacción agua-N (Pergamino, 33° 56' S; 60° 33' O; y 65.5 s.n.m) en un ciclo agrícola (1999-2000), y N (Albacete, 39° 02' 50" N, 02° 05' 10" O, y 699 m s.n.m.) durante dos ciclos agrícolas (1999 y 2000), sobre el desarrollo y el crecimiento del cultivo de maíz para los distintos escenarios de manejo utilizados. En un diseño estadístico El crecimiento se estudió mediante un análisis clásico; y mediante su descomposición en tres grandes procesos: la evolución del índice de área foliar, la interceptación y absorción de la radiación fotosintéticamente activa y su conversión en materia seca aérea, y la partición de fotoasimilados a la espiga, tasa de llenado de los granos y componentes del rendimiento. Se evaluó el efecto de los diferentes factores agronómicos estudiados sobre la longitud volumétrica radicular, el consumo hídrico y la eficiencia en el uso del agua. Se estudió la absorción, acumulación y removilización de N, eficiencias en el uso del N, y niveles de N residual según la estrategia de manejo de cultivo.

En Pergamino, se encontró que el agua es el factor mas limitante en la producción, afectando todos los procesos estudiados, mientras que la presencia de una deficiencia nitrogenada, afectó fundamentalmente la eficiencia en el uso de la radiación, el crecimiento de la espiga y la partición de asimilados hacia destinos reproductivos. No se encontraron respuestas positivas, en los diferentes procesos fisiológicos analizados, con dosis superiores a los 90 kgN ha⁻¹. La disponibilidad de N está fuertemente relacionada con la disponibilidad hídrica. La posibilidad de ocurrencias de sequías estacionales en este ambiente generan incertidumbre en la planificación de la fertilización en cultivos de secano. En Albacete, se determinó que dosis de fertilización nitrogenadas superiores a los 150 kgN ha⁻¹, propician un consumo de lujo y son potencialmente contaminantes del ambiente, y que, de acuerdo al tipo de manejo de la práctica de fertilización que se realiza en la zona, es fundamental considerar el N residual para la previsión de la fertilización.

Se propone dar continuidad a este tipo de estudios para modelizar el funcionamiento del cultivo de maíz en cada ambiente, en distintos escenarios de trabajo y en función de estudios climáticos frecuenciales, identificar los factores mas limitantes de la producción del cultivo en cada ambiente, conocer el riesgo de aplicación de una tecnología, y mejorar las recomendaciones de manejo para preservar la calidad del ambiente.

INDICE GENERAL

	Pág.
1. Introducción y objetivos	1
1.1 Introducción	1
1.2 Finalidad	6
1.3 Objetivos	6
1.4 Objetivos parciales	6
2 Antecedentes Bibilográficos	7
2.1 Desarrollo crecimiento y rendimiento del cultivo del cultivo de maíz	7
2.1.2 Desarrollo	7
2.1.3 Crecimiento	9
2.1.3.1 Indices de crecimiento	9
2.1.4 Balance radiativo	10
2.1.4.1 Eficiencia en el uso de la radiación	11
2.1.5 Rendimiento	11
2.2 Efecto del estrés hídrico en el desarrollo reproductivo del cultivo de maíz	12
2.3 Programación del riego	13
2.4 Crecimiento radicular. Efecto del agua y del nitrógeno	15
2.5 Eficiencia en el uso del agua	16
2.6 Mediciones indirectas del estado hídrico en planta	16
2.6.1 Potencial xilemático	16
2.6.2 Temperatura foliar	17
2.7 Efecto del nitrógeno en el funcionamiento del cultivo de maíz	18
2.8 Eficiencia en el Uso del Nitrógeno	21
3 Material y Métodos	23
3.1 Ambiente I: Pergamino, Buenos Aires, Argentina	23
3.1.1 Localización y duración del ensayo	23

3.1.2 Caracterización agroclimática de la región maicera argentina	24
3.1.2.1 Temperaturas	24
3.1.2.2 Período libre y fechas extremas de heladas	24
3.1.2.3 Precipitaciones	24
3.1.2.4 Radiación solar global	26
3.1.2.5 Evapotranspiración máxima del cultivo de maíz	26
3.1.3 Condiciones climáticas del ciclo agrícola 1999 – 2000	27
3.1.3.1 Temperaturas	27
3.1.3.2 Tiempo térmico	28
3.1.3.3 Precipitaciones	29
3.1.3.4 Radiación solar global	29
3.1.4 Caracterización edáfica	31
3.1.4.1 Breve reseña geológica	31
3.1.4.2 Clasificación del suelo	31
3.1.4.3 Caracterización del perfil del suelo	31
3.1.5 Diseño experimental	33
3.1.6 Metodología de programación del riego	35
3.1.7 Fitotecnia del maíz	37
3.1.8 Mediciones realizadas	37
3.1.8.1 Suelo	37
3.1.8.2 Cultivo de maíz	38
a) Análisis de crecimiento y desarrollo	38
b) Cuantificación del balance radiativo	39
c) Medición de la densidad volumétrica radical	41
3.1.8.3 Estudio de la dinámica de absorción de nitrógeno	42
3.1.8.4 Cuantificación del grado de estrés hídrico	43
3.1.8.5 Medición del rendimiento en grano a cosecha y sus componentes. Cálculo del índice de cosecha (HI).	45
3.1.8.6 Tratamiento estadístico de los datos	45
3.2 Ambiente II: Albacete, Castilla – La Mancha, España.	46
3.2.1 Localización y duración de los ensayos	46
3.2.2 Caracterización agroclimática	47
3.2.2.1 Temperaturas	47
3.2.2.2 Período libre de heladas y fechas extremas de heladas	48
3.2.2.3 Precipitaciones	48

3.2.2.4 Radiación solar global	49
3.2.2.5 Evaporación	50
3.2.2.6 Déficit pluviométrico	50
3.2.3 Condiciones climáticas de las campañas 1999 y 2000	51
3.2.3.1 Temperatura	51
3.2.3.2 Tiempo Térmico	52
3.2.3.3 Precipitaciones	52
3.2.3.4 Radiación solar global	53
3.2.4 Caracterización edáfica	54
3.2.4.1 Breve reseña geológica de la zona de ensayo	54
3.2.4.2 Clasificación del suelo de la parcela experimental	54
3.2.4.3 Caracterización del perfil del suelo	54
3.2.5 Diseño experimental	57
3.2.6 Metodología de la programación del riego	58
3.2.6.1 Calidad de agua de riego utilizada	59
3.2.7 Fitotecnia del maíz	60
3.2.8 Mediciones realizadas en los ciclos 1999 y 2000	60
3.2.8.1 Suelo	60
3.2.8.2 Cultivo de maíz	60
a) Análisis de crecimiento y desarrollo	60
b) Cuantificación del balance radiactivo	61
c) Medición de la densidad volumétrica radical	61
3.2.8.3 Estudio de la dinámica de absorción de nitrógeno	61
3.2.8.4 Cuantificación del grado de estrés hídrico	61
3.2.8.5 Medición del rendimiento en grano y sus componentes. Cálculo del Índice de Cosecha (HI)	62
3.2.8.6 Tratamiento estadístico de los datos	62
4. Resultados y Discusión	65
4.1 Resultados y discusión ambiente I	65
4.1.1 Desarrollo, crecimiento y rendimiento: ambiente I	65
4.1.1.1 Desarrollo del cultivo de maíz en el ambiente I	65
4.1.1.2 Producción de biomasa aérea y velocidad de crecimiento	66

4.1.1.3 Participación porcentual de los diferentes órganos aéreos en la materia seca total	70
4.1.1.4 Area foliar	77
4.1.1.5 Análisis de crecimiento	79
a) Índice de área foliar (IAF)	79
b) Duración del área foliar (LAD)	81
c) Tasa de crecimiento absoluto del cultivo (“Crop Growth Rate”, CGR)	81
d) Velocidad relativa de crecimiento (“Relative Growth Rate”; RGR)	83
e) Velocidad de asimilación neta (“Net Assimilation Rate”, NAR)	85
f) Relación de área foliar (“Leaf area ratio”, LAR)	86
g) Tasa de crecimiento absoluto de la Espiga (EGR)	87
4.1.1.6 Radiación fotosintéticamente activa interceptada por la cubierta vegetal (RFAi)	89
4.1.1.7 Absorción de radiación solar y conversión en materia seca	92
4.1.1.8 Acumulación y partición de fotoasimilados	96
4.1.1.9 Crecimiento del grano	99
a) Tasa de llenado del grano	99
b) Tasa de crecimiento del grano	102
4.1.1.10 Relación entre la tasa de llenado de grano y la duración del área foliar	102
4.1.1.11 Rendimiento y sus componentes	103
4.1.1.12 Número de granos producidos por unidad de superficie y radiación fotosintéticamente activa interceptada y absorbida	105
4.1.1.13 Relación entre los componentes de rendimiento	107
4.1.2 Efecto del agua sobre el funcionamiento del cultivo	111
4.1.2.1 Programación de riego y precipitaciones	111
4.1.2.2 Crecimiento del sistema radicular	113
a) Distribución porcentual del sistema radicular	115
b) Relación sistema radicular/ sistema aéreo de las plantas de maíz	117

4.1.2.3 Consumo hídrico	118
4.1.2.4 Eficiencia en el uso del agua	123
4.1.2.5 Estado hídrico en planta. Mediciones indirectas	126
4.1.2.6 Relación entre el potencial xilemático y la temperatura de la cubierta vegetal	132
4.1.3 Efecto del nitrógeno sobre el funcionamiento del cultivo	135
4.1.3.1 Caracterización de los componentes del balance nitrogenado	135
a) N absorbido por el cultivo. Reparto del N entre los diferentes órganos aéreos	135
b) Contenido de N-NO^{-3} y N-NH^{+4} edáfico en la siembra y la recolección	141
c) Aporte de N con el agua de riego	142
d) N mineralizado	142
4.1.3.2 Eficiencia en el uso del nitrógeno	143
4.2 Resultados y discusión ambiente II	151
4.2.1 Desarrollo, crecimiento y rendimiento: ambiente II	151
4.2.1.1 Desarrollo del cultivo de maíz en el ambiente II	151
4.2.1.2 Producción de biomasa aérea y velocidad de crecimiento	152
4.2.1.3 Participación porcentual de los distintos órganos aéreos en la materia seca total	154
4.2.1.4 Area foliar	160
4.2.1.5 Análisis de crecimiento	161
a) Índice de área foliar (IAF)	161
b) Duración del área foliar (LAD)	162
c) Tasa de crecimiento absoluto del cultivo (“Crop Growth Rate”, CGR)	163
d) Velocidad relativa de crecimiento (“Relative Growth Rate”; RGR)	164
e) Velocidad de asimilación neta (“Net Assimilation Rate”, NAR)	165
f) Relación de área foliar (“Leaf area ratio”, LAR)	166
g) Tasa de crecimiento absoluto de la Espiga (EGR)	167
4.2.1.6 Radiación fotosintéticamente activa interceptada por la cubierta vegetal (RFAi)	168

4.2.1.7 Absorción de radiación solar y conversión en materia seca	168
4.2.1.8 Acumulación y partición de fotoasimilados	170
4.2.1.9 Análisis de crecimiento del grano	172
a) Tasa de llenado del grano	172
b) Tasa de crecimiento del grano	174
4.2.1.10 Relación entre la tasa de llenado de grano y la duración del área foliar	175
4.2.1.11 Rendimiento y sus componentes	176
4.2.1.12 Número de granos producidos por unidad de superficie y radiación fotosintéticamente activa interceptada y absorbida	177
4.2.1.13 Relación entre los componentes de rendimiento	177
4.2.1.14 Índice de cosecha (IC)	180
4.2.2 Efecto del agua sobre el funcionamiento del cultivo	183
4.2.2.1 Programación de riego y precipitaciones	183
4.2.2.2 Crecimiento del sistema radicular	184
a) Distribución porcentual del sistema radicular	186
b) Relación sistema radicular/ sistema aéreo de las plantas de maíz	188
4.2.2.3 Consumo hídrico	189
4.2.2.4 Eficiencia en el uso del agua	192
4.2.2.5 Estado hídrico en planta. Mediciones indirecta	194
4.2.2.6 Relación entre el potencial xilemático y la temperatura de la cubierta vegetal	198
4.2.3 Efecto del nitrógeno sobre el funcionamiento del cultivo	201
4.2.3.1 Caracterización de los componentes del balance nitrogenado	201
a) Repartición de N entre diferentes órganos aéreos	201
b) Contenido de $N-NO^{-3}$ y $N-NH^{+4}$ edáfico a la siembra y cosecha	207
c) Aporte de N con el agua de riego	209
d) N mineralizado	209
4.2.3.2 Eficiencia en el uso del nitrógeno	210
4.3 Comparación de la producción del cultivo de maíz en condiciones no limitantes, entre ambientes	215

5. Conclusiones	217
6. Bibliografía	223
7. Agradecimientos	245

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1. Introducción

Uno de los objetivos en la agronomía es optimizar los rendimientos económicos de los cultivos permitiendo la sostenibilidad de la agricultura. El incremento de rendimiento de los cultivos está asociado al incremento en el uso de insumos, lo que representa un subsidio energético al sistema productivo. La incorporación de tecnología a los sistemas productivos requiere del conocimiento de la metodología de mayor respuesta a su aplicación, es decir, el conocimiento de los momentos y formas de aplicación de la misma, con el fin de disminuir su impacto sobre el medio. Para conocer esta respuesta, es necesario estudiar en profundidad los procesos de crecimiento, desarrollo y formación del rendimiento de los cultivos en función de las economías del agua, carbono y nitrógeno en cada ambiente estudiado.

En la producción de cultivos tanto la fertilización como el riego son dos prácticas fundamentales para el incremento de los rendimientos. Sin embargo, el desconocimiento de su correcto manejo tiene como principal riesgo su impacto negativo sobre el ambiente, la no conservación de recursos y el uso inadecuado de insumos. Un efecto inmediato será la degradación de la calidad de las aguas subterráneas, así como la posible degradación de las propiedades físicas y químicas del suelo.

El interés en la relación entre la producción de cultivos y la eficiencia en el uso del agua se incrementa debido a la escasez y costos crecientes del agua de riego. En muchos sistemas de producción tanto el agua como el nitrógeno son limitantes para el cultivo del maíz (Cox *et al.*, 1993); por lo tanto, la optimización de ambos insumos producirán tanto rendimientos como resultados económicos aceptables.

Estudiar, entender y evaluar las consecuencias de la aplicación de tecnología, y su interacción con las diferentes condiciones ambientales (precipitaciones, características edáficas, etc.), es fundamental para poder identificar aquellas interacciones tendientes a lograr una mayor eficiencia en el uso de insumos, al tiempo que logren la conservación del ambiente, con el objetivo de optimizar el rendimiento económico de los cultivos. Para lograr este objetivo, es fundamental tener una visión global en la comprensión de los procesos involucrados en el funcionamiento de los cultivos.

A través del tiempo, se ha llegado a conocer aspectos relevantes en la producción de los cultivos como son las economías de agua, nitrógeno y carbono, permitiendo, a nivel práctico, ir adecuando las prácticas de manejo de cultivo para aumentar los rendimientos. En general, cada uno de los aspectos antes mencionados ha sido estudiado en forma individual y ha aportado, en forma puntual, al conocimiento.

Es a partir de la década de los años 70, con el desarrollo de los modelos de simulación de cultivos, sean empíricos, mecanicistas, estocásticos, determinísticos, o sus combinaciones, cuando estos aportes individuales empiezan a relacionarse y, a través de un proceso de retroalimentación, estos modelos se han ido mejorando y dando una visión integrada del funcionamiento de los cultivos (Passioura, 1996). En la práctica, la mayoría de los modelos de simulación constituyen un compromiso entre rigor científico y utilidad (Monteith, 1996)

Normalmente, la estructura de un modelo de simulación está planteada a través de la interrelación de submodelos como, por ejemplo, lo son los de agua,

nitrógeno, etc. Cada uno de ellos puede estar diseñado con diferente nivel de detalle (Boote *et al.*, 1996). Es importante conocer en el ambiente en estudio cuáles son los factores mas relevantes en la producción para elegir el modelo que tenga mayor precisión en esos aspectos. Cómo puntualizan Sinclair y Seligman, 1996, no existen modelos universales.

Los resultados obtenidos con los modelos de simulación no son extrapolables, es necesaria la experimentación e investigación para la calibración y validación de los mismos y el conocimiento del grado de precisión en sus predicciones.

Una de las principales ventajas del uso de modelos de simulación en investigación es que constituyen una forma genuina para fomentar el trabajo interdisciplinario. Contar con modelos capaces de predecir el desarrollo del cultivo y su impacto en el medio, como resultado de prácticas culturales es una importante tarea para el desarrollo de una agricultura sustentable. (FAIR 1 CT95-0088. 1999)

Descripción de los escenarios de trabajo

En la región Pampeana Húmeda de la Argentina, el nitrógeno y el agua constituyen los factores mas limitantes de la oferta ambiental. Es necesario investigar para lograr la adecuación de prácticas de manejo de cultivo, en cuanto a momento y forma de realización, para lograr el máximo aprovechamiento de dicha oferta.

Para la región Cerealera Argentina, el aporte hídrico mas importante en la zona lo constituyen las precipitaciones. Estas se reciben en mayor proporción desde la primavera hasta el otoño, incrementándose hacia el S las lluvias invernales. Tomando como ejemplo la localidad de Pergamino, ubicada en el centro de la región "maicera núcleo", pudo constatarse que durante el período comprendido entre los meses de octubre a abril se reciben en promedio 735 mm (76%) de un total anual de 965 mm, siendo el valor de la mediana (que corresponde al de mayor frecuencia) de 951 mm, para un total de 89 años (Totis de Zeljkovich, comunicación personal).

La variabilidad de las lluvias de la zona determina, por ejemplo, para el mes de diciembre (coincidente con la floración del maíz), un rango de 446 mm (entre 2.7 y 448.6 mm). Además, durante el mismo, caben esperarse, en el 50% de los años, valores entre 134 y 61 mm, ya que existe una probabilidad del 75% de tener lluvias inferiores a 134 mm y una probabilidad del 25% de tener lluvias inferiores a 61 mm (Totis de Zeljkovich, comunicación personal).

Las precipitaciones de la región presentan además gran variabilidad espacial y elevada intensidad, hecho que, sumado a las características físicas de gran parte de los suelos y a los elevados valores de evapotranspiración máxima (ETM) que se registran durante el verano, determina la ocurrencia de sequías de distinta intensidad y duración. Éstas son la causa principal de la variabilidad interanual de los rendimientos del cultivo de maíz en el área, y de la respuesta a la fertilización nitrogenada. De ahí que, para el período de 18 años (entre 1980-81 y 1997-98), en el Ensayo de Labranzas de la Estación Experimental Agropecuaria (E.E.A) de Pergamino, se haya encontrado una variabilidad de 1.2 t ha^{-1} en parcelas de maíz sin fertilización nitrogenada y de 3.4 en aquellas con agregado de nitrógeno, con rendimientos promedio de 5.9 y 6.9 t ha^{-1} , respectivamente (Totis de Zeljkovich *et al.*, 1992a y 1994; Blotta, comunicación personal).

La ocurrencia de sequías estacionales en esta región argentina, coincide con las fases de mayor sensibilidad a la falta de agua de los principales cultivos: iniciación del primordio de espiga (fines de agosto) y antesis (fines de octubre), para el caso de trigo (Fisher, 1973), floración (principios de febrero) y última semana de desarrollo de vainas y primeros días de llenado de las mismas (mediados a fines de febrero) para la soja (Reicosky y Heatherly, 1990), y, a partir de octava hoja (V8) hasta mediados del período de llenado de granos (Classen y Shaw, 1970; Moss y Downey, 1971; Westgate y Boyer, 1986 a,b).

El riego aparece como una práctica capaz de aumentar e incrementar los rendimientos entre años. En esta zona, están en condiciones de ser regadas 865000 ha de acuerdo a un relevamiento de disponibilidad de agua subterránea (Santa Cruz, 1988). Es ésta una práctica de reciente incorporación en la región y, actualmente, en difusión; se realiza a partir del acuífero Pampeano. Es por esta razón que no existe en la zona una cultura de riego.

La incorporación de la práctica del riego implica el conocimiento de la disponibilidad de agua (calidad y cantidad), del cultivo (momentos de mayor respuesta a la aplicación del riego), del suelo (capacidad de retención de agua, características físico-químicas para poder evaluar un potencial riesgo de degradación, etc), y del clima para una correcta programación.

De acuerdo a una encuesta sobre Riego Complementario en Cultivos Extensivos en el Norte de la Provincia de Buenos Aires (Maturano, 1996), no se utilizan métodos de conducción de riego ni se manejan estrategias para definir cuándo y cuánto regar. No se hace un uso eficiente del agua de riego, ni se apunta a la conservación de los recursos suelo y agua. Al no existir, hasta el momento, una clasificación de aptitud de uso del agua de riego adaptada para la zona y, al no conocerse con exactitud la capacidad y dinámica de recarga de los acuíferos que se utilizan para riego, es fundamental utilizar el agua de riego en forma eficiente. Fundamentalmente, una correcta programación de riego permitirá optimizar el aprovechamiento del agua aportada por precipitaciones, cuya magnitud es relevante en esta zona, y, entonces, a disminuir la pérdida por lixiviación del nitrógeno.

El acuífero Pampeano del Partido de Pergamino, que se encuentra en zonas donde se practica la producción de granos, está poco contaminado con nitratos (Andriulo *et al.*, 2000). La agricultura intensiva reciente plantea interrogantes con respecto a la contaminación. Con respecto a la fertilización, en aquellos casos en que se apliquen dosis superiores a las necesarias, aumentará el stock de N fácilmente mineralizable y mas fuerte será la mineralización de N orgánico (Mary *et al.*, 1997). Es probable entonces esperar un aumento en la contaminación con nitratos debido a un posible aumento de la mineralización edáfica. La decisión de realizar hoy una fertilización ajustada a las necesidades del cultivo podrá visualizarse en la base del acuífero varias décadas posteriores. En la actualidad, los valores de NO_3^- presentes en el agua subterránea, en zonas agrícolas es de 24 ± 9 ppm.

La utilización del agua de riego en forma eficiente implica el conocimiento de los períodos de mayor respuesta a la aplicación del mismo y los umbrales de riego en cada etapa de desarrollo del cultivo. La conducción del riego se refiere a la aplicación correcta en tiempo y cantidad del agua de riego para lograr el objetivo de riego propuesto (Heermann *et al.*, 1990)

En la actualidad, la agricultura de regadío produce el 33 % de los alimentos a nivel mundial, y se prevé que va a producir el 50 % alrededor del año 2025, debido a la expansión del riego en los países desarrollados (Pereira *et al.*, 1999). Los

regadíos consumen más del 70 % de la provisión mundial de agua (Secker *et al.*, 1999). La escasez de agua frecuentemente limita la productividad de los cultivos en la región de Castilla-La Mancha, España. El riego suplementario es una herramienta disponible para los agricultores para incrementar la productividad de los cultivos. El cultivo del maíz (*Zea mays* L.) ocupa la mayor proporción de la superficie regada en la provincia de Albacete, España.

La mayor parte de la superficie es regada mediante la utilización del Acuífero de la Mancha Oriental, el cual está siendo agotado en algunas zonas, particularmente en el centro y sur de la provincia. Datos estadísticos obtenidos por López Fuster (2000) revelan que más de 0.008 millones de ha de cultivos bajo riego (0.021 millones ha corresponden al cultivo de maíz bajo riego), son cultivados en el Acuífero de La Mancha Oriental. Hacia 1975, el nivel medio del acuífero había disminuído más de 22 m. Esta disminución ha ido decreciendo en la mayor parte del área, promediando 0.95 m por año, desde 1975 a 1998. El agotamiento del acuífero sumado al costo creciente de bombeo ha resultado en numerosas investigaciones iniciadas en riego deficitario, con el objetivo de reemplazar al riego total (Martín de Santa Olalla *et al.*, 1992; Martín de Santa Olalla y de Juan, 1993a,b; Martín de Santa Olalla *et al.*, 1994a,b; de Juan *et al.*, 1999; Fabeiro *et al.*, 2001, y 2002).

López Fuster (2000) ha informado acerca de rendimientos en el cultivo de maíz de 0.26, 7.03 and 12.61 Mg ha⁻¹, para cultivos de secano, con riego deficitario y completo, respectivamente, y retornos marginales de 0.95-1.75 kg m⁻³, para riego deficitario y 1.83-1.63 kg m⁻³ para riego completo y excesivo, respectivamente. El uso de fertilizantes, su eficiencia e impacto ambiental de la aplicación de fertilizantes bajo condiciones de riego no han sido estudiadas. La región de Castilla – La Mancha se caracteriza por tener un clima mediterráneo templado con degradación continental, caracterizado por contrastes térmicos notables diarios y estacionales y por una distribución desequilibrada de las escasas lluvias.

En la planicie castellano – manchega, la pluviometría es de entre 400 y 600 mm al año, siendo muy frecuentes las precipitaciones cercanas al límite inferior del intervalo. Estos valores son el resultado del estudio de una serie climática de muchos años. Si se estudia un ciclo climático de pocos años, el año lluvioso puede ser varias veces más húmedo que el más seco, siendo los períodos prolongados de sequía relativamente frecuentes en la región, con las consecuencias agronómicas que eso conlleva.

En cuanto a la distribución anual de las precipitaciones, siguen el esquema de los climas semiáridos mediterráneos. El verano destaca como la estación más seca, registrando sólo el 10 % de las precipitaciones anuales. Los valores especialmente bajos se dan en el mes de julio. Es por esta razón que el cultivo de maíz en la región se conduce exclusivamente bajo condiciones de riego, supliéndose por medio de esta técnica sus necesidades hídricas. El cultivo de maíz está incluido, en la región castellano-manchega, dentro de los sistemas extensivos de producción tradicionalmente de regadío .

La programación del riego en la zona se realiza siguiendo el método simplificado del balance hídrico del suelo (Martín de Santa Olalla y de Juan, 1993; y de Juan *et al.* 1999), basados en la metodología de la FAO (Doorembos y Pruitt, 1984; y Doorembos y Kassam, 1986) aunque sin constatación científica en esta área geográfica. Debido al escaso desarrollo de los suelos (entre 0.35 y 1 m de profundidad), limitados en profundidad por la existencia de horizontes calizos y petrocálcicos, y a los altos niveles de fertilización nitrogenada, es fundamental

calibrar un correcto manejo de ambos insumos de producción para evitar la contaminación de los acuíferos por nitratos.

Los nitratos de origen agrícola constituyen la principal fuente de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Esta amenaza justifica todas las medidas preventivas (Plénet, 1995). Numerosos estudios de campo han dado como resultado funciones empíricas de respuesta en el rendimiento que demostraban la importancia de adecuar la disponibilidad de N al objetivo de rendimiento en grano (Hanway, 1962). Estos estudios, tradicionalmente, han sido analizados estadísticamente, generando ecuaciones específicas para el ambiente estudiado. Las características del suelo, variaciones climáticas, y manejo del cultivo dificultan la extrapolación de estas ecuaciones a otros ambientes (Muchow y Sinclair, 1995). El interés creciente en optimizar el uso del agua y del nitrógeno no es sólo para maximizar los rendimientos y la calidad del cultivo, sino también para reducir las pérdidas de N por lixiviación. Los nitratos son altamente solubles en agua y, potencialmente, contribuyen a la contaminación ambiental.

La presencia de NO_3^- en aguas subterráneas puede ser debida a diferentes causas, pero la fertilización nitrogenada y la mineralización de N orgánico son las principales fuentes de contaminación (Keeney, 1986). Pérdidas significativas por lixiviación han sido medidas en numerosos cultivos (Pratt, 1984; Katyál *et al.*, 1985; Ritter, 1989; Theocharopoulos *et al.*, 1996). Los NO_3^- lixiviados representan la pérdida de un nutriente muy valioso para el cultivo de maíz y, consecuentemente, un costo en la agricultura. Su presencia en aguas superficiales puede causar problemas ambientales como la eutroficación (Keeney y Follett, 1991). Su presencia en agua subterránea en altos niveles puede causar problemas para la salud humana. La Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos de América establece el umbral para consumo humano en 10 mg L^{-1} N como N- NO_3 en agua de bebida como medida de prevención en contra de la metahemoglobinemia (reducción de la capacidad de la sangre de transportar oxígeno) desarrollada en niños (Fletcher, 1991).

El movimiento de nitratos en los suelos y las pérdidas por lixiviación pueden ser afectadas por varios factores (Hergert, 1986; Hagin y Lowengart, 1996; Criado, 1996; Sieling *et al.*, 1997; Kaluli *et al.*, 1999). Las principales causas son: 1) transformaciones de N en el suelo, 2) dinámica de absorción de N por parte del cultivo, 3) lluvias, 4) textura del suelo, y 5) manejo del riego y la fertilización nitrogenada. Cuando el riego, o las lluvias, exceden la evapotranspiración existe un riesgo potencial de lixiviación. La optimización de la aplicación de agua y N y la reducción de la lixiviación se logra con la incorporación de los mismos de acuerdo a las necesidades del cultivo. En general, se logran las mayores eficiencias en el uso del N con aplicaciones divididas del mismo (Pearson y Jacobs, 1987; Sainz Rozas, 1997). Diez *et al.* (1994) encontraron que cuando el fertilizante aplicado es urea las pérdidas por lixiviación son mayores que cuando el fertilizante aplicado es de liberación lenta. Cuando el suelo está abundantemente colonizado por el sistema radicular, las pérdidas por lixiviación disminuyen debido al incremento en la absorción del nutriente por parte del cultivo (Keeney, 1986). Sin embargo, la lixiviación de N- NO_3 es común y, algunas veces, un serio problema cuando son utilizados residuos sólidos orgánicos (Bacon, 1995; Moreno *et al.*, 1996).

Recientemente, López Fuster (2000) y JCRMO (2000), han demostrado que la mayor parte de la zona tradicionalmente agrícola del acuífero de la Mancha Oriental presenta valores en el rango de los $25\text{-}50 \text{ mg L}^{-1} \text{ NO}_3$ ($5\text{-}15 \text{ mg L}^{-1} \text{ N-NO}_3$), y excede los $110 \text{ mg L}^{-1} \text{ NO}_3$ ($25 \text{ mg l}^{-1} \text{ N-NO}_3$) en algunas zonas. El manejo tradicional de la fertilización nitrogenada en maíz en la zona consiste en la aplicación

de una dosis de 300 kg N ha⁻¹ en varias aplicaciones con el agua de riego. La legislación en Castilla- La Mancha apunta a la conservación de la calidad del agua subterránea. Todos los agricultores en la región deben seguir las mejores prácticas de manejo del cultivo con el objetivo de satisfacer las necesidades del mismo y reducir las pérdidas.

La dosis de N aplicada es la principal causa que influencia el riesgo potencial de contaminación por parte del agricultor. Estudios de crecimiento en el cultivo de maíz en Albacete no han sido referidos, y existen pocos trabajos realizados para conocer las tasas de crecimiento de este cultivo en este ambiente. Para mejorar la eficiencia en el uso del N en un sistema específico de producción, resulta de mucha utilidad estudiar los efectos de la aplicación de N en el desarrollo del cultivo, características del canopeo y la producción de materia seca en el tiempo. En la región de Castilla – La Mancha, el manejo convencional de fertilización nitrogenada se realiza con la aplicación de dosis de alrededor de 300 kgN ha⁻¹. Esta dosis se aplica como abonado de sementera, y, luego de cobertera, normalmente en forma conjunta con el agua de riego.

Existe una correlación positiva entre el contenido de nitrógeno foliar, el nivel de fertilización nitrogenada y el rendimiento. Para la zona cerealera argentina no se encontró respuesta a la aplicación de fertilizante nitrogenado en dosis superiores a los 90 kgN ha⁻¹ para cultivos de maíz de secano (Meira *et al.*, 1999). Las estadísticas del año 1999 señalan que los fertilizantes nitrogenados son los mas empleados en el cultivo de maíz, con un consumo cercano a las 169000 tN año⁻¹, seguidos por los fosfatados (Melgar *et al.*, 1999).

2. Finalidad

La finalidad de la presente Tesis Doctoral es evaluar y reducir el impacto negativo de las prácticas agrícolas (riego y fertilización nitrogenada) en el medio y optimizar los rendimientos.

3. Objetivo

El objetivo del presente trabajo es generar y profundizar los conocimientos sobre los efectos del agua, nitrógeno y economía del carbono asociados al crecimiento, desarrollo y formación del rendimiento del cultivo de maíz (*Zea Mays* L.) en el ambiente Pergamino, (Argentina) y Albacete, (España).

4. Objetivos parciales

- 1) Estudiar la interacción entre riego y fertilización nitrogenada, tomando como criterios las dosis y los momentos de aplicación.
- 2) Estudiar las modificaciones producidas por la interacción agua-N (Pergamino) y N (Albacete) sobre el desarrollo y el crecimiento del cultivo de maíz para los distintos escenarios de manejo utilizados.
- 3) Cuantificar las variaciones en las Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) y Eficiencia en el Uso del Nitrógeno (EUN) para diferentes estrategias de manejo del cultivo de maíz.

2. ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS

2.1. Desarrollo, crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz

2.1.2 Desarrollo

La temperatura del aire y el fotoperíodo son los principales factores que afectan el desarrollo del cultivo de maíz. (Tollenar *et al.*, 1979; Bonhomme *et al.*, 1991). El genotipo influye también el desarrollo (Derieux y Bonhomme, 1982a; Fisher y Palmer, 1984). Las deficiencias de agua, luz y nutrientes también pueden afectar el desarrollo del cultivo, dependiendo del momento de ocurrencia de las mismas y de la magnitud (Andrade *et al.*, 1996). La respuesta de la velocidad de desarrollo a la temperatura es aproximadamente lineal en el rango térmico comprendido entre una temperatura base (temperatura mínima a la cual la velocidad de desarrollo es nula), y una temperatura óptima a la cual se alcanza el máximo desarrollo, y por encima de la cual, el desarrollo se reduce progresivamente (Warrington y Kanemasu, 1983a; Ellis *et al.*, 1992). Esta temperatura se sitúa entre 30 y 34 °C (Gilmore y Rogers, 1958, Tollenar y Hunter, 1979, Kiniry y Bonhomme, 1991). La temperatura máxima a la cual cesa el desarrollo se encuentra entre 40 y 44 °C (Kiniry y Bonhomme, 1991).

El tiempo térmico ha sido utilizado frecuentemente como una variable independiente para describir el crecimiento y el desarrollo del cultivo (Dwyer y Stewart, 1986). Los índices térmicos acumulan varias combinaciones de temperaturas diarias por encima de un umbral. Este umbral tiene un rango de entre 6 y 8 °C (Bonhomme *et al.*, 1994; Warrington and Kanemasu, 1983a,b; Derieux y Bonhomme, 1994). Los modelos de desarrollo de mas amplia difusión utilizan una temperatura base de 8°C para la mayoría de los procesos considerados (Jones y Kiniry, 1986; Kiniry y Bonhomme, 1991; Kiniry 1991).

El tiempo térmico requerido para completar una determinada fase del ciclo del cultivo de maíz debería ser constante y únicamente dependiente del híbrido (Cutforth y Shakewich, 1989). Los índices térmicos mas comunes son Grados Días de Crecimiento ("Growing Degree Days", GDD; Wang, 1960) y Unidades Térmicas del cultivo ("Crop Heat Units", CHU, Brown *et al.*, 1993). Numerosos trabajos han sido desarrollados para predecir la fenología en función de la sumatoria térmica en diversos cultivos como el girasol (Sadras *et al.*, 1993), trigo (Jamieson *et al.*, 1995), *Cajanus cajan* L. (Omanga *et al.*, 1995), maíz (Shaykewich, 1995).

Estos índices proveen estimaciones confiables para la predicción del tiempo térmico requerido para el desarrollo vegetativo en maíz (intervalo entre siembra y emergencia de estigmas, R1), pero se ha demostrado que la estimación en el intervalo entre R1 y R6 (madurez fisiológica) varía con el ambiente y el año (Major *et al.*, 1983; Plett, 1992, Grant, 1989). Generalmente, el GDD sobrestima las unidades térmicas requeridas para el llenado de grano; esto sucede en años en donde las temperaturas son inferiores a las normales para el ambiente estudiado. Dwyer *et al.* (1999), desarrollaron un índice térmico general para el cultivo de maíz ("General Thermal Index", GTI), que predice en forma mas precisa el tiempo a madurez fisiológica que el GDD y CHU.

La sumatoria térmica necesaria para alcanzar un estado debería ser calculada con la temperatura del suelo hasta V6 (sexta hoja expandida), debido a que hasta la ocurrencia de esta etapa el meristema apical se encuentra por debajo de la superficie del suelo (Fortin y Pierce, 1991).

El meristema apical pasa por tres fases de desarrollo previas a la aparición de estigmas. Estas fases son la juvenil, la inductiva y la reproductiva. Los primordios vegetativos se inician durante las dos primeras, mientras que los reproductivos

durante la última. La sensibilidad a estímulos para la inducción floral comienzan durante la fase inductiva (temperatura y fotoperíodo) (Calder, 1964).

La tasa de aparición de primordios y de aparición de hojas está estrechamente relacionada con la temperatura del aire (Warrington y Kanemasu, 1983a). Sin embargo, cuando el meristema apical del maíz se sitúa cercano a la superficie del suelo durante las fases vegetativas y reproductivas, las tasas de iniciación y aparición están más asociadas con la temperatura existente cerca de la superficie del suelo que con la del aire (Hesketh y Dale, 1987). La actividad fotosintética foliar, su duración y los procesos de senescencia foliar están bajo un fuerte proceso de control térmico, aunque es importante incluir los metabolismos de agua y nitrógeno en estos procesos (Hesketh y Warrington, 1989).

La duración de la etapa que transcurre desde la emergencia a la floración femenina es dependiente del número de hojas iniciadas por la planta (Hesketh y Dale, 1987), y está determinado por la duración de las fases juvenil e inductiva. Los genotipos de maíz de ciclo más largo presentan un número total de hojas mayor, debido a su mayor requerimiento para completar el período hasta que el ápice diferencia a la etapa reproductiva, durante el cual ocurre la aparición de primordios foliares (Cirilo, 1994). La duración de la fase juvenil es genotipo específica (Kiniry *et al.*, 1983a) mientras que la inductiva depende del momento de iniciación de la floración masculina (Kiniry *et al.*, 1983a). El comienzo de la floración masculina está influenciada por la temperatura y el fotoperíodo. La iniciación de la panícula es retrasada por un incremento en el fotoperíodo que quedará evidenciado por un aumento en el número de hojas (Hunter *et al.*, 1974; Warrington y Kanemasu, 1983b). El efecto de la temperatura en la iniciación de la panícula no es tan claro. Un incremento en el número de hojas con una temperatura media de 15 a 30°C fue encontrado por Tollenaar *et al.*, (1979), mientras que un incremento en el número de hojas con un decrecimiento de la temperatura de 10 a 20 °C fue encontrado por otros autores (Hunter *et al.*, 1974). Muchos estudios han demostrado que la tasa de iniciación de primordios y aparición de hojas están muy asociados con la temperatura del aire (Warrington y Kanemasu, 1983b).

El maíz responde al fotoperíodo como una especie cuantitativa de días cortos (Kieselbah, 1950; Rood y Major, 1980). En general, el fotoperíodo sólo influye directamente el momento de iniciación de la diferenciación de la panoja en el ápice, sin influir sobre el desarrollo de otras etapas del ciclo de maíz (Allison y Daynard, 1979). La duración de este período de sensibilidad al fotoperíodo aumenta en la mayoría de los cultivares de maíz a medida que aumenta el fotoperíodo, resultando en un retraso de la aparición de la panícula (Kiniry *et al.*, 1983a) y un aumento en el número de hojas (Tollenaar y Hunter, 1983). Las diferencias en el tiempo a madurez y la sensibilidad al fotoperíodo dependen del cultivar, resultando de una compleja interacción entre el fotoperíodo y el número de hojas (Bonhomme *et al.*, 1991).

Mientras que un estrés hídrico tendrá un efecto muy marcado si ocurre durante la floración femenina, la ocurrencia de un estrés nitrogenado induce modificaciones en el crecimiento del cultivo, especialmente cuando se instala en etapas tempranas, anterior al estado de seis hojas. Este hecho puede ser explicado por la débil capacidad buffer del cultivo de maíz durante las etapas tempranas de desarrollo para nitrógeno, y durante la floración femenina para un estrés hídrico (Girardin *et al.*, 1987).

Para el cultivo de maíz un nivel inadecuado de nitrógeno resulta en una disminución en el desarrollo del área foliar, sin embargo el número de hojas es escasamente afectado (Lemcoff y Loomis, 1986; Muchow, 1988).

2.1.3. Crecimiento

El crecimiento es función de factores ambientales, como temperatura y radiación, y de la nutrición mineral en relación al genotipo utilizado y a las prácticas de manejo del cultivo. En los últimos 30 años, se han realizado numerosos estudios de crecimiento en el cultivo de maíz. Aspectos generales de crecimiento han sido estudiados por Evans (1972) y Duncan (1975). Investigaciones previas estudiaron diferencias en el crecimiento de las plantas como consecuencia de variaciones en la densidad de siembra (Tetio-Kagho y Gardner 1988; Aguilar, 1994), diferencias en el crecimiento del canopeo bajo condiciones climáticas adversas (Berbecel y Eftimescu, 1972; Wilson *et al.*, 1973; Warrington y Kanemasu, 1983 a,b; Bollero *et al.*, 1996; Sadler *et al.*, 2000), diferencias en el crecimiento debidas al sistema de labranza (Cutforth y Shaykewich, 1989; Cox *et al.*, 1990), el efecto de la fecha de siembra en el crecimiento del cultivo de maíz y la partición de materia seca (Cirilo y Andrade, 1994), y diferencias genotípicas en el crecimiento (Allison, 1971; Hawkins y Cooper, 1981; Aguilar, 1994). Existe abundante información acerca del comportamiento del maíz bajo riego, influenciado por dosis variables de N (Lemcoff y Loomis, 1986; Muchow y Davis, 1988a; Sinclair y Horie 1989, Cox *et al.*, 1993; y Uhart y Andrade, 1995). Sin embargo, los resultados hallados en la bibliografía no son siempre comparables ni extrapolables, debido a varias razones como son la metodología empleada para la medición de la materia seca, variaciones genotípicas, climáticas, diferencias en las fechas de siembra y densidades utilizadas.

El alto contenido de carbohidratos del grano del maíz, aproximadamente 80 % vs. 1.5 % de N, explican el papel predominante de la fotosíntesis para lograr altos rendimientos. Sin embargo, los metabolismos del C y N están fuertemente asociados, razón por la cual, para alcanzar altos rendimientos, deben ser considerados tanto el metabolismo del N como del C, para poder identificar factores que limitan la producción (Swank *et al.*, 1982).

El interés de analizar el curso del crecimiento de un cultivo a través de la variación de su peso y de la partición de materia seca entre sus distintos órganos, a lo largo del mismo, radica en que, mientras el primero describe el comportamiento del proceso de producción considerado en su conjunto, lo segundo permite indagar acerca de la estrategia puesta en juego para determinar el número de estructuras reproductivas y el llenado efectivo de los órganos de cosecha (Andrade *et al.*, 1996).

2.1.3.1. Índices de crecimiento

Los índices de crecimiento son una buena medida para comparar el efecto de factores ambientales y nutricionales en el crecimiento del cultivo de maíz (Radford, 1967; Hunt, 1982). Existen dos métodos con enfoques diferentes para el cálculo de estos índices; el primero, el clásico, que estima la tasa media de variación a partir de datos de crecimiento (materia seca total e índice de área foliar), en intervalos de tiempo sucesivos durante el ciclo del cultivo. El segundo, el método funcional, consiste en ajustar, mediante la técnica estadística de la regresión no lineal, al conjunto de datos experimentales (materia seca aérea total e índice de área foliar), oportunamente adquiridos en el transcurso del ciclo del cultivo, a distintas funciones matemáticas, eligiendo aquellas que mejor representen estadística y agrónomicamente, sus evoluciones en función del transcurso de los días desde emergencia o grados-día acumulados en las distintas fases biológicas. De estos modelos obtenidos, se derivan los distintos índices de crecimiento atendiendo a sus definiciones (de Juan *et al.*, 1992; Monteleone *et al.*, 1996). El método no representa las variaciones en la tasa de crecimiento del cultivo, fundamentalmente cuando

existen limitaciones puntuales ambientales y luego se verifica una recuperación en la tasa del crecimiento. Esta es una limitación propia del método, ya que no proporciona necesariamente la mejor descripción del fenómeno estudiado, pudiendo enmascarar el efecto de una adversidad ambiental puntual (Buttery, 1969).

El índice de área foliar (IAF), definido como el área de la superficie foliar por unidad de superficie de suelo que ocupa el cultivo, es una medida de la frondosidad y el tamaño del sistema fotosintético. El IAF alcanza su valor máximo alrededor de la floración. Este índice es afectado por la presencia tanto de un estrés hídrico y nitrogenado (Girardin *et al.*, 1985) como por la presencia de plagas y técnicas de manejo de cultivo, como modificaciones en la densidad y fecha de plantación (Andrade *et al.*, 1996). Para todos los cultivos existe un valor de IAF llamado crítico, que es aquel que permite alcanzar las máximas tasas de crecimiento del cultivo, y una intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) del 95 % (Arguissain, 1990). El IAF medido junto con otros parámetros, también permite conocer la organización del canopeo. La duración del área foliar (“Leaf Area Duration”, LAD), que es la integral del IAF en función del tiempo, representa la oportunidad total del cultivo de asimilar C en un intervalo específico de tiempo (Watson, 1947). Los mayores valores de IAF se traducen en mayores valores de LAD; como este parámetro integra el tamaño y la longevidad del canopeo, es crítico en la determinación del rendimiento potencial de un cultivo (Swanson *et al.*, 1996). Mayores valores de LAD determinan un mayor tamaño de la fuente, debido al mantenimiento del sistema fotosintético durante la etapa de llenado de granos (Kiniry *et al.*, 1985).

La tasa de crecimiento del cultivo (“Crop Growth Rate”, CGR), definida como el incremento de materia seca total (MST) por unidad de tiempo, es útil para comparar datos de distintas experiencias como para comparar tratamientos en el mismo ensayo. Este índice mide la eficacia productiva de un cultivo (Radford, 1967). La velocidad relativa de crecimiento del cultivo (Relative Growth Rate, RGR) se calcula como unidad de aumento del peso de la MST, por unidad de MST presente por día. Este índice, profundizando en el análisis de crecimiento del cultivo, tiene dos componentes: uno, la velocidad de asimilación neta (“Net Assimilation Rate”, NAR), definida como la velocidad de aumento de la MST por unidad de tiempo y por unidad de superficie foliar. La utilización de este índice permite obtener un promedio de la capacidad fotosintética de todas las hojas en conjunto, lo que implica subestimar algunas y sobrestimar otras en dicha capacidad. También, existe una relación entre este índice y el CGR a través de la siguiente ecuación: $CGR = NAR * IAF$. Los valores de NAR disminuyen a medida que transcurre el ciclo del cultivo, ya que es una medida de la fotosíntesis en relación a la respiración. Los mayores valores de IAF producirán menores valores de NAR, por la mayor cantidad de hojas sombreadas. El objetivo en el manejo de cultivo será lograr el valor óptimo de IAF en el momento en que las condiciones ambientales sean óptimas para lograr los mayores valores de NAR (de Juan *et al.*, 1992). El segundo componente del RGR es el LAR (“Leaf area ratio”, LAR), que es la relación entre la superficie foliar asimiladora y el peso seco (Radford, 1967). Valores diferentes de LAR están indicando una distribución diferencial de los productos de la fotosíntesis entre el crecimiento de las hojas y el crecimiento de otros órganos de la planta y diferencias en el espesor de las hojas. La relación entre estos dos componentes y el RGR es la siguiente: $RGR = NAR * LAR$ (de Juan *et al.*, 1992).

2.1.4. Balance radiativo

La radiación solar global que llega sobre un plano horizontal a la superficie del suelo es la suma de las radiaciones directas y difusas, comprendidas en una

longitud de onda de entre 300-3000 nm. Solamente la radiación comprendida entre los 400-700 nm es considerada como radiación útil a la fotosíntesis, o radiación fotosintéticamente activa (RFA). La cobertura vegetal no absorbe toda la RFA. Un balance radiativo permite determinar la cantidad de RFA absorbida por el cultivo. La expresión del balance de radiación útil a la fotosíntesis es la siguiente (Plénet, 1995):

$$RFAa = RFAo - RFA_t - RFA_r + RFA_{rs},$$

donde: RFAa= radiación solar fotosintéticamente activa absorbida por el cultivo; RFAo= radiación solar fotosintéticamente activa incidente; RFA_t= radiación solar fotosintéticamente activa transmitida al suelo; RFA_r= radiación solar fotosintéticamente activa reflejada por el conjunto suelo – cultivo; y RFA_{rs}= radiación solar útil a la fotosíntesis reflejada por el suelo.

Numerosos autores miden solo dos parámetros: RFAo y RFA_t, y realizan un balance entre la radiación fotosintéticamente activa incidente menos la radiación fotosintéticamente activa transmitida al suelo= radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo (RFA_i) (Uhart y Andrade, 1995; Kiniry, 1994; Kiniry y Knievel 1995; Hall *et al.*, 1994). Gallo y Draughtry (1986), encuentran que las diferencias entre RFAa y RFA_i son pequeñas, menores al 3.5 %, en el cultivo de maíz.

2.1.4.1. Eficiencia en el uso de la Radiación

La transformación de la energía solar en materia seca orgánica puede ser descompuesta en tres etapas diferentes, caracterizadas por un rendimiento o eficiencia energética diferente (Plénet, 1995):

* Eficiencia climática (Ec): relación entre la RFA y la radiación global incidente ($Mj\ m^{-2}$). En el presente trabajo se consideró una Ec de 0.48 (Varlet-Grancher *et al.*, 1982; Varlet-Grancher *et al.*, 1989).

* Eficiencia de absorción (Ea): es la relación entre la RFAa ó RFA y la RFAo, permite definir la eficiencia de la cobertura vegetal para interceptar o absorber la radiación solar.

* Eficiencia biológica (Eb), ó eficiencia de conversión de la energía solar en materia orgánica: es la relación entre la energía química potencial de la materia seca total de la planta (MST) y la energía útil a la fotosíntesis absorbida por la cobertura vegetal. En nuestro trabajo la relación se estudió para la MST aérea, sin considerar el sistema radicular. Esta eficiencia necesita de la determinación de la capacidad calorífica de la MS. La pendiente de la relación entre la MST acumulada y la RFAa acumulada para un período determinado, se denomina Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR).

2.1.5. Rendimiento

El rendimiento del cultivo de maíz puede ser descompuesto en dos elementos principales: el número de granos por m^2 (NG, $gr\ m^{-2}$), y el peso unitario de grano (PUG). La componente del rendimiento NG, sintetiza los mecanismos relacionados con la definición del número de órganos reproductores que se realiza en etapas sucesivas: número de plantas, número de espigas por planta y número de granos por espiga. Este último se descompone en número de hileras por espiga y número de granos por hilera (Fleury, 1990). El NG queda determinado en el estado

límite de aborto de granos, es decir, aproximadamente, 15 a 20 días después de la floración (Otegui y Bonhomme, 1997).

El componente PMG resulta de la competencia entre el número de granos y la oferta de fotoasimilados (Plénet, 1995). Se ha demostrado que el NG es el principal componente del rendimiento en grano del cultivo de maíz en diferentes ambientes (Tollenaar, 1990; Hawkins y Cooper, 1981; Fischer y Palmer, 1984).

El período crítico para la definición del número de granos comprende desde 1 a 2 semanas antes de la floración femenina hasta 3 semanas posteriores (Tollenaar, 1977; Kiniry y Ritchie, 1985; Tollenaar *et al.*, 1992). La translocación de fotoasimilados a la espiga durante este período está altamente relacionado con la definición del NG. Una deficiencia de nitrógeno afecta esta translocación ya que disminuye los valores de IAF, del LAD y, en consecuencia, la intercepción de la radiación y la eficiencia en el uso de la misma (Novoa and Loomis, 1981, Sinclair and Horie, 1989).

Desde un punto de vista funcional, las diferencias observadas en los valores promedio de número de granos entre cultivos están asociados a los ritmos de crecimiento del maíz durante el período crítico alrededor de floración. La presencia de un estrés hídrico o nutricional en este momento reduce la tasa de crecimiento del cultivo en el período crítico de generación de número de granos y esto produce marcadas reducciones en el rendimiento (Satorre, 2002).

2.2. Efecto del estrés hídrico en el desarrollo reproductivo del cultivo de maíz

Investigaciones previas en la respuesta del cultivo de maíz al déficit hídrico, encuentran que la presencia de un déficit hídrico en etapas vegetativas del cultivo reduce el área foliar (Boyer, 1970; Acevedo *et al.*, 1971; Ne Smith y Ritchie, 1992), la elongación de los entrenudos (Novoa y Loomis, 1981), y el peso de hojas y tallos (Musick y Dusek, 1980; 1960; Eck, 1984). La etapa reproductiva es la más sensible a la presencia de un estrés hídrico (Robins y Domingo, 1953; Claasen y Shaw, 1970). En este momento, la deficiencia hídrica se manifiesta mediante la reducción en el número de granos por unidad superficie, debido al efecto de una deficiencia de carbohidratos en la esterilidad del gametofito femenino

Durante el desarrollo reproductivo del cultivo de maíz, la ocurrencia de potenciales xilemáticos bajos, pueden causar grandes pérdidas de rendimiento en el cultivo. Las pérdidas son mayores cuando los potenciales xilemáticos bajos se producen alrededor del momento de la antesis, ya que el saco embrionario puede abortar, y el desarrollo de la espiga y la elongación de los estigmas puede ser inhibida (Herrero y Johnson, 1981). El alargamiento celular es necesario para la mayoría de los procesos vinculados al desarrollo; mecanismos como el ajuste osmótico son importantes para asegurar el crecimiento a bajos potenciales xilemáticos. Los solutos que se acumulan en los tejidos en crecimiento derivan principalmente de la fotosíntesis y sustancias de reserva (Acevedo *et al.*, 1979; Michelena y Boyer, 1982). Sin embargo, la fotosíntesis puede ser inhibida a bajos potenciales, en ese caso, el ajuste osmótico dependerá de los carbohidratos de reserva. En maíz, el nivel de carbohidratos en tallo aumenta en etapas tempranas del período de llenado de granos, y estas sustancias pueden ser removilizadas a bajo potenciales para el llenado del grano (Ackerson, 1983).

La reducción en el número de granos producida por un estrés hídrico puede suceder aún cuando la presencia de polen viable esté asegurada. Grant *et al.* (1989), encuentran que esta reducción fue producida por el cese del desarrollo

postfertilización de algunos granos apicales, en mayor medida que por el aborto de óvulos previo a la fertilización, como encontraron Moss y Downey (1971). El efecto del estrés hídrico en el peso unitario de grano es considerable cuando este ocurre al final del período de llenado de granos (Claassen y Shaw, 1970).

La mayor diferencia en la acumulación de MS aérea por órgano debida al estrés hídrico se da en el tallo, lo que significa una disminución en la acumulación de fotoasimilados. También, existe una disminución en la translocación de asimilados hacia el grano cuando el estrés se produce desde 1 día previo hasta 7 posteriores a la floración femenina, mientras que, cuando el estrés hídrico ocurre a partir de los 10 días posteriores a la floración femenina, existe removilización de asimilados desde tallo y hojas hacia granos, aún cuando el estrés hídrico limite la fotosíntesis (Grant *et al.*, 1989).

2.3. Programación del riego

Tanto en zonas áridas como húmedas, con ocurrencia de sequías estacionales que producen reducciones y variabilidad en los rendimientos entre años, es fundamental realizar una correcta programación del riego. Una correcta programación del riego tendrá como objetivo ahorrar agua y prevenir excesos de agua en el perfil del suelo que puedan conducir a la contaminación de aguas subterráneas. Este hecho es de mayor importancia en zonas húmedas, donde el riego es de carácter suplementario, y el perfil del suelo está generalmente totalmente recargado al inicio de la estación de crecimiento (NeSmith y Ritchie, 1992). En la utilización de la técnica de riego, uno de los interrogantes más importantes es el referido al momento y a la cantidad de agua a aplicar en cada riego con el objetivo de lograr el máximo rendimiento económico y con la mayor eficiencia en el uso del agua. Para una correcta programación del riego es necesario conocer la respuesta del cultivo al momento, frecuencia y láminas de riego en interacción con el ambiente estudiado (Maturano *et al.*, 1997).

Uno de los criterios más utilizados ha sido el nivel de consumo del agua útil a partir del cual se repone el agua en el perfil de suelo hasta valores cercanos a la capacidad de campo (Phene *et al.*, 1990). Distintos métodos han utilizado niveles de consumo del agua útil del 50 al 65% como criterio de riego (Geiser *et al.*, 1982). Todos los métodos requieren conocer cual es la capacidad de disponibilidad hídrica del suelo, que combina el conocimiento de los límites inferior y superior para cada horizonte y la profundización y exploración de las raíces en el perfil, lo que hace necesario definir criterios de umbrales de consumo del agua disponible para cada tipo de suelo y para cada cultivo en particular (Phene *et al.*, 1990).

Para la conducción del riego existen métodos que se basan en mediciones directas en suelo (potencial agua en el suelo, método resistenciométrico y atenuación de neutrones, entre otros), y en planta (diferencia entre temperatura foliar y temperatura del aire ($T_c - T_a$), potencial agua en planta, entre otros); y otros que se basan en estimaciones indirectas -modelos para cálculo de la ETP y modelos de crecimiento de cultivos, entre otros (Steele *et al.*, 1994).

Los modelos de crecimiento de cultivos, son una herramienta útil para estudiar el efecto del riego sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos y para optimizar las prácticas de riego para un sitio. La credibilidad de las estrategias de riego, que derivan de las simulaciones con modelos predictivos, requieren cuidadosas comparaciones entre las medidas de campo y los resultados de la

simulación, para cada grupo de datos de clima, suelo, cultivo y manejo (Jones y Ritchie, 1991).

Jones y Ritchie (1991), utilizando modelos de crecimiento de cultivos cuantificaron las necesidades de riego para un cultivo de soja modificando la profundidad de disponibilidad hídrica (0.3, 0.4 y 0.5m) combinada con cuatro niveles de consumo del agua disponible (30, 40, 50 y 60%) durante el período reproductivo, sin encontrar diferencias entre los rendimientos promedio para las doce estrategias planteadas; encontrando que la mejor estrategia con alto rendimiento y menor uso del agua fue la combinación de 0.30 m de profundidad para disponibilidad y 40% como umbral de disminución del agua útil en aquella profundidad. Resultados similares se encontraron en maíz para el mismo sitio y trabajando sobre un suelo arenoso fino.

Caldwell *et al.* (1994) concluyen que el rendimiento de maíz no es afectado cuando el promedio del déficit hídrico en el suelo es menor del 20%, la frecuencia de 7 días, y con una disminución del agua útil de 50.8 mm, mostró el menor drenaje debajo de la zona radicular y una mayor eficiencia en el uso del agua de riego que frecuencias de 1, 3 y 5 días. Finalmente el drenaje por debajo de la zona radicular puede ser minimizado y la eficiencia de uso del agua de riego puede ser maximizada manteniendo el nivel de agua del suelo en un contenido menor que la capacidad de campo.

Geiser *et al.* (1982), desarrollaron una ecuación que relacionaba la diferencia entre la temperatura foliar y del aire con la radiación solar global, la humedad relativa y el contenido de agua disponible del suelo; concluyen que la diferencia de temperatura puede ser usada para la conducción del riego, permitiendo reducir la cantidad de agua utilizada en relación a otros métodos ampliamente difundidos.

En los últimos años, ha habido un interés creciente en el estudio de la programación del riego con el objetivo de conservar el agua y prevenir las pérdidas por percolación profunda, que pueden conducir a la contaminación del agua subterránea. Esto es especialmente cierto en regiones húmedas donde el riego es suplementario, y el perfil del suelo se recarga completamente al comienzo de la estación de crecimiento del cultivo de maíz. Uno de los estados fenológicos del maíz en el que puede ser reducida la aplicación de agua es en pre-antesis (NeSmith, *et al.*, 1992).

Ludlow (1987) sugiere que la falta de una relación única entre el potencial agua en planta y los procesos fisiológicos ha conducido a utilizar el estado hídrico en el suelo para predecir el crecimiento del tallo en muchos modelos de simulación de crecimiento de cultivos.

Tanto la conductancia estomática como la elongación de hojas y tallo son reducidas en respuesta a un déficit hídrico edáfico antes que el estado hídrico del tallo. (Blackman and Davies, 1985; Davies *et al.*, 1986; Gollan *et al.*, 1986; Schulze, 1986). Los experimentos con déficits hídricos son difíciles de conducir en regiones húmedas, debido a la incertidumbre en la ocurrencia de precipitaciones.

2.4. Crecimiento radicular. Efecto del agua y del nitrógeno

El papel del funcionamiento del sistema radical es fundamental sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo. Como las demás gramíneas, el sistema radical del maíz está formado por una red relacionada a la raíz seminal principal y un conjunto de redes relacionados con las raíces adventicias. El crecimiento del sistema radicular dependerá de las propiedades del suelo, del contenido de humedad, y del contenido de nutrientes del suelo, principalmente (Guevara, 1991).

La programación del riego en zonas húmedas, deberá tener como objetivo lograr la profundización radical para un mejor aprovechamiento del agua útil edáfica, ya que cuando ocurre una sequía alrededor de la floración y durante la etapa de llenado de grano, la presencia de un sistema radicular fino y denso permitirá al cultivo utilizar las reservas hídricas edáficas localizadas a mayor profundidad, manteniendo un adecuado estado hídrico en la planta y evitando el efecto de un estrés hídrico (Loomis y Connor, 1992). La elongación radical depende del contenido de agua del suelo, ya que el agua es fundamental para mantener la presión de turgencia necesaria para el agrandamiento celular, por lo que, una falta de agua inducirá a una disminución en el proceso de elongación, que es el primer proceso fisiológico afectado (Guevara, 1991). Existe una mayor concentración de raíces en los horizontes mas húmedos, debido al crecimiento mas rápido de las raíces en estos horizontes. El sistema radical alcanza su máximo desarrollo alrededor de la floración, aunque existen autores que encuentran crecimiento posteriormente al estado R1 del ciclo, en una situación de disponibilidad hídrica limitada (MacKay y Barber, 1986).

Existe una relación positiva entre la cantidad de raíces, cuantificadas en longitud volumétrica radicular (L_v , cm/cm^3) y la cantidad de agua absorbida. La sequía produce modificaciones tanto en la cantidad total de raíces como en su distribución en el perfil del suelo, mediante la variación de su penetración y la disminución del consumo hídrico por unidad de longitud de raíces (Guevara, 1991). La falta de agua provoca también una reducción del diámetro de las raíces. La modificación de la relación raíz/parte aérea puede ocurrir ante un cambio en las posibilidades competitivas de los destinos de los productos de la fotosíntesis (Eghball y Maranville, 1993). Tanto la presencia de una deficiencia hídrica como nitrogenada modifican esta relación. En las condiciones edáficas de Argentina, mas del 50 % del agua útil para el cultivo se encuentra en los horizontes profundos y mas de la mitad no es absorbida por el cultivo y constituye una reserva de agua inexplorada (Pecorari y Balcaza, 1988).

La aplicación de nitrógeno, frecuentemente, estimula el aumento de la longitud radical en la zona de aplicación del fertilizante, sin afectar el largo total de la raíces. El peso de las raíces decrece conjuntamente con el incremento de la dosis de N (Durieux, *et al.*; 1994; Anderson, 1987). Pellerin y Tardieu (1990) encuentran, como respuesta a la modificación de técnicas culturales, un mayor número de raíces adventicias en el cultivo de maíz con bajas densidades, aporte de N y condiciones estructurales del suelo favorables.

2.5. Eficiencia en el uso del agua

La eficiencia en el uso del agua (EUA) se define como la relación entre la acumulación de biomasa, expresada como la asimilación de CO₂, biomasa total, o rendimiento del cultivo en grano, y el consumo hídrico expresado como transpiración, evapotranspiración, o entrada total de agua al sistema. La EUA se puede estudiar a una escala temporal instantánea, diaria, o estacional (Sinclair *et al.*, 1984).

La función mas importante de las hojas es la de transformar la energía del sol, en energía química mediante la fijación de CO₂. Los estomas en la epidermis foliar son las válvulas que permiten la entrada de CO₂ para la fotosíntesis. Sin embargo, la apertura estomática que posibilita este proceso, también, representa un paso para la pérdida de agua desde la hoja a la atmósfera. La tasa de transpiración es proporcional a la diferencia entre el déficit de presión de vapor (DPV) de la atmósfera y en el interior de la hoja. Tanto la asimilación de carbono como la transpiración, están gobernados por gradientes en la concentraciones y modulado por las resistencias que estos compuestos encuentran en su paso (Ben- Asher *et al.*, 1992).

La EUA puede ser modificada por un cambio en la composición química de los productos del cultivo, por un cambio en la fisiología estomática que prevenga altas pérdidas de agua, por un incremento en la proporción de agua transpirada, un incremento en el índice de cosecha, y una alteración en el ambiente (Sinclair *et al.*, 1984). El rendimiento del cultivo puede ser estudiado en función de la EUA, según la siguiente expresión :

$$Y = UA * EUA * IC$$

Donde, Y= rendimiento; UA= uso de agua o consumo; EUA= eficiencia en el uso del agua; IC= índice de cosecha.

2.6. Mediciones indirectas del estado hídrico en planta

2.6.1 Potencial xilemático

Muchos procesos que ocurren en las hojas, como el intercambio gaseoso y el alargamiento celular, depende del mantenimiento de un estado hídrico favorable (Boyer, 1985). La fisiología de estos procesos ha sido muy estudiada en ambientes controlados. Sin embargo, las relaciones hídricas de las plantas son mas difíciles de ser estudiadas a campo debido a la variabilidad edáfica y entre plantas individuales.

En un flujo estacionario, el potencial agua de la hoja depende de la conductancia hidráulica y el flujo de agua por la planta puede ser representado por (Boyer, 1985):

$$J = L * \Delta P_w$$

donde J es el flujo de agua, L conductancia hidráulica entre el suelo y la hoja, y ΔP_w es la diferencia de potencial agua entre ambos sitios.

Según el momento en el día en que se mida el potencial xilemático será su significado. La medición del amanecer, previa a la salida del sol, es un momento en el que existe un equilibrio en el sistema suelo-planta. El valor del potencial xilemático del mediodía solar está regulado por la demanda atmosférica; en este caso, un déficit de presión de vapor elevado tendrá como resultado el cierre estomático y la ocurrencia de potenciales más negativos, independientemente de que exista una alta disponibilidad hídrica edáfica. El potencial del atardecer, posterior al ocaso solar, es un indicador de la velocidad de recuperación hídrica del cultivo, y está directamente relacionado con su estado hídrico en función de la disponibilidad de agua con la que cuenta.

Grant *et al.* (1989) indican que es más simple medir y predecir el estado hídrico del suelo que el del cultivo, a nivel de campo. Ludlow (1987) sugiere que la relación compleja entre el potencial xilemático y diferentes procesos fisiológicos en la planta conducen a utilizar el estado hídrico del suelo en numerosos modelos de simulación, para predecir el crecimiento de la parte aérea. El agua útil disponible para la planta es definida como la diferencia entre el valor de humedad volumétrica actual menos el contenido de humedad volumétrica en punto de marchitez permanente, en el volumen de suelo explorado por las raíces. Este valor dividido por el máximo contenido de agua útil posible en ese volumen explorado (humedad volumétrica a capacidad de campo menos humedad volumétrica en punto de marchitez permanente) es el índice de humedad edáfica (IHE, $0 < \text{IHE} < 1.0$), y es un indicador del estado hídrico del cultivo (Rosenthal *et al.*, 1987). En general, la tasa relativa de los diferentes procesos en el cultivo (tasa de transpiración, crecimiento foliar) se mantienen cercanos a 1 hasta un valor umbral de IHE, que varía con el estado fenológico del cultivo (Grant *et al.*, 1989). El conocimiento de estos umbrales para cada etapa del ciclo de cultivo será una herramienta para la conducción del riego. Grant *et al.* (1989) encuentran que la presencia de un estrés hídrico previo a la floración femenina no redujo el número de granos por espiga; fue a partir del inicio del desarrollo del grano cuando la presencia del estrés hídrico produjo una significativa reducción en el número de granos. Encontraron que la duración de esta etapa de sensibilidad al estrés tuvo una duración comprendida desde los 2 a 7 días hasta 16 a 22 días posteriores a la floración femenina. Este período de sensibilidad fue coincidente con el hallado por Kiniry y Ritchie (1985).

2.6.2 Temperatura foliar

La utilización de la temperatura de canopeo para detectar la presencia de un estrés hídrico en planta se basa en el supuesto de que el agua transpirada se evapora y enfría las hojas a una temperatura inferior a la del aire que la rodea (Jackson, 1982). A medida que la disponibilidad hídrica es limitante, la transpiración se reduce y la temperatura del canopeo aumenta. Si el agua transpirada es escasa, la temperatura foliar aumenta por encima de la temperatura del aire debido a la radiación absorbida.

Basado en el concepto descrito, y mediante la medición de la temperatura de canopeo con el uso de sensores remotos o instrumental de campo (termómetro infrarrojo), han sido desarrollados numerosos índices para monitorear el grado de estrés hídrico de un cultivo (Jackson, 1982). La termometría infrarroja es un método sin contacto con el cultivo, para estimar la temperatura de una superficie objetivo. Tiene una ventana sensible para la medición en el rango de los 8-14 μm de longitud de onda. Este rango incluye el pico de emisión de un cuerpo negro a temperatura normal y tiene relativamente baja absorción por el vapor de agua del ambiente. La temperatura de canopeo es el mejor indicador del estrés hídrico en planta, al menos durante los primeros estados de estrés. A medida que el cultivo alcanza una

temperatura varios grados mayor que la del aire, la diferencia de temperatura es insensible a los cambios en el potencial agua (Jackson, 1982).

Idso *et al.* (1977) y Jackson *et al.* (1977), proponen un modelo para la estimación del grado de estrés hídrico denominado "Stress Degree Day" (SDD). El SDD es la diferencia entre la temperatura del cultivo – la temperatura del aire. El concepto de este índice asume que factores ambientales como son el déficit de presión de vapor, la radiación neta y el viento se manifiestan ampliamente en la temperatura foliar. Idso *et al.* (1977) encuentran que el rendimiento final se relaciona inversamente con el SDD, y concluyen que este índice es válido para representar el efecto del estrés hídrico sobre el rendimiento. La aplicación del SDD para la programación del riego fue sugerida, aunque no demostrada. La combinación de valores de SDD con datos de radiación y presión de vapor fueron utilizados para la programación de riego por Geiser *et al.* (1982). Gardner *et al.* (1981a) sugieren que las diferencias entre la temperatura del cultivo menos la del aire son específicas para cada tipo de suelo, clima y cultivo. El mejor momento del día para la cuantificación del estrés hídrico mediante la utilización de la temperatura de canopeo es el mediodía solar. EL SDD funciona bien en zona áridas pero no en zonas húmedas, por lo que fue normalizado para tener en cuenta la humedad atmosférica. Idso *et al.* (1981) desarrolló una nueva aproximación para solventar este problema y llamaron al nuevo parámetro índice de estrés hídrico del cultivo ("Crop Water Stress Index": CWSI).

El CWSI representa un indicador de estrés hídrico normalizado, basado en las diferencias de temperatura entre el cultivo y el aire. CWSI fue definido por Idso (1981a) como:

$$\text{CWSI} = (dT - \text{MIN}) / (\text{MAX} - \text{MIN})$$

donde, $dT = T_c - T_a$ (°C); T_c = temperatura del cultivo (°C); T_a = temperatura del aire (°C); MIN = línea base sin estrés hídrico = $A + B * \text{DPV}$ (°C); DPV = déficit de presión de vapor (°C); A = valor de la intercepción de la línea base (°C); B = pendiente de la línea base (°C kPa⁻¹); MAX = límite máximo de dT (°C). El CWSI toma valores entre 0 (ausencia de estrés) y 1 (grado máximo de estrés).

2.7. Efecto del nitrógeno sobre el funcionamiento del cultivo de maíz

El control de la contaminación con NO₃⁻ tanto de aguas superficiales como subterráneas debe estar orientado al control de la fertilización nitrogenada.

El N es el nutriente mas importante que limita la producción de cultivos. El conocimiento del ciclo de N en los agroecosistemas puede ayudar a la comprensión de los procesos que afectan la eficiencia en el uso del N (EUN), conduciendo a una mejora en el manejo de este nutriente. Las investigaciones en el balance de N constituyen una aproximación al estudio del ciclo de N en agroecosistemas ya que enfatizan interrelaciones entre varias partes del sistema (Wood *et al.*, 1991).

El objetivo de la fertilización nitrogenada es ajustar la oferta de N (disponible en el suelo + agregado mediante fertilizante + agregado con el agua de riego) a la demanda, que es función del crecimiento de las plantas para alcanzar los objetivos de producción, tanto cuantitativos como cualitativos fijados, y asegurar la rentabilidad económica del cultivo. La fertilización debe también asegurar el respeto por la calidad ambiental. Para lograr este objetivo es necesario conocer los diferentes parámetros de la dinámica del N en el sistema cultivado: método del balance provisional (Plénet, 1995).

El cultivo de maíz no es en sí mismo contaminante. Por el contrario, al pertenecer al grupo metabólico C4, posee una eficiencia en el uso del nitrógeno muy alta: la cantidad de nitrógeno que necesita para producir una unidad de materia seca es inferior a aquella requerida por los cereales de invierno (Plénet, 1995).

El alto contenido de C del grano de maíz (aproximadamente 80 % vs. 1.5 % de N), indica un rol predominante de la fotosíntesis en el logro de altos rendimientos. Sin embargo, el metabolismo del N y el C están fuertemente ligados, por lo que deben ser estudiados en forma conjunta para identificar limitantes del rendimiento. Evans (1975) en el estudio de las bases fisiológicas del rendimiento para 9 cultivos diferentes, sólo identifica para el arroz al N como mayor limitante del rendimiento.

El nitrógeno en la planta puede ser separado en dos compartimentos: un metabólico en el que está asociado a actividades fotosintéticas y otro estructural. La cantidad de nitrógeno en este último es generalmente más elevada ya que más de la mitad de las proteínas están ligadas a procesos metabólicos (Millard, 1988). La disminución en la relación hoja-tallo hacia madurez (Lemaire *et al.*, 1985.; Lemaire y Chartier, 1992) explica en gran parte la disminución del contenido de nitrógeno en la biomasa aérea total.

Un 50 a 70 % del nitrógeno total en las hojas de maíz está directamente asociado con los cloroplastos, con lo cual, un alto porcentaje de nitrógeno contribuye al mantenimiento de la fotosíntesis, o de la capacidad fotosintética (Hagman, 1986). Existe una fuerte correlación entre la tasa de fotosíntesis neta y el nitrógeno foliar, o contenido de proteínas (Hunt y van der Poorten, 1985). La alta correlación encontrada entre la tasa fotosintética con la proteína soluble en la hoja permite utilizar el nitrógeno foliar como criterio para estimar la capacidad fotosintética en un ambiente determinado (Edwards, 1986).

El nitrógeno es el nutriente que ha sido más extensamente estudiado a nivel mundial, al igual que la respuesta del crecimiento y el rendimiento en grano del maíz a la aplicación de fertilizante nitrogenado. El maíz requiere grandes cantidades de N, lo que comúnmente, limita el crecimiento y el rendimiento. Además de incrementar los rendimientos, el N es también un nutriente clave en la formación de aminoácidos, proteínas y ácidos nucleicos, lo que son fundamentales en todo tipo de funciones metabólicas. Cuando la provisión de N es subóptima, el crecimiento es reducido (Marschnez, 1986).

Una deficiencia de nitrógeno importante en el estado de diez hojas a floración provoca una disminución del número de hojas por planta y, consecuentemente, la superficie foliar hasta un 30 % (Plénet, 1995). La reducción de la superficie foliar, en función de su número de inserción en el tallo, es fuertemente dependiente del estado de nutrición nitrogenada de la planta en el momento de su emisión (Girardin *et al.*, 1985).

Un estrés nitrogenado en las fases juveniles producirá la disminución en la absorción de la radiación solar y en el coeficiente de conversión, cuando la intercepción es incompleta. Si, en cambio, la absorción es máxima, la disminución ocurrirá a nivel de coeficiente de conversión (Novoa y Loomis, 1981). Este efecto es más importante a partir del estado de 15 hojas, debido al papel preponderante del nitrógeno en el conjunto de actividades relacionadas con la fotosíntesis. Un aporte de nitrógeno en floración permite aumentar la conversión en biomasa debido al aumento en la eficiencia del sistema clorofiliano.

La velocidad de crecimiento de la parte aérea o de las espigas disminuye rápidamente cuando la carencia de nitrógeno aumenta (Uhart *et al.*, 1995). Un déficit de nitrógeno disminuye la biomasa radical en un orden del 20 a 25 %. Un aporte de nitrógeno en floración permite aumentar la producción, aunque este aporte correctivo no permite recuperar el nivel de rendimiento de un cultivo conducido en ausencia de déficit nitrogenado (Plenét, 1995).

El estrés nitrogenado afecta el número de espigas por hectárea, y, en menor grado, de hileras por espigas. La regulación del número de granos por metro cuadrado que interviene en los 20 días posteriores a floración está relacionado a la velocidad de crecimiento calculada durante el período de comienzo de elongación de estigmas – estado límite de aborto de granos (Otegui *et al.*, 1997). Un estrés de nitrógeno afecta en menor medida el componente peso de mil granos que el de número de granos. Un déficit de nitrógeno reduce de manera muy marcada la velocidad de absorción en el período 15 hojas – floración femenina. Esta variable es la primera indicación de la instalación de una deficiencia (Uhart *et al.*, 1995).

En maíz, el control de la fertilización nitrogenada puede conducir a la disminución de rendimientos si, como resultado de la misma, se instala una deficiencia durante la etapa de desarrollo de la espiga (Ta *et al.*, 1992). Durante el crecimiento reproductivo del maíz, existen dos fuentes de N para el desarrollo del grano: el absorbido desde el suelo y el removilizado a partir de órganos vegetativos. En condiciones de baja fertilidad, el N provisto por el suelo será escaso durante la etapa de llenado de grano; la removilización a partir de otros órganos pasa a ser la fuente mas importante de provisión de N al grano. Las hojas proveen fotosintatos para el metabolismo de la planta y el crecimiento del grano; un retraso en la removilización del N desde las hojas, y una removilización mas temprana desde el tallo y raíces, preservarán la longevidad del sistema fotosintético y, consecuentemente resultará en un incremento en los rendimientos (Ta *et al.*, 1992).

La translocación de N de sucrosa desde los órganos vegetativos hacia el grano de maíz está asociada con la acumulación de N en las proteínas del grano (Tsai *et al.*, 1980). Los altos contenidos de zeína están relacionados con altos rendimientos.

Hacia floración el maíz, ha acumulado cantidades de N suficientes para proveer a los granos hasta la madurez fisiológica. La capacidad del genotipo de acumular N reducido en los órganos vegetativos es dependiente de la disponibilidad de N, y también, de C (Reed *et al.*, 1980). Aunque las plantas de maíz tienen el potencial de proveer a los granos en desarrollo, por redistribución del N reducido acumulado durante el crecimiento vegetativo, otros factores genéticos regulan este proceso.

El papel del N en el logro de altos rendimientos se manifiesta mediante tres procesos (Tsai *et al.*, 1978): a) la definición de los componentes del rendimiento, b) el establecimiento y mantenimiento de la capacidad fotosintética, y c) la acumulación de proteínas en grano, siendo un factor capaz de regular el desarrollo del mismo.

El maíz removiliza N durante la etapa de llenado de grano, independientemente de nivel de N en planta (Friedrich y Schrader, 1979; Swank *et al.*, 1982; Muchow, 1988b). El híbrido seleccionado y el manejo del cultivo realizado, influyen en la cantidad de N removilizado (Ta y Weiland, 1992). Swank *et al.* (1982) comprueban que híbridos de alto rendimiento, comparados con híbridos de bajo rendimiento, acumulan mayores cantidades de N a partir del suelo, durante la etapa de llenado de grano, lo que resulta en una menor removilización de N a partir de las

hojas. Russelle *et al.* (1983) sugieren que el retraso en la aplicación de N hasta el estado V16 (Ritchie y Hanway, 1984), resulta en un incremento en la absorción de N edáfico durante la etapa de llenado de grano y el logro de altos rendimientos con bajos contenidos de N-NO_3^- residual, en Nebraska, EE.UU. Evanylo (1991), sin embargo, encontró que la aplicación de N en V16 comparado con V5, no incrementó los rendimientos ni la eficiencia en el uso del N, en condiciones de labranza cero. Jokela y Randall (1989) también encuentran que aplicaciones tardías de N (V8), comparadas con aplicaciones a la siembra, tampoco incrementaron la producción de materia seca y si el contenido de N-NO_3^- residual.

2.8 Eficiencia en el Uso del Nitrógeno

La eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN), definida en maíz como el rendimiento en grano por unidad de N disponible en el suelo (Moll *et al.*, 1982), depende de la efectividad del sistema radicular (Jackson *et al.*, 1986). Se distinguen dos factores de importancia en la EUN, basados en los procesos fisiológicos más importantes (Huggins y Pan, 1993): a) La eficiencia en la absorción de N, que es la cantidad de N en la planta a madurez fisiológica por unidad de N disponible en el suelo, y b) la eficiencia en el uso del N: la cantidad de grano producido por unidad de N en la planta en madurez fisiológica.

Utilizar la dosis de N aplicado como el N disponible en el suelo es cuestionable ya que no todo el fertilizante aplicado es aprovechado y no todo el N disponible proviene del mismo (Pierce y Rice, 1988). Entonces, se define como provisión de N (N_p) a la suma de las fuentes potencialmente disponibles como el N proveniente del fertilizante (N_f), el contenido de N residual inorgánico previo a la siembra (N_r), el mineralizado (N_m), el fijado (N_{fij}), y el N deposicional (N_d) (incluyendo el atmosférico, aportado por el agua de riego, y por escorrentía) (Pierce y Rice, 1988). La EUN, según la definición anterior, sería el rendimiento en grano por unidad de N provisto. Sin embargo, si ocurren pérdidas de N, entonces sólo una parte de N provisto es retenido en el sistema suelo-planta, por lo que es necesario definir el N disponible (N_{disp}) = N_p - pérdidas de N. Las pérdidas de N están constituidas por el N inmovilizado, el N lixiviado, las pérdidas de N gaseoso, y el N fijado químicamente. Esta nueva definición de N disponible permite desarrollar las siguientes relaciones, ya que la EUN (rendimiento en grano/N provisto) es el producto de dos factores: a) eficiencia del N disponible (N_{disp}/N_p), que es la fracción del N provisto disponible luego de descontar las pérdidas de "pool" de N disponible en el suelo; y b) EUN disp: rendimiento en grano/ N_{disp} , que es una medida de la capacidad del cultivo de usar el N disponible para la producción de grano (Moll *et al.*, 1982).

La relación entre el rendimiento en grano/ N_{disp} es el producto de dos procesos fisiológicos: a) la eficiencia en la absorción del N disp, definida como la relación N_t/N_{disp} (N_t es el contenido de N total en planta en madurez fisiológica); y b) la eficiencia en la utilización del N, definida como el rendimiento en grano/ N_t (Huggins y Pan, 1993).

3. MATERIAL Y METODOS

3.1 Ambiente I: Pergamino, Buenos Aires, Argentina

3.1.1 Localización y duración del ensayo

El ensayo se realizó durante el ciclo agrícola 1999 - 2000, en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) de Pergamino, propiedad del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). La EEA (Fig. 1) está ubicada en las siguientes coordenadas geográficas: latitud: 33° 56' S; longitud: 60° 33' O; y altitud: 65.5 m sobre el nivel del mar (s.n.m)

Figura 1. Ubicación geográfica del ensayo experimental en Argentina.



3.1.2 Caracterización agroclimática de la región maicera argentina

La región maicera se extiende entre 31° y 40° S y 57° y 65° O de la pampa húmeda y subhúmeda argentina. La zona núcleo está comprendida entre las isotermas de 17°C al N y de 15°C al S, con un gradiente térmico de 0.7°C por cada grado de latitud, y entre las isoyetas de 1000 mm y 800 mm de lluvias anuales promedio, con un gradiente que decrece de NE a SO.

Según la clasificación de Koeppen, corresponde a un clima subtropical húmedo (Cfa) caracterizado por un verano muy cálido sin estación húmeda (Guevara, 1991).

3.1.2.1 Temperaturas

El mes más cálido es enero, con una temperatura media de 23 °C para la serie climática considerada, de 1919 a 1998. Los meses más fríos son junio y julio, con temperaturas medias alrededor de 9 – 10 °C. La amplitud anual de la temperatura aumenta de E a O, de 12 a 15 °C.

En la zona de Pergamino, caben esperarse valores de amplitudes térmicas medias entre 13 y 14°C durante el ciclo del cultivo. La evolución de la misma, en relación al cultivo de maíz, evidenciada a través del estudio de las tendencias de las temperaturas máximas y mínimas del aire durante los meses de diciembre y enero para una serie de 70 años (Totis *et al.*, 1991), reveló una disminución de 0.33 °C por año durante el período analizado debido al aumento de las temperaturas mínimas.

3.1.2.2 Período libre y fechas extremas de heladas

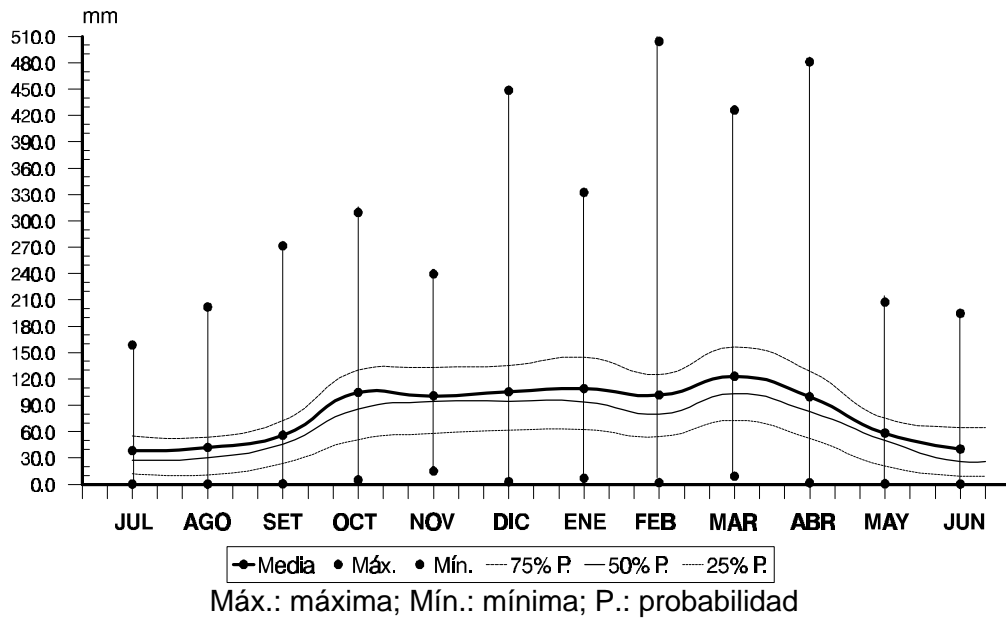
El período libre de heladas varía de 180 a 260 días por año, con una marcada variabilidad interanual. Dos de cada 10 años tienen un riesgo de heladas a fines de septiembre, en el N, y justo a mediados de octubre, en el S de la región. Pergamino, situado en el centro de la misma, presenta una frecuencia media de 6 días de heladas por año, con una temperatura mínima que puede llegar a – 5.5 °C.

3.1.2.3 Precipitaciones

El valor de la precipitación anual más frecuente (mediana) es de 981 mm para un total de 89 años, en la serie climática de 1910 a 1998, con una fuerte variabilidad interanual (Fig. 2). Para un período considerado de octubre a abril, se reciben 735 mm (76%) de una precipitación anual de 965 mm.

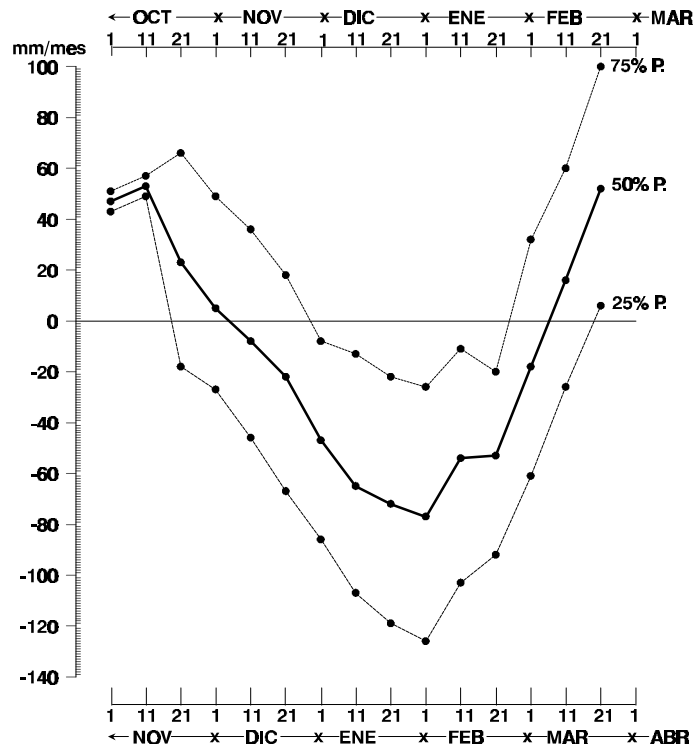
Se estima que un 34 % de la variabilidad en los rendimientos de maíz pueden ser explicados por la variabilidad de las precipitaciones en la floración (Oyarzábal *et al.*, 1980). La diferencia ETM – P (evapotranspiración máxima del cultivo – precipitaciones) es un buen indicador de la disponibilidad hídrica del cultivo. A pesar de que la proporción de lluvias sea más alta en verano, los altos valores de evaporación, sumados a las características de los suelos de la zona (valores bajos de infiltración, que disminuyen la efectividad de las precipitaciones), determinan la ocurrencia de sequías estacionales de diferente duración e intensidad. Ésta es la causa principal de la variabilidad interanual de los rendimientos del cultivo en el área, así como de la respuesta a la fertilización nitrogenada.

Figura 2. Distribución de las lluvias mensuales y su variabilidad en la Estación Experimental Agropecuaria de Pergamino para la serie 1910-1998 (Totis *et al.*, en prensa).



En la Figura nº 3, se observa que, en el período que comprende desde 28 de noviembre al 25 de febrero, 75 de cada 100 años (3 de cada 4 años) es de esperar que se produzcan deficiencias hídricas climáticas, predominando excesos en el resto de los años.

Figura 3. Probabilidades al 25, 50 y 75% de ocurrencia de excesos ($P > ETM$) y deficiencias ($ETM > P$), calculadas para períodos mensuales desplazados cada 10 días, considerando la serie climática 1932-1979 (Totis *et al.*, 1984).



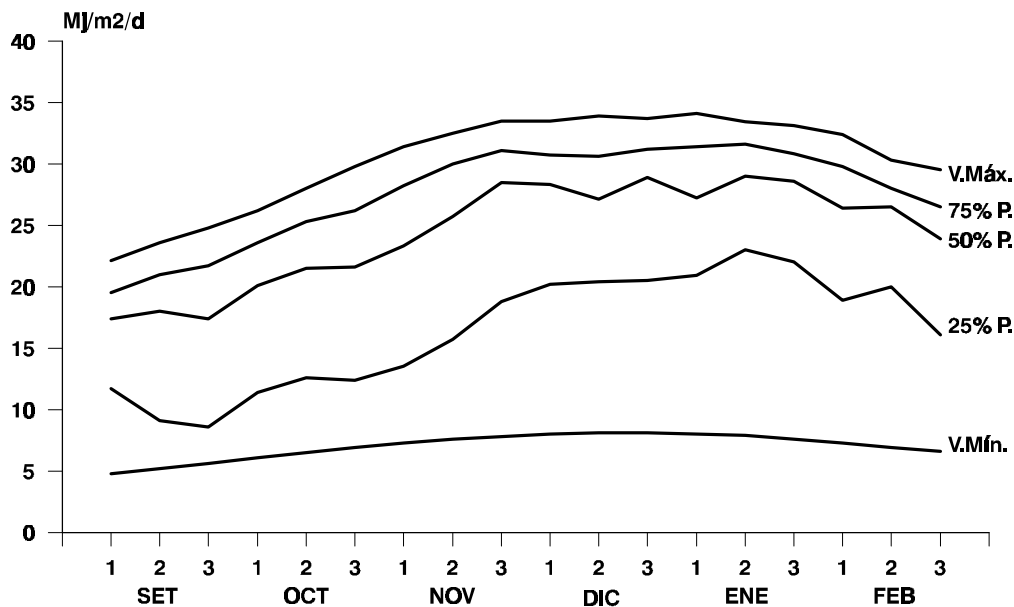
P.: probabilidad; P: precipitación; ETM: evapotranspiración máxima

Para los meses de diciembre y enero, cabe esperar, en la zona de Pergamino, deficiencias climáticas superiores a 50 mm en uno de cada dos años. Para el desarrollo de los balances hídricos, se utilizó el método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948); la evapotranspiración potencial (ETP) se corrigió con valores medidos en lisímetros instalados en el campo de la EEA Pergamino, y la lluvia considerada en el balance fue la registrada en la propia EEA (Totis *et al.*, 1984).

3.1.2.4 Radiación solar global

Para la zona de Pergamino, los valores de radiación solar global determinados no resultan limitantes, a pesar de que, en algunos años, no son expresados los rendimientos potenciales en el cultivo del maíz, debido a la ocurrencia de días nublados. En la Figura n° 4, se presentan los valores de radiación calculados para la serie climática 1980-1998, en función de la heliofanía relativa con coeficientes ajustados mediante mediciones realizadas durante tres años en Pergamino (Totis, en prensa).

Figura 4. Radiación solar global que cabe esperar para los niveles del 25%, 50% y 75% de probabilidad, cada 10 días durante el ciclo del maíz en Pergamino, Argentina.

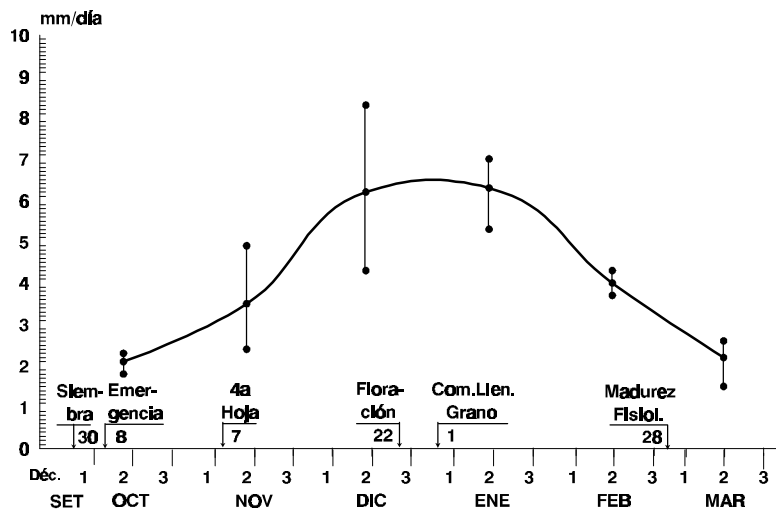


Máx.: máxima; Mín.: mínima; P.: probabilidad; V.: valor

3.1.2.5 Evapotranspiración máxima del cultivo de maíz

En la Figura n° 5, se presentan los valores de evapotranspiración máxima para el cultivo de maíz medida durante cinco años en los lisímetros de drenaje del campo de la EEA Pergamino (Totis *et al.*, 1980).

Figura 5. Evapotranspiración máxima del cultivo de maíz (evolución estacional y variabilidad interanual) medida en los lisímetros de drenaje en Pergamino, Argentina.



Dec.: decenas; Com. Llen. Grano: comienzo de llenado del grano; Madurez fisiol.: madurez fisiológica

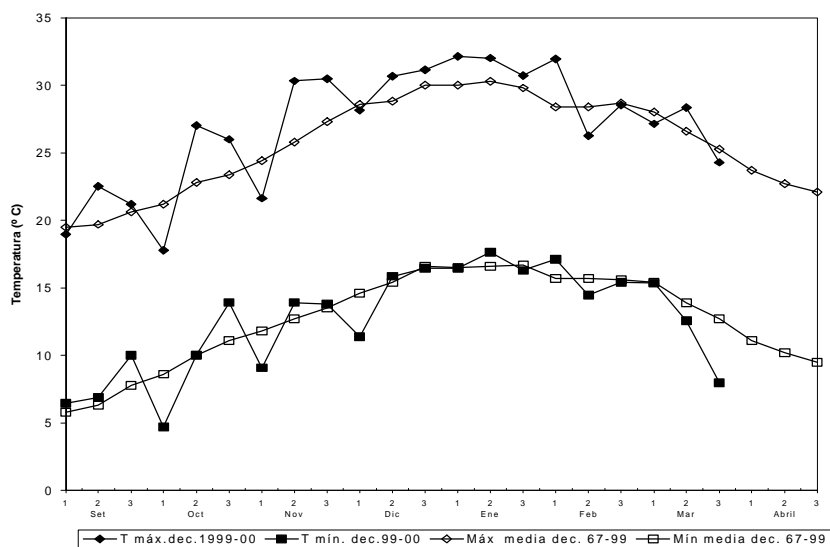
3.1.3 Condiciones climáticas del ciclo agrícola 1999 – 2000

Para poder analizar la oferta climática en relación con la fenología del cultivo, el análisis se hará en función de la fecha de siembra del cultivo experimental de maíz (Epígrafe 3.1.5). La serie climática que sirve de referencia para este estudio corresponde a los años comprendidos entre 1967 y 1999, ambos incluidos, con datos registrados en el observatorio meteorológico de la EEA Pergamino.

3.1.3.1 Temperaturas

En la Figura nº 6, se presenta la evolución de las temperaturas máximas y mínimas decadales registradas durante el ciclo del cultivo de maíz.

Figura 6. Evolución de las temperaturas máximas y mínimas decadales durante el ciclo de maíz (ciclo agrícola 1999 – 2000) comparadas con las correspondientes de la serie climática de referencia.



T. máx. dec.: temperatura máxima decadal; T. mín. dec.: Temperatura mínima decadal

Considerando que la temperatura óptima por encima de la cual no se incrementa la velocidad de desarrollo está comprendida entre 30 y 34 °C (Gilmore y Rogers, 1958; Blacklow, 1972; Tollenar *et al.*, 1979), puede inferirse que la misma no fue una variable limitante para el desarrollo del cultivo. Con respecto a las temperaturas mínimas, considerando que la temperatura base (cero de vegetación) para el crecimiento del cultivo es de 8 °C (Jones y Kiniry, 1986), se puede observar en la Figura nº 6 que sólo las mínimas de las dos primeras decenas de septiembre y de la primera decena de octubre estuvieron por debajo de ese umbral térmico.

3.1.3.2 Tiempo térmico

En la Tabla nº 1, se presentan los valores de Tiempo Térmico (TT) para las diferentes etapas de desarrollo del cultivo de maíz y las fechas de ocurrencia. El uso del término térmico como un adjetivo del tiempo es una referencia correcta del estado de la materia en función de la temperatura (Ritchie y NeSmith, 1991). El cálculo de TT se ha efectuado con la siguiente expresión:

$$TT = \sum_n (T_{med} - T_b), \quad (1)$$

donde: TT, expresado en °C; T_{med} , temperatura media del aire expresada en °C; T_b , temperatura base de desarrollo, expresada en °C; y n : número de días considerados en el sumatorio (Σ).

El TT fue calculado considerando una temperatura base de 8 °C (Jones y Kiniry, 1986). Se utiliza esta temperatura base debido a que el material utilizado es subtropical, originario de regiones templadas. Las etapas fenológicas fueron consideradas según la escala de Ritchie y Hanway (1982).

Tabla 1. Fechas, días transcurridos, y Tiempo Térmico acumulado en las distintas etapas del ciclo del maíz en la campaña experimental.

Etapa del ciclo	Fecha	Duración de la etapa (días)	Duración acumulada (días)	Tiempo Térmico (°C)	Tiempo Térmico acumulado (°C)
Siembra – emergencia	07-16/10	9	9	80	80
Emergencia – V6	16/10-18/11	33	42	372	452
V6 – Floración femenina	18/11-27/12	39	81	566	1018
Floración femenina - MF	27/12/99-15/02/00	51	133	799	1817

V6: 6 hojas expandidas; MF: madurez fisiológica del grano.

Se puede observar que para el cultivo de maíz sembrado octubre, el Tiempo Térmico (TT) muestra una buena estabilidad para la predicción de los diferentes eventos fenológicos, mientras que existe una mayor desviación con respecto a siembras de septiembre y noviembre (datos no presentados). En siembra tardías, la temperatura puede tener un efecto predominante sobre el fotoperíodo, lo que puede hacer acortar el período hasta la emergencia de la panícula.

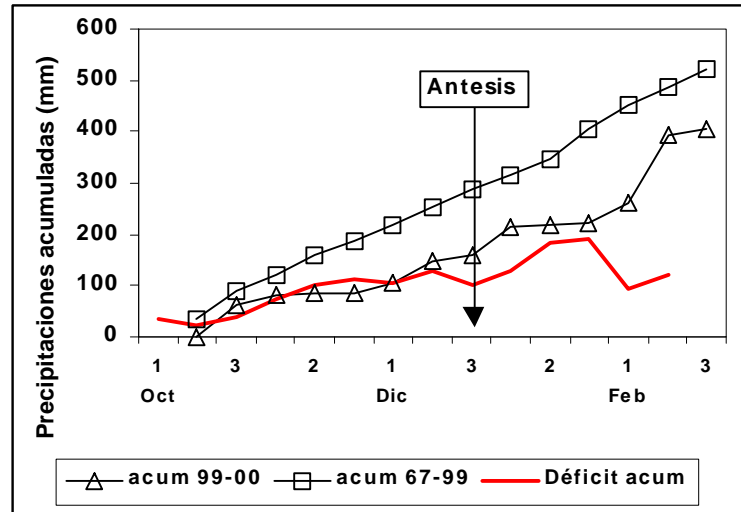
La temperatura influencia el desarrollo en las zonas donde ocurre la expansión y división celular. Law y Cooper (1976) y Cooper y Law (1978) encontraron que las plantas de maíz son mas sensibles a la temperatura del suelo que a la del aire hasta que el extremo de la doceava hoja es visible. Posteriormente a este evento, el meristema emerge por encima del suelo y es sensible a la

temperatura del aire. El cálculo del TT para etapas tempranas del ciclo, en el presente trabajo, se hizo a partir de la temperatura media del aire.

3.1.3.3 Precipitaciones

En la Figura nº 7, se presentan los aportes hídricos por precipitaciones acumuladas en relación a la evolución fenológica del cultivo. El ciclo 1999-2000 presentó un déficit de 190 mm con respecto al valor medio de la serie (1967-1999). La mayor magnitud del déficit fue coincidente con la floración.

Figura 7. Precipitaciones acumuladas para el ciclo agrícola 1999-2000, valor medio acumulado de la serie climática 1967-1999, y déficit acumulado.

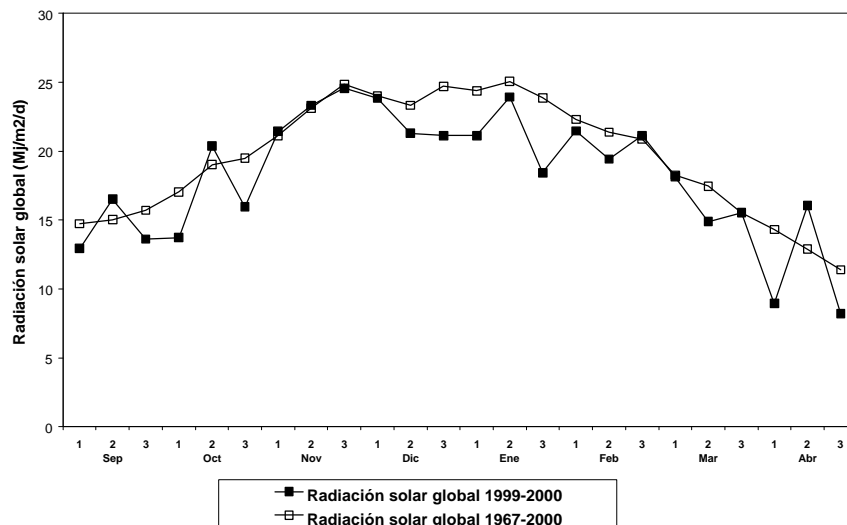


acum: acumulada; 99-00: campaña 1999-2000; 67-99: serie climática 1967-1999

3.1.3.4 Radiación solar global

En la Figura nº 8 se presentan los valores de radiación solar global para el ciclo agrícola en estudio y los correspondientes a la serie climática 1967-2000.

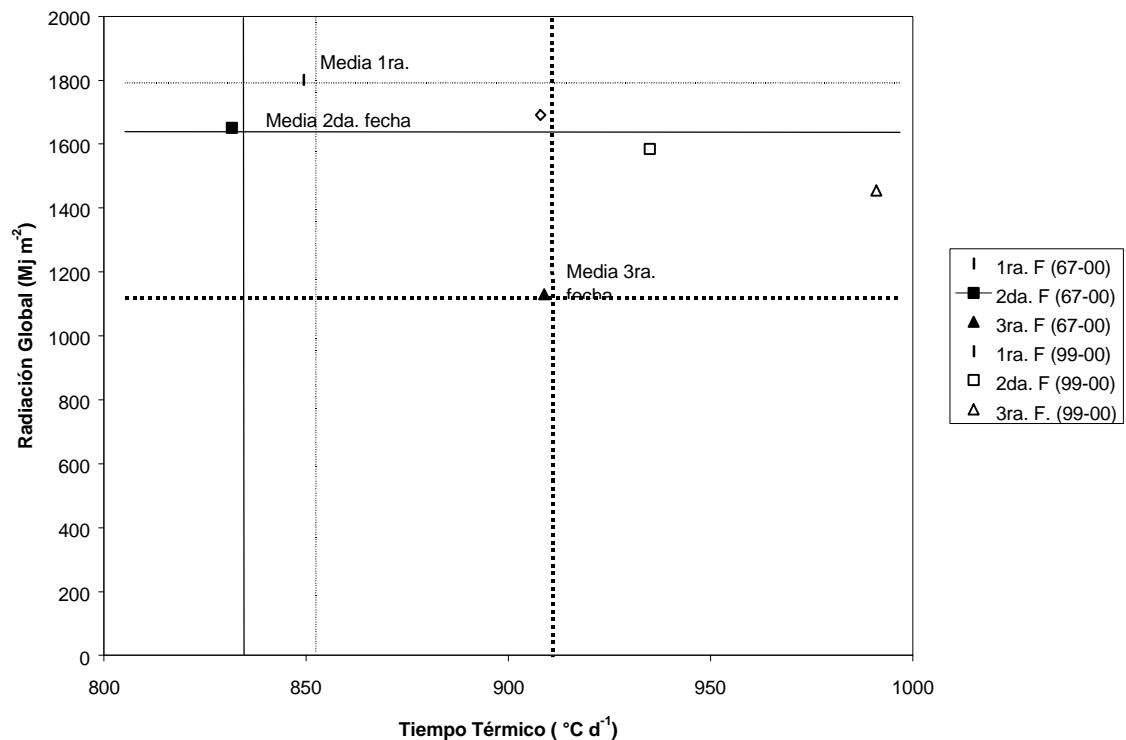
Figura 8. Evolución de la radiación solar global media decádica para el ciclo agrícola 1999-2000 y para la serie climática 1967-2000 ($Mj\ m^{-2}\ d^{-1}$).



Se puede observar (Fig. 8) que los valores de radiación solar global para el ciclo agrícola 1999-2000 estuvieron por debajo o igual a los valores medios de la serie climática, a excepción de la primera decena de octubre. Sin embargo, los valores de radiación media para el ciclo 1999-2000 no son limitantes para la producción del cultivo de maíz.

En la Figura nº 9 se presentan los valores de radiación solar global diaria acumulada en función del Tiempo Térmico acumulado para el período emergencia - floración femenina, para el ciclo 1999-2000, comparados con los valores de la serie. Se realizó esta comparación para una fecha de siembra de septiembre, la fecha de siembra del ensayo, y para una fecha de siembra tardía en la zona, en el mes de noviembre. Para la fecha de siembra del ensayo, los valores de radiación global se encontraron por debajo de los valores medios para la serie climática mientras que el Tiempo Térmico acumulado fue superior al de la serie climática.

Figura 9. Caracterización del año en función del Tiempo Térmico acumulado y radiación solar global acumulada para el período emergencia – floración femenina para una fecha de siembra temprana (septiembre), la fecha de siembra del ensayo (segunda) y una fecha de siembra de noviembre (tercer fecha de siembra) para el ciclo 1999-2000, comparados con los valores medios para el mismo período de la serie climática 1967-2000.



1ra. F.: primera fecha de siembra; 2da. F.: segunda fecha de siembra; 3ra.F.: tercera fecha de siembra

3.1.4 Caracterización edáfica

3.1.4.1 Breve reseña geológica

La zona del estudio es una fracción de la Pampa Ondulada, región de la llanura pampeana comprendida entre el curso de los ríos Paraná y de la Plata y como límite sur el río Salado en la provincia de Buenos Aires.

Los suelos de la zona están representados por sedimentos loésicos de textura, predominantemente, franco limosa, rico en minerales. Este sedimento es de edad cuaternaria. Al meteorizarse este material, ha sufrido una serie de alteraciones de diversos tipos (INTA, 1972).

3.1.4.2 Clasificación del suelo

Según la Clasificación Taxonómica Americana (7ª aproximación) (<http://www.fao.org/docrep>, 1999), el suelo en donde se realizó la experimentación corresponde a:

ORDEN: Mollisol
 SUBORDEN: Ustol
 GRAN GRUPO: Argiudol
 SUBGRUPO: Típico

3.1.4.3 Caracterización del perfil del suelo

Los suelos presentes en la zona corresponden al Gran Grupo Argiudol (INTA, 1972); el perfil característico presenta la siguiente sucesión de horizontes: A_p, A₁, B₁, B_{21t}, B_{22t}, B₃ y C. El espesor de cada horizonte y su contenido en arcilla son elementos importantes para su clasificación. El contenido en arcilla aumenta de E a O, desde la serie Junín con una textura ligera hasta la serie Ramallo, que presenta un horizonte B fuertemente textural. La serie Pergamino es una situación intermedia entre las anteriores, siendo un suelo Argiudol Típico.

Esta serie presenta un horizonte superficial de color pardo grisáceo (10YR 5/2) en seco y pardo grisáceo muy oscuro (10YR 3/2) en húmedo, de textura francolimosa y una estructura en bloques subangulares, con un 22 % de arcilla. Hacia abajo pasa gradualmente a un horizonte mas arcilloso, el horizonte B₂ que se desarrolla entre los 35 y 95 cm de profundidad, enriquecido en arcilla, cuyo contenido puede llegar hasta un 43 % en el B_{21t}. Este manifiesta una textura limoarcillosa y una estructura prismática, mientras que el B_{22t} tiene una textura limoarcillosa y una estructura en bloques subangulares medios. El horizonte B₃, que se desarrolla entre los 96 y 160m cm de profundidad, es limoso con una estructura en bloques subangulares débiles. El horizonte C se presenta a partir de los 161 cm de profundidad, con una estructura masiva y una textura limosa. En la Tabla n° 2, se presentan las características de estos horizontes.

Tabla 2. Caracterización granulométrica, y físico-química de un perfil representativo de un suelo Argiudol Típico Serie Pergamino (INTA, 1972).

Horizonte	Ap	A1	B1	B21t	B22t	B3	C
Profundidad (cm)	0-13	14-25	26-34	35-75	76-95	96-160	161-200
Arena muy gruesa, 1-2 mm, %	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arena gruesa, 500-1000 μ , %	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arena media, 250-500 μ , %	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arena fina, 100-250 μ , %	1.2	0.4	1.0	0.4	0.8	3.2	7.4
Arena muy fina, 50-100 μ , %	11.3	11.7	11.9	8.6	12.6	14.3	15.7
Limo 2-5 μ , %	64.8	65.1	56.8	47.5	56.4	65.5	69.9
Arcilla < 2 μ , %	22.7	22.8	30.3	43.5	30.2	17.0	7.0
Textura	franco limoso	franco limoso	franco arcillo limoso	arcillo limoso	franco arcillo limoso	franco limoso	franco limoso
Carbono Orgánico, %	1.69	1.48	0.87	0.64	0.35	0.24	0.15
Materia Orgánica, %	2.93	2.58	1.46	1.12	0.60	0.43	0.25
Nitrógeno Total, %	0.158	0.143	0.106	0.090	0.061	0.039	0.024
Relación C/N	11	10	8	7			
pH en pasta	5.5	5.6	5.7	5.7	6.0	6.0	6.8
pH en agua 1: 2.5	5.9	6.1	6.2	6.3	6.5	6.4	7.3
Calcáreo, CaCO ₃ , en %	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Equivalente de humedad, %	25.5	24.7	27.3	37.7	31.3	27.6	27.3
Capacidad total de intercambio (T)	21.1	20.3	18.6	32.0	27.2	24.1	25.3
Ca ⁺⁺	12.5	12.9	11.8	19.3	16.2	14.9	18.1
Mg ⁺⁺	3.1	3.3	3.5	5.8	6.3	5.3	3.9
Na ⁺	0.6	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.6
K ⁺	1.6	1.2	1.2	2.4	2.2	2.2	2.0
H ⁺	7.8	6.8	5.8	6.0	5.4	4.8	3.5
Suma de bases (S)	17.8	17.9	17.1	28.1	25.3	22.9	24.6
Saturación con bases, S/T, %	84	88	92	88	93	95	97

Estos suelos no presentan impedimentos para el crecimiento radical. Pueden existir horizontes mas compactos debido a la profundidad de labranza; sin embargo, no representan una limitación continua que impida el crecimiento de raíces. El alto contenido de arcilla del horizonte B textural determina una cierta resistencia a la penetración, pero debido a la contracción de sus unidades estructurales como consecuencia de los ciclos de secado y humedecimiento, este no representa una impedancia mecánica.

La parcela donde se instaló el ensayo presenta un suelo con las características hidrológicas, determinadas mediante la utilización de la membrana de Richards (Klute, 1986), que se describen en la Tabla n° 3.

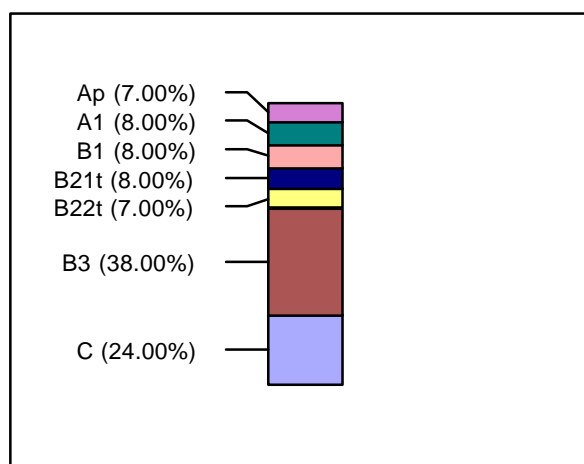
Tabla 3. Características hidrológicas de los diferentes horizontes del suelo de la parcela de ensayo.

Horizonte	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Textura U.S.D.A.	PMP (%HV)	CC (%HV)
Ap	0-13	25.2	66.2	8.6	franco limosa	18.1	34.4
A1	14-26	32.4	59.5	7.7	franco arcillo limosa	17.5	34.6
B1	27-38	36.3	56.8	6.9	franco arcillo limosa	20.4	39.7
B21t	39-70	43.6	50.2	6.2	arcillo limosa	30.5	38.1
B22t	71-90	37.3	53.4	9.3	franco arcillo limosa	26.3	36.7
B3	91-153	18.8	65.9	15.3	franco limosa	16.5	34.4
C	+154	17.7	66.6	15.3	franco limosa	15.9	30.9

PMP: punto de marchitez permanente; CC: Capacidad de campo (CC); HV: porcentaje de humedad volumétrica.

La reserva útil de agua del suelo hasta los 2 m de profundidad es de 295 mm, de los cuales el 15 % corresponde a los horizontes A, el 61 % a los B y el 24 % al horizonte C. Sin embargo, la reserva de agua útil del horizonte A es de 1.63 mm cm^{-1} mientras que es de 0.76 mm cm^{-1} para el horizonte B_{21t} debido al alto valor del punto de marchitamiento permanente (PMP). En la Figura n° 10, se muestran los porcentajes de agua útil máxima aportada por cada uno de los horizontes del perfil de la parcela de ensayo.

Figura 10. Composición porcentual de la reserva de agua útil, por horizonte, para el perfil de la parcela de ensayo, y hasta 2 m de profundidad.



3.1.5 Diseño experimental

El diseño estadístico empleado fue un factorial completo en bloques al azar con tres repeticiones. El tamaño de parcela fue de 37.8 m², 6 surcos espaciados 0.7 m entre sí y de 9 m de longitud. Se utilizó el híbrido simple de ciclo completo DK 752

(Ciclo FAO 700). La fecha de siembra fue el 7/10/1999, con una densidad de 8 plm⁻². El ensayo se condujo libre de malezas y plagas. En la Tabla n° 4 se presentan los tratamientos resultantes de la combinación de tres niveles nitrogenados con tres niveles hídricos.

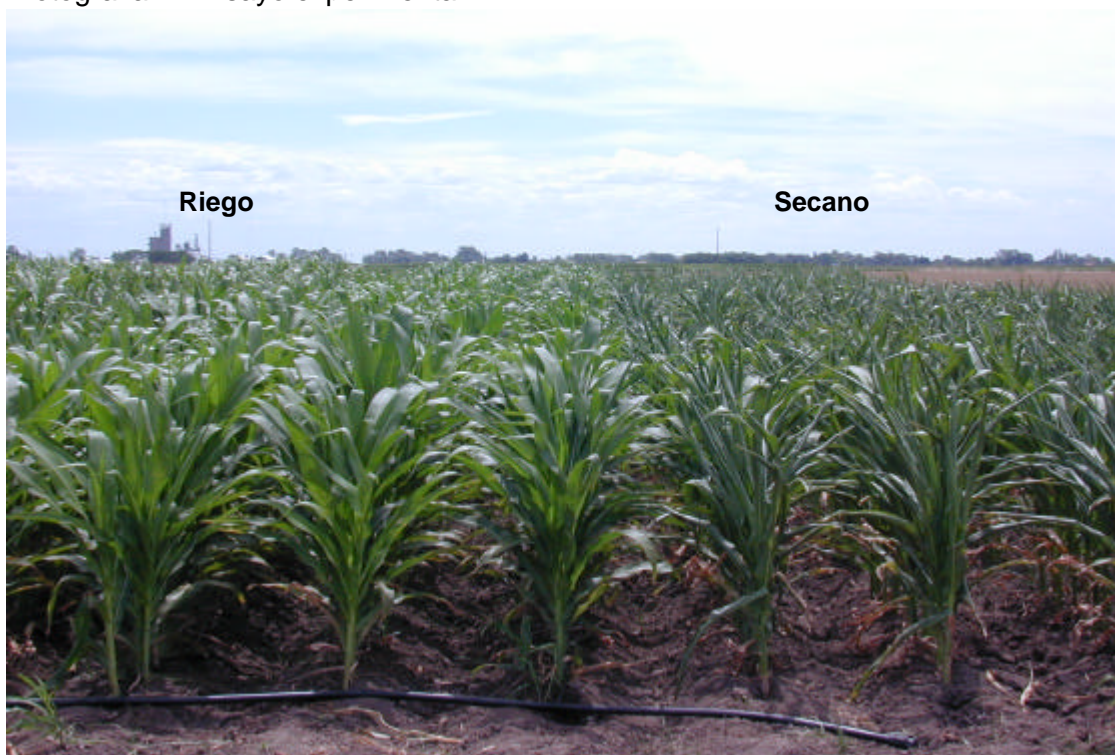
Tabla 4. Tratamientos resultantes del diseño

Programación de Riego/Fertilización	Optima (Prop)	Período Crítico (Prpc)	Secano (S)
Normal(Fn)	T1	T4	T7
Intermedia(Fi)	T2	T5	T8
Alta(Fa)	T3	T6	T9

Los tratamientos consistieron en tres niveles de fertilización nitrogenada : uno, considerado normal (Fn) para la zona, de 36 UF N; otro, considerado alto (Fa), de 130 UF N ; y el último, considerado intermedio (Fi) entre los dos anteriores, de 90 UF N. La elección de las dosis se hizo con el objetivo de crear una situación deficiente, óptima y supraóptima en relación a la nutrición nitrogenada. El reparto se realizó en dos momentos del ciclo: como fosfato diamónico (PDA, 18-43-00) se aplicaron 36 UF N antes de sembrar y el resto de los correspondientes tratamientos en cobertera como urea (46 % N) en sexta hoja, según la escala de Ritchie y Hanway (1982). Los aportes de fertilizante se realizaron mecánicamente, con una abonadora de gravedad.

En lo que se refiere a las diferentes estrategias de programación de riego planteadas en el diseño experimental, consistieron en tres: riego óptimo (Prop), el objetivo de esta estrategia fue cubrir las máximas necesidades del cultivo; riego en el período crítico (Prpc), para satisfacer las necesidades máximas del cultivo del maíz durante el período crítico (desde la octava hoja, V8, a la mitad del llenado del grano); y secano (S). En la Fot. n° 1 se presenta una imagen de un tratamiento conducido bajo riego y otro de secano, en el estado de V6, en la parcela experimental.

Fotografía 1. Ensayo experimental



* Estudio con ^{15}N

De acuerdo a un protocolo definido por la Lic. Silvia López de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), se fertilizaron microparcels en los tratamientos T1 y T7 con $48,6 \text{ kg N ha}^{-1}$ bajo la forma de urea ^{15}N (exceso isotópico: 10 %). Las microparcels fueron de 5 surcos por 2 m de longitud. Fueron muestreadas 5 plantas en las fechas y con la metodología descrita en el epígrafe 3.1.8.2.

Con estos datos fue calculado el Coeficiente Real de Utilización (CRU; Guiraud, 1984), definido como la proporción de N en la planta proveniente del fertilizante en relación a la cantidad de N aportada por el fertilizante.

$$\text{CRU} = \text{N abs.} \cdot \text{Epl} / \text{F} \cdot \text{Ef}, \quad (2)$$

donde= N abs.= cantidad total de N absorbida por la planta, F= cantidad de N aportada por el fertilizante; Epl y Ef = exceso isotópico de la planta y del fertilizante, respectivamente. Estas determinaciones fueron realizadas por la CNEA y en este trabajo se presentan sólo los resultados de los CRU utilizados en los balances de N simplificados.

3.1.6 Metodología de programación del riego

Para la programación del riego, se realizó un seguimiento del contenido hídrico edáfico a lo largo del ciclo del cultivo, para realizar un balance de agua en el suelo. La definición de los distintos elementos que constituyen el balance se hizo a partir de resultados de experiencias previas (Maturano *et al.*, 1997). La profundidad considerada a tal fin fue de 0.40 m, asumiendo que es en este tramo (0-0.40 m), donde se encuentra la máxima densidad radicular (Guevara, 1991). El objetivo de la programación fue el de mantener en un 30-50 % del contenido de agua útil, el suelo a la profundidad de 0.40 m, durante todo el ciclo del cultivo (Prop) y durante el período crítico (Prpc). La extensión del período crítico se consideró durante el período de elongación activa de la espiga, -200 y 100°C desde la floración femenina (Otegui *et al.*, 1997). Este contenido de agua útil equivale a tener una evapotranspiración cercana a la máxima (Totis *et al.*, 1997 b). La metodología empleada para realizar el seguimiento de humedad edáfica, para las tres fechas de siembra, fue el método gravimétrico cuando se midió en superficie (0.00 – 0.40 m), y, cuando se midió en profundidad (0.40-2.00 m), por la atenuación de neutrones (Klute, 1986) con una sonda neutrónica Troxler 2601, NC, USA, de 100 MCI, calibrada en la EEA INTA Pergamino (Zeljovich *et al.*, 1980). Un tubo de acceso de aluminio fue instalado por tratamiento y repetición para las mediciones con la sonda neutrones. La ubicación del mismo, dentro de cada parcela elemental, fue el centro geométrico, lugar donde también se realizaron las mediciones gravimétricas. En cada fecha de medición de humedad se realizó un muestreo gravimétrico (0.00-0.13, 0.14-0.26, y 0.27-0.38 m de profundidad) y una medición con la sonda de neutrones, también por horizonte (0.39- 0.71, 0.71-0.90, 0.91-0.153 y 1.53-2.00 m). Las mediciones con la sonda de neutrones se realizaron en la mitad de cada horizonte, a excepción de los de mayor desarrollo (0.91-1.53 y 1.53-2.00 m), donde se llevaron a cabo dos tomas de datos. Las fechas de las mediciones se recogen en la Tabla n° 5; la última medición corresponde a la madurez fisiológica.

Tabla 5. Fechas de medición del contenido hídrico edáfico.

Fechas de medición
01/07
01/09
11/11
17/11
29/11
09/12
22/12
29/12
06/01
14/01
20/01
04/02
07/03

El sistema de riego empleado fue presurizado, por goteo. El agua utilizada procedía de un sondeo ubicado en la EEA Pergamino, a 200 m del lugar del ensayo. Se utilizó una bomba centrífuga de eje horizontal para la extracción del agua. La aplicación de los riegos se realizó por medio del accionamiento de válvulas manuales. El cabezal disponía de un filtro de anillas. La tubería de conducción y distribución del agua a la parcela era de PVC, de diámetro 1.5 " y 2.5 atm de presión, mientras que la tubería secundaria, del mismo material, llevaba una llave de paso manual para controlar el acceso del agua a cada una de las parcelas elementales; de esta tubería salían las líneas portagotos. Se instaló una línea de riego por surco, con los goteros espaciados a 0.30 m entre si. Los emisores utilizados fueron autocompensantes. Para el control del agua aplicada, debido a que no se contó con medidores de presión, se procedió a medir, en cada riego, el volumen en función del tiempo con el uso de pluviómetros. Además, se verificó que la instalación no tuviera problemas de obstrucciones ni pérdidas de caudal, comprobando que no existieran diferencias entre los goteros ubicados en las situaciones mas extremas, superiores al 10 % del caudal nominal. En la Tabla n° 6, se presentan los milímetros de altura de agua aplicados.

Tabla 6. Milímetros de altura de agua aplicados.

Fecha	Tratamiento	Fecha	Tratamiento
	Prop		Prpc
29/11	35		0.00
17/12	19.95	17/12	19.95
20/12	54.21	20/12	26.21
22/12	14		0.00
22/12	27		0.00
26/12	42	26/12	42.00
30/12	15.3	30/12	15.30
04/01	20	04/01	20.00
05/01	21.975		0.00
28/01	55	28/01	55.00
31/01	35.75	31/01	35.75
Total aplicado	340.18		214.21

Prop: riego óptimo, Prpc: riego en el período crítico

3.1.7 Fitotecnia del maíz

El cultivo precedente en la rotación de cultivos fue una pastura de festuca alta (*Festuca arundinacea* L.), de cinco años de antigüedad, la que fue picada e incorporada al suelo, con un pase de segadora rotativa y labor de vertedera, en el mes de julio.

La primera aplicación de fertilizante se realizó el 01/10/1999, con una dosis de 200 kg/ha del abono complejo 18-43-00 (36 UFN, 86 UF P_2O_5). Para el control de las malezas se realizó una aplicación de herbicida preemergente, mediante pulverizador arrastrado. La siembra, (Epígrafe 3.1.5), se realizó con una sembradora de precisión mecánica, a una profundidad de 5 cm. La segunda aplicación de herbicida se efectuó el 5/11/1999 con pulverizador arrastrado, recurriendo a la dosis y productos siguientes: 4 l/ha Atrazina, + 1 l/ha aceite + 2 l/ha Acetoclor + 100 cm³ dicamba.

El 18/11/1999, cuando el cultivo se encontraba con la sexta hoja desplegada, se llevó a cabo la aplicación de N en cobertera (Epígrafe 4.1.5) incorporándose al suelo en la misma operación con un cultivador de precisión con 5 rejas. El 17/12/1999 se realizó la segunda aplicación de fertilizante. No se realizaron tratamientos contra plagas y enfermedades por no existir tales problemas.

3.1.8 Mediciones realizadas

3.1.8.1 Suelo

Se caracterizó el perfil edáfico de la parcela de ensayo, en cuanto a :

- Descripción de horizontes (secuencia, espesor, características) (Epígrafe 4.1.4.3).
- Determinación de las constantes hídricas edáficas, siguiendo la metodología de las membranas de Richards (Klute, 1986).
- Determinación de la densidad aparente de cada uno de los horizontes, aplicando el método de cilindros (Klute, 1986).

Además, se determinaron las condiciones edáficas iniciales del perfil del suelo en lo que se refiere a:

- Situación hídrica inicial en cada uno de los horizontes, hasta 2.00 m de profundidad. La metodología seguida fue la gravimétrica (Klute, 1986).
- Situación nutricional inicial en lo que se refiere a las distintas formas de nitrógeno presentes en el suelo: $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$, N orgánico, y relación C/N de la materia orgánica existente en el suelo. La metodología seguida para estas determinaciones fue la destilación de Bremner ($N-NH_4^+$), Aleación Debarde ($N-NO_3^-$), Kjeldhal (N orgánico) y Oxidación con dicromato (C orgánico).
- Relación C/N de los residuos del cultivo precedente en la rotación, siguiendo el método descrito por Klute (1986) para las determinaciones de carbono y nitrógeno orgánico.

Durante el desarrollo del cultivo, se efectuó un seguimiento mensual de la evolución del nitrógeno mineral edáfico ($N-NH_4^+$ y $N-NO_3^-$), según la metodología mencionada anteriormente. Para el muestreo, se tomaron 6 puntos por parcela elemental y por horizonte; según el estado fenológico la profundidad de muestreo considerada fue de 0.80 a 2.00 m de profundidad.

Se determinó la evolución hídrica edáfica en cada parcela elemental y por horizonte, según la metodología descrita anteriormente en este mismo epígrafe, con la frecuencia que se presenta en la Tabla nº5.

3.1.8.2 Cultivo de maíz

a) Análisis de crecimiento y desarrollo

. Fijación en el tiempo de las distintas fases de desarrollo del ciclo agronómico del cultivo de maíz y la duración de las etapas de mayor relevancia. Las distintas fases y etapas del ciclo de desarrollo se fijaron en el tiempo siguiendo la escala de Ritchie y Hanway (1982). Para la fijación de las distintas fases del ciclo, fueron identificadas 30 plantas por parcela elemental, en las cuales se realizó el seguimiento. Se consideró que el cultivo estaba en un estadio cuando el 50 % de las plantas alcanzaban esa fase.

Las fechas en que se fijaron las distintas fases se han referido con el número de días transcurridos desde emergencia y con el TT acumulado, en base a un cero de vegetación de 8°C (Jones y Kiniry, 1986). Se utiliza una temperatura base de crecimiento de 8° C debido a que el material vegetal es originario de regiones templadas. Las fases observadas fueron las siguientes: emergencia (E); seis hojas (V6); nueve hojas (V9); catorce hojas (V14); floración (Vt-R1); grano lechoso (R3); grano pastoso (R4); madurez fisiológica del grano (R6).

También, con el objeto de analizar la influencia de los distintos tratamiento de N y agua, así como la influencia de las distintas fechas de siembra, se consideró la duración de las siguientes etapas del ciclo, expresada tanto en días como en TT acumulado: siembra-E, E-V6, V6- R1, R1 -MF.

. Evolución de la materia seca aérea particionada. Las fechas de muestreo en el ciclo agrícola 1999–2000 fueron: 03/12, 15/12, 28/12, 13/01, 26/01, y 08/03 (V6, V9, R1, R3, R4, y R6, respectivamente). El tamaño de la muestra utilizada para la medición se determinó con el objetivo de obtener un coeficiente de variación (CV) menor del 10 %, lo que supuso, según la etapa del ciclo, el contar con una muestra de 5 plantas por muestreo y parcela elemental. Las plantas se extrajeron de cada parcela elemental, utilizando la mitad anterior, y los cuatro surcos centrales de la misma dejados para tal fin. Las plantas fueron cortadas a ras del suelo. Las plantas muestreadas fueron separadas en hoja (lámina), tallo (incluidas las vainas foliares), panícula, espiga, brácteas + pedúnculo de la espiga. Cuando comenzó la senescencia, las hojas se pesaron por separado: porción verde y porción senescente. Cada órgano se pesó por separado después de haber permanecido en estufa con ventilación forzada a 70°C durante, aproximadamente, 72 horas, hasta peso constante.

. Medición del área foliar. Las mediciones de superficie foliar fueron realizadas en las mismas plantas y momentos de muestreo que para el estudio de la evolución de la materia seca. El instrumental utilizado fue un Licor 3100 Leaf Area Meter (LI-COR, Lincoln, NE, USA).

. Elaboración de los índices de crecimiento. El cálculo de estos índices se realizó aplicando el método clásico (Radford 1967; Hunt, 1978 y 1982), que describe el crecimiento de los cultivos en forma no continua, en función de las fechas de medición realizadas. Los índices calculados se presentan en la Tabla n° 7.

Tabla 7. Índices de crecimiento. Método Clásico.

Índice (abreviatura)	Forma de cálculo	Unidad
Índice de área foliar (IAF) Leaf Area Index (LAI)	$\text{cm}^{-2} \text{AF cm}^{-2} \text{S}$	adimensional
Tasa absoluta de crecimiento del cultivo (CGR) "Crop Growth Rate" (CGR)	$(\text{MST}_2 - \text{MST}_1) / (t_2 - t_1)$	$\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$
Velocidad relativa de crecimiento (RGR) "Relative Growth Rate" (RGR)	$(\ln \text{MST}_2 - \ln \text{MST}_1) / (t_2 - t_1)$	$\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$
Velocidad de asimilación neta (NAR) "Net Assimilation Rate" (NAR)	$((\text{MST}_2 - \text{MST}_1) * (\ln \text{LAI}_2 - \ln \text{LAI}_1)) / ((t_2 - t_1) * (\text{LAI}_2 - \text{LAI}_1))$	$\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$
Relación entre área foliar (AF) y materia seca (MST) "Leaf area ratio" (LAR)	$((\text{LAI}_2 / \text{MST}_2) + (\text{LAI}_1 / \text{MST}_1)) / 2$	$\text{dm}^2 \text{g}^{-1}$
Duración de área foliar (LAD) "Leaf Area Duration" (LAD)	$(\text{LAI}_1 + \text{LAI}_2) * (t_2 - t_1) / 2$	d

S= superficie del terreno; $t_2 - t_1$ = diferencial de tiempo; d= día

. Medición de la tasa de llenado de grano. Se realizaron dos muestreos semanales durante la etapa de llenado de grano (Vt–MF), en las siguientes fechas: 04/01, 06/01, 12/01, 14/01, 18/01, 21/01, 25/01, 28/01, 01/02, 04/02, 08/02, 11/02, 15/02, 18/02, 25/02, 01/03, y 03/03.

En cada muestreo, se tomaron dos espigas por parcela elemental, extrayéndose 20 granos de la parte central de cada una de ellas. Los mismos se pesaron en fresco y en seco, luego de permanecer en estufa de ventilación forzada durante, aproximadamente, 48 horas a 70 ° C, hasta peso constante.

Se analizó el crecimiento del grano en esta etapa por medio de los índices que se recogen en la Tabla n° 8.

Tabla 8. Índices de crecimiento.

Índice (abreviatura)	Forma de cálculo	Unidad
Velocidad absoluta de crecimiento en la etapa de llenado de grano (CGR _g)	$d\text{MS}_{\text{lg}} / dt$	$\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$
Duración de área foliar a partir de floración (LAD _{lg})	$\text{LAI} dt$	d

b) Cuantificación del balance radiativo

. Para el balance radiativo fue considerada la fracción fotosintéticamente activa (PAR: "Photosynthetically Active Radiation", PAR) y útil a la fotosíntesis, comprendida entre las longitudes de onda 400 – 700 nm, de la radiación global (R_g).

Para el balance radiativo fue considerada la expresión, (Plénet, 1995):

$$\text{PAR}_a = \text{PAR}_o - \text{PAR}_t - \text{PAR}_r + \text{PAR}_{rs}, \quad (3)$$

donde: PAR_a= radiación solar fotosintéticamente activa absorbida por el cultivo, PAR_o= radiación solar fotosintéticamente activa incidente, PAR_t= radiación solar

fotosintéticamente activa transmitida al suelo, PAR_r = radiación solar fotosintéticamente activa reflejada por el conjunto suelo – cultivo, y PAR_{rs} = radiación solar útil a la fotosíntesis reflejada por el suelo.

Para el cálculo de PAR_a , fueron medidos todos los componentes del balance radiativo en cada parcela elemental. A partir del 7 de diciembre, se realizaron mediciones semanales en las siguientes fechas: 7/12, 14/12, 21/12, 30/12, 05/01, 18/01, 27/12, 03/02, 15/02, 16/03. Esta medición se llevó a cabo en tres puntos por parcela elemental, en el mediodía solar, siguiendo la técnica de Gallo y Daughtry (1986) y Hall *et al.* (1994). En cada punto, fue medida la PAR_o , PAR_t (con el sensor orientado hacia el zenith), PAR_s y PAR_{rs} (ambas con el sensor orientado hacia el suelo). El instrumental utilizado fue AccuPAR, PAR Ceptometer (Decagon Devices Ins., Pullman, WA, USA). En la Fotografía n° 2 se presenta una imagen del instrumental utilizado.

Fotografía 2. Instrumental utilizado para la medición de la RFA



La radiación solar global (R_g) fue registrada en el observatorio meteorológico de la EEA Pergamino. Los valores registrados diariamente fueron multiplicados por un factor de eficiencia climática (E_c) de 0.48 para transformarlos en PAR incidente (PAR_o) (Varlet-Grancher *et al.*, 1982 ; Varlet-Grancher *et al.*, 1989).

Para cada fecha de medición se calculó el porcentaje de PAR_a con respecto a PAR_o . Los valores diarios de dicho porcentaje se estimaron aplicando la técnica de la regresión no lineal aplicada a los momentos de muestreo, y se acumularon para obtener el valor de PAR absorbido en cada etapa del ciclo vital del maíz (Uarth *et al.*, 1995). Como el objetivo fue el de comparar la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) entre los diferentes niveles de agua y nitrógeno, no se realizaron correcciones de PAR por el ángulo de incidencia. Uarth *et al.* (1995) no encontraron que esta corrección modificara la respuesta relativa en la EUR en el cultivo de maíz cultivado bajo diferentes niveles nitrogenados. Los resultados calculados en la EUR son levemente dependientes de la densidad de flujo de radiación solar al mediodía (Murata, 1981).

El cálculo de la EUR se efectuó mediante la expresión siguiente (Rana *et al.*, 1995):

$$\text{EUR} = \text{MST} / \text{PARa} \quad (4)$$

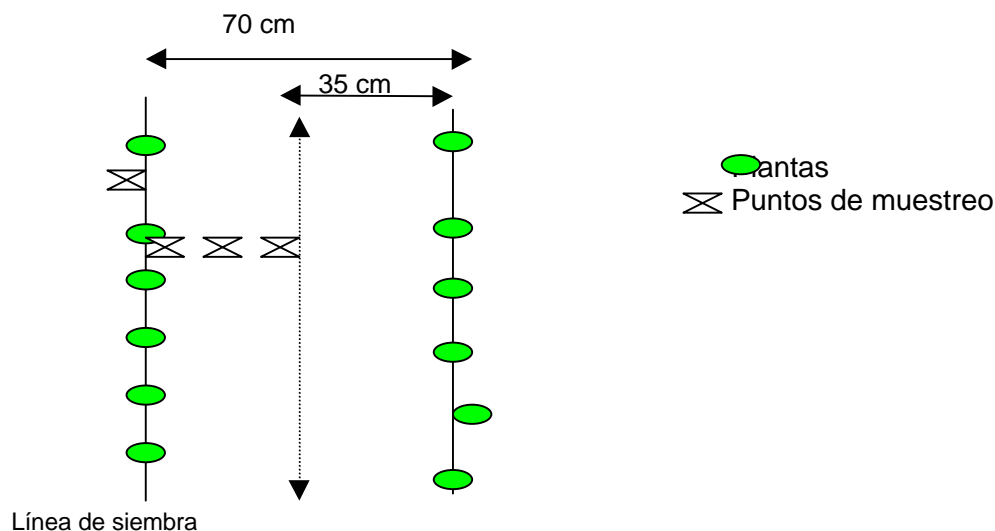
donde: MST= materia seca total (aérea) acumulada en la etapa correspondiente, expresada en g m^{-2} ; y PARa= radiación fotosintéticamente activa absorbida acumulada en la etapa correspondiente, expresada en MJ m^{-2} . Para el cálculo de EUR, se consideraron las etapas V6- R1 y R1- R6.

c) Medición de la densidad volumétrica radical

Se realizó una medida puntual en la etapa del ciclo floración-comienzo de llenado de grano, momento de máxima expresión de crecimiento y desarrollo del sistema radical del maíz (Guevara, 1991), para efectuar una comparación entre tratamientos y estudiar el efecto del nitrógeno en la relación parte aérea/raíz.

La metodología empleada fue la descrita por Newman(1966). El muestreo para esta determinación se llevó a cabo en cinco tratamientos contrastantes (T1, T2, T3, T7, y T9; Epígrafe 4.1.5.), tanto para niveles hídricos como de fertilización nitrogenada. Para este muestreo se utilizó un barreno de 50 cm de tipo "Guidding", instalado en el enganche de tres puntos de un tractor hidráulico. La toma de muestra se llevó a cabo hasta los dos metros de profundidad del perfil del suelo. En cada parcela elemental, se sacaron cuatro muestras en las siguientes ubicaciones: a una distancia de 5 cm de la planta en la línea de siembra, en la mitad de la entrelínea, a un tercio de la planta contando la distancia de la línea de siembra a la mitad de la entrelínea y a dos tercios según esta distancia (Fig. 11).

Figura 11. Esquema de los puntos de muestreo para la determinación de la longitud volumétrica radicular (L_v , cm cm^{-3}).



En cada punto de muestreo, se tomaron 7 muestras, una por horizonte. Las muestras obtenidas fueron lavadas en una columna de lavado, previa agitación, y luego de dejarlas durante 12 h en una solución dispersante de agua y cloruro de sodio. Una vez lavadas, se colorearon con el colorante rojo congo. Posteriormente a la coloración, las raíces se colocaron en un papel de filtro de 10 cm de diámetro, en donde se contó el número de intersecciones de las mismas con cada lado de 25 cuadrados de 1 cm tomados al azar, en una cuadrícula formada por 100 cuadrados.

La expresión utilizada para pasar estos datos a densidad volumétrica radicular fue la siguiente (Newman, 1966):

$$Lv = (A/2L) * (dN/P) \quad (5)$$

donde: Lv =longitud volumétrica radical, expresado en cm cm^{-3} ; A = número de cuadrados con intersección de raíces, expresado en cm^2 ; L = perímetro del número de cuadrados con intersección de raíces, expresado en cm ; d = densidad aparente de cada horizonte, expresado en g cm^{-3} ; N = número de intersecciones de cada muestra; y P = peso seco de la muestra de tierra de cada horizonte, expresado en g .

3.1.8.3 Estudio de la dinámica de absorción de nitrógeno

Para el estudio de la dinámica de absorción de nitrógeno, se midió la evolución del contenido de nitrógeno en planta mediante su determinación en hoja, tallo, panícula + zuro + brácteas, y grano. Los momentos de muestreo fueron los mismos que los señalados en las mediciones de la materia seca particionada (Epígrafe 3.1.8.2). Las plantas muestreadas fueron secadas en estufa a 60°C hasta peso constante, y luego molidas. La determinación de N se hizo sobre muestra tamizada en malla de 1mm . El método empleado fue el de Kjeldhal (López Rita, 1990).

También, se determinó la evolución del contenido de nitrógeno en grano, a partir del inicio del período de llenado hasta la maduración fisiológica, por el método anteriormente referenciado. La metodología empleada para el muestreo fue la misma que la empleada para la cuantificación de la evolución de la materia aérea particionada (Epígrafe 3.1.8.2). Los momentos de muestreo son los señalados en las mediciones de la materia seca particionada a partir de floración (Epígrafe 3.1.8.2).

Con los valores determinados de la evolución del contenido de nitrógeno total en planta y del nitrógeno mineral del suelo (Epígrafe 3.1.8.1) se estudió la dinámica de absorción de nitrógeno para los diferentes tratamientos.

El cálculo de la fertilización nitrogenada, utilizando el método balance nitrogenado en el suelo, puede ser representada mediante la siguiente ecuación de balance (Machet, 1993):

$$b * Y + Rf + Pl + (Pv + Pd) = Ri + Mh + Mr + Ma + Ap (All + Af) + Ai + X \quad (6)$$

donde: b = nitrógeno absorbido para producir una unidad de producción (kg/kg); Y = rendimiento (kg/ha); Rf = nitrógeno mineral residual después de cosecha (N-NO_3^- y N-NH_4^+); Pl = pérdidas por lixiviación, $Pv+Pd$ = pérdidas por vía gaseosa (volatilización y denitrificación); Ri = cantidad de nitrógeno mineral al inicio del balance (N-NO_3^- y N-NH_4^+); Mh = mineralización neta del humus del suelo; Mr = contribución neta de los residuos de la cosecha precedente; Ma = contribución neta de las enmiendas orgánicas; Ap = aportes no controlados (All = lluvias, Af = fijación no simbiótica); Ai = contenido de nitratos en el agua de riego; y X = contenido de nitrógeno del fertilizante mineral.

Este balance consiste en equilibrar las necesidades de N del cultivo con la disponibilidad, constituida por las oferta del suelo mas el aporte del fertilizante. Se pueden realizar las siguientes simplificaciones con respecto a la expresión del balance nitrogenado (Plénet, 1995):

- Los aportes por las lluvias y la fijación no simbiótica compensan las pérdidas por vía gaseosa.
- En un balance realizado en el período del cultivo, las pérdidas por lixiviación son despreciables. El valor de lixiviación sirve para corregir el valor de R_i , si existen lluvias importantes entre la fecha de medición de R_i , y la de aporte de X .
- Las fechas de comienzo y fin de balance se sitúan en un momento de relativa estabilidad de cantidad de nitrógeno mineral en el suelo.
- El nitrógeno proveniente de diferentes fuentes tiene el mismo coeficiente de utilización por la planta.
- Es un modelo aditivo que supone la ausencia de interacción entre los diferentes términos.

Teniendo en cuenta las simplificaciones anteriores se puede escribir la expresión n° 6 de la siguiente forma:

$$b * Y + R_f = R_i + M_h + M_r + M_a + A_i + X \quad (7)$$

Una expresión aún más simplificada, es la siguiente (Machet *et al.*, 1987)

$$Y_b = (DN + F)k \quad (8)$$

donde: DN = suma del nitrógeno derivado de la mineralización del humus, de los residuos culturales, del fertilizante orgánico, y del nitrógeno mineral del suelo después del invierno; F = cantidad de nitrógeno aportada como fertilizante; y K = coeficiente de utilización del fertilizante.

La expresión utilizada en el presente trabajo es:

$$N_s + N_f + N_{min} = N_{abs} + N_{perd} + N_{res} \quad (9)$$

donde, N_s = contenido de nitrógeno mineral inicial del suelo (kg/ha); N_f = nitrógeno aportado por el fertilizante (kg/ha); N_{min} = nitrógeno mineralizado (kg/ha); N_{abs} = nitrógeno absorbido por el cultivo (kg/ha); N_{perd} = pérdidas de nitrógeno (kg/ha); N_{res} = contenido de nitrógeno en el suelo al final del ciclo del cultivo (kg/ha).

3.1.8.4 Cuantificación del grado de estrés hídrico

. Se midió la evolución del potencial xilemático en planta durante la etapa comprendida desde floración hasta la mitad del período de llenado efectivo de grano. En esta etapa, se hicieron mediciones dos veces por semana de potencial xilemático a las 4:30, 14:00 y 21:00 hs. Las fechas de mediciones fueron: 28/12, 03/01, 07/01, 11/01, 13/01, 18/01, 20/01, 25/01, 27/01. La determinación se realizó en la hoja de la espiga en tres plantas por parcela. Las mediciones se realizaron en la repetición II, después de no encontrar que el coeficiente de variación (CV) fuera mayor a 15 % entre repeticiones, con el objetivo de no utilizar más de una hora para la medición de todos los tratamientos. El equipo utilizado fue una cámara de presión (modelo desarrollado en la EEA INTA Pergamino). Para su aplicación se siguió la metodología de Scholander *et al.* (1965).

. Fue medida la temperatura del canopeo mediante termometría infrarroja. El instrumental utilizado fue termómetro infrarrojo (TI) (modelo 130 AL Everest Interscience, Fullerton, Ca, USA). El termómetro con un campo de visión de 3° y una ventana sensible entre 8-14 μm (-30 °C – 100 °C). En la Fot. n° 3 se presenta una imagen del instrumental utilizado. Este parámetro se midió en la misma repetición y

en las mismas fechas en las que se determinó el potencial xilemático. La medición se efectuó al mediodía solar. Se realizaron cuatro mediciones por parcela elemental hacia cada punto cardinal, aunque Clawson *et al.* (1982) no encuentran una dependencia entre la temperatura foliar y la dirección de medición, en el cultivo de maíz cultivado en bajos a moderados niveles de estrés hídrico. También, se midieron las temperaturas con el termómetro infrarrojo direccionado hacia el suelo, haciendo un barrido en la línea del cultivo y promediando las mediciones, y hacia el zenit.

Fotografía 3. Instrumental utilizado para la medición de la temperatura de la cubierta vegetal.



Las fechas de medición elegidas tuvieron el objetivo de lograr la caracterización de cambios en la apertura estomática y tasa de transpiración, así como variaciones en las condiciones ambientales: radiación solar, velocidad del viento, temperatura del aire, y déficit de presión de vapor (DPV). Los datos representan un rango de condiciones ambientales en el momento del día en donde ocurre una situación de estrés (Gardner *et al.*, 1992). Con los datos obtenidos, se calculó el SDD (Idso *et al.*, 1977 y Jackson *et al.*, 1977).

. Medición indirecta del frente del avance radical a partir de las mediciones de la dinámica del perfil hídrico en distintos momentos del ciclo del cultivo. Con este objetivo, se efectuaron mediciones de la humedad del suelo por los métodos gravimétricos en superficie y atenuación de neutrones en profundidad. Las fechas de medición se presentan en el epígrafe 3.1.6.

3.1.8.5 Medición del rendimiento en grano a cosecha y sus componentes. Cálculo del índice de cosecha (HI).

. Se recolectaron manualmente 7.7 m² por parcela elemental. Sobre cada una de estas muestras, se contó el número de plantas y de espigas y se determinaron los pesos de cada espiga, zuro, y grano por espiga. En cada espiga, se contó el número de hileras y de granos en tres hileras. Se determinaron las humedades de grano y zuro, pesando a peso constante los mismos luego de permanecer en estufa a 70° C. Los resultados de rendimiento de grano son expresados según las normas de comercialización, a una humedad de 14.5%. Para la determinación del peso unitario del grano (PUG), se contaron y pesaron 8 muestras de 100 granos cada una por parcela elemental.

* Cálculo del IC. Para el cálculo de este índice, se utilizaron los valores de MST, y el rendimiento por tratamiento, corregido a 0 % de humedad. El índice de cosecha representa la relación entre el rendimiento (kg ha⁻¹) y la MST (kg ha⁻¹) (Cox *et al.* 1994).

3.1.8.6 Tratamiento estadístico de los datos

Los resultados obtenidos fueron tratados con análisis de varianza de dos factores, fecha por fecha, con la opción GLM (“General Linear Model”, SAS v.8.0, 2000). El análisis de varianza (ANOVA) es una de las herramientas más valiosas de la Inferencia Estadística, desarrollada en los años 30 por Fisher (Romero y Zúñica, 1993). Esta técnica permite descomponer la variabilidad total observada en los resultados en una serie de términos, asociados a los efectos de los distintos factores estudiados y a sus interacciones, más un término residual que recoge el efecto conjunto de todos los otros factores que han influido en los resultados y que no han sido incluidos explícitamente en la experiencia. Los tests de comparación de medias fueron utilizados para constatar, fundamentalmente, las tendencias observadas. El test utilizado fue el de Tuckey (Tuckey, 1974), el nivel de riesgo elegido en α , fue fijado en todos los casos en 5 %.

Un alto número de resultado fue analizado por técnicas de regresión lineal y no lineal (Borowiak, 1989). La lógica que permite los ajustes no lineales utilizó el algoritmo de iteración de Marquarth, el que es considerado como uno de los más robustos en este tipo de cálculos (Tomassone *et al.*, 1983). La selección del modelo matemático se realizó teniendo en cuenta la parte de la varianza que explicaba el modelo (coeficiente de determinación, R²), y la significación agronómica del mismo, privilegiando siempre aquellos modelos con menor número de parámetros, de manera tal de reducir el intervalo de confianza en las estimaciones.

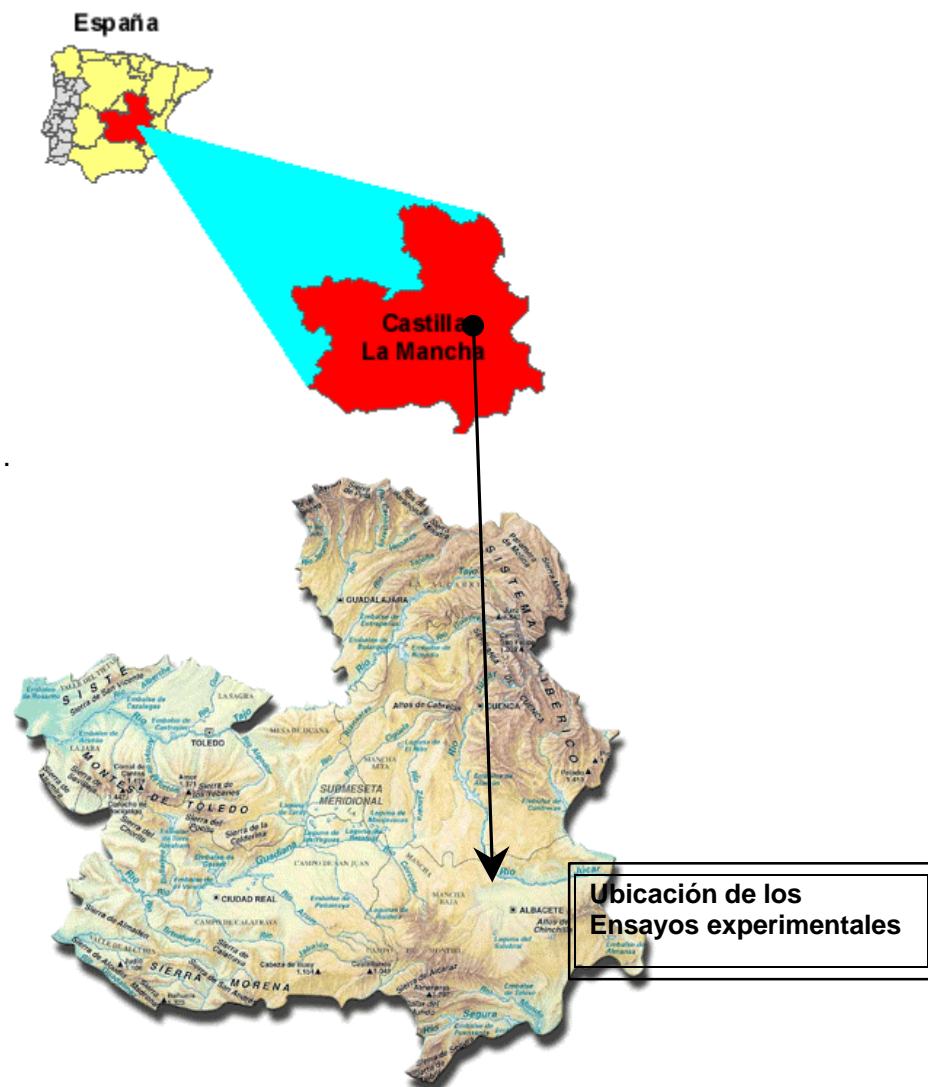
3.2 Ambiente II: Albacete, Castilla – La Mancha, España.

3.2.1 Localización y duración de los ensayos

Los ensayos se realizaron durante dos ciclos agrícolas, correspondientes a los años 1999 y 2000, en la finca "Las Tiasas", propiedad de la Excm. Diputación Provincial de Albacete, y gestionada por el Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP, S.A). La finca está ubicada en el término municipal de Albacete, con las coordenadas geográficas siguientes: latitud: 39° 02' 50" N, longitud: 02° 05' 10" O, y altitud: 699 m s.n.m.

En la Figura n° 12, se presenta la ubicación geográfica del ambiente II, y del lugar donde se llevaron a cabo las experimentaciones.

Figura 12. Ubicación geográfica del ambiente de experimentación N° II, Albacete, España.



3.2.2 Caracterización agroclimática

El clima regional se puede clasificar como mediterráneo, con marcado matiz continental, con contrastes térmicos notables, diarios y estacionales, de verano largo, seco y caluroso e invierno con muchos días de heladas, y con una distribución estacional desequilibrada de las escasas lluvias (de Juan *et al.*, 2001).

La zona en donde se llevó a cabo el ensayo se encuentra entre las isoyetas de 300 y 400 mm medios anuales. El verano destaca como la estación mas seca, representando apenas el 10% de las lluvias anuales. Por el contrario, son el otoño y la primavera las estaciones mas lluviosas, junto con el invierno. La zona está comprendida bajo la isoterma de 15 °C; el gradiente de temperatura presenta una disminución de O a E en sentido longitudinal (de Juan *et al.*, 2001).

Según la clasificación de Koepen, el clima es BSk, estepario con lluvias inferiores a 400 mm, con inviernos frios (con una temperatura media de medias menor a de 6 °C) y veranos muy calurosos (temperatura media de media mayor a 22 °C). Según Papadakis, el clima local del centro de la provincia de Albacete es Mediterráneo Templado (Carpio y Rodríguez, 1986).

3.2.2.1 Temperaturas

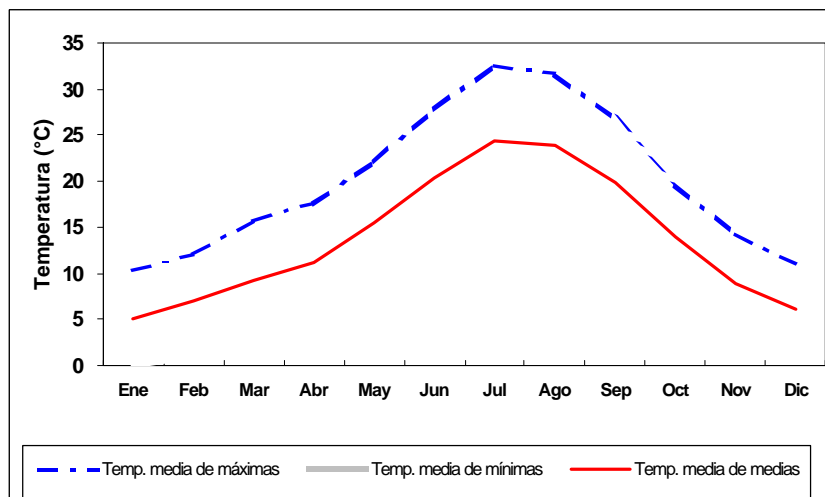
Las temperaturas máximas absolutas alcanzan los 45 °C. El mes mas cálido es julio, con temperaturas medias que llegan a los 26 °C (Elías, 1981). El valor de la temperatura media de máximas para este mes, es de 32.54°C, en base a la serie climática 1974-1997 (Fig. 13), registrada en la Estación Meteorológica Los Llanos: latitud, 38° 57' N; longitud, 01° 51' O; altitud, 680 m s.n.m.

Las temperaturas mínimas absolutas se registran en el mes de enero, siendo la temperatura media de las mínimas de - 0.03 °C. Las olas de frio asociadas a corrientes meridianas o submeridianas canalizan hacia la región masas polares o árticas que han dado lugar a valores térmicos mínimos de hasta - 22,5 °C en Albacete (de Juan *et al.*, 2001).

Como resultado del fuerte calentamiento, es muy frecuente, durante el verano, la formación de un centro de baja presión en la mitad sur de España, lo cual puede presentarse a partir de la 2ª quincena de mayo, y puede dar lugar a una ola de calor al penetrar masas de aire de origen africano que producen el asurado de los granos, si coincide con épocas críticas de su desarrollo (Elías, 1981).

Dentro de un mes dado, la amplitud térmica puede alcanzar los 30 °C, o incluso mas en los meses cálidos. Hay que destacar el hecho de que las condiciones térmicas nocturnas son favorables para ciertos cultivos de verano (maíz, judía, remolacha, etc.), ya que, por regla general, las temperaturas medias de las mínimas en los meses de verano son inferiores a 20 °C, por lo que las plantas consumen menos sustancias de reserva durante la noche mediante el proceso respiratorio, lo que hace que sea mayor la fotosíntesis neta (Elías, 1981).

Figura 13. Temperaturas medias mensuales registradas en el Observatorio Meteorológico de Los Llanos (serie climática, 1974–1997).



Temp.: temperatura

3.2.2.2 Período libre de heladas y fechas extremas de heladas

En la zona, el período libre de heladas es superior a los 180 días al año. Para Albacete, la fecha media de última helada se corresponde con la primera o segunda decena de abril (Elías, 1981).

Para el lugar donde se llevó a cabo la experimentación, las fechas extremas de la primera y la última helada, considerando temperaturas menores o iguales a 7°C, corresponden al 2 de mayo y 27 de octubre, respectivamente. Para el cultivo de maíz, la ocurrencia de heladas tempranas pueden afectar la emergencia y establecimiento del cultivo. El período medio de días libres de heladas (con temperaturas menores, o iguales a 3°C) comprende desde el 22 de noviembre al 19 de marzo, es decir, 117 días, mientras que el período libre de heladas, considerando una temperatura menor o igual a 0°C, es de 48 días, desde el 11 de noviembre hasta el 22 de enero.

3.2.2.3 Precipitaciones

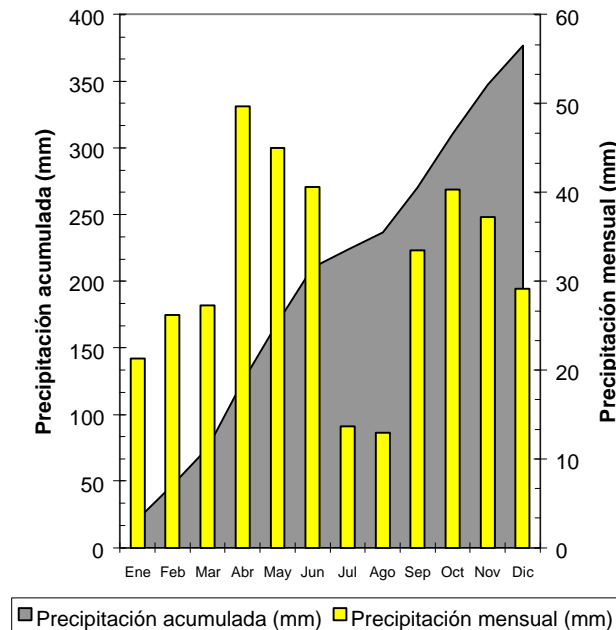
En la Figura nº 14, se presentan los valores de precipitaciones media mensual, y acumulada, para el año medio de la serie climática 1974–1997.

Los aspectos más destacables del régimen pluviométrico son la escasez y la irregularidad estacional (de Juan *et al.*, 2001). En efecto, las precipitaciones registradas son muy débiles; para la serie considerada, el valor acumulado del año medio es de 374.4 mm. Durante el ciclo de desarrollo del cultivo de maíz, el valor acumulado estacional es de 195 mm, lo que representa el 52% de la media anual. Sin embargo, la distribución es muy poco homogénea, ya que los meses de julio y agosto no superan en conjunto los 30 mm; la estación lluviosa se centra en la primavera, presentando un máximo secundario en otoño. En líneas generales, la época lluviosa se extiende de octubre a mayo.

Entre los distintos tipos de tiempo que afectan al espacio geográfico de Albacete, influyendo esencialmente en el régimen de precipitaciones, atendiendo a sus centros de acción y trayectoria de sus masas perturbadoras, se pueden resaltar tres tipos principales: el tiempo ciclónico del O, el tiempo ciclónico del SE y el tiempo

ciclónico del SO. Sin embargo, localmente, y de una forma esporádica, suelen producirse lluvias de carácter tormentoso que obedecen a mecanismos propios de formación, y en los que el relieve y otros elementos intervienen de manera directa.

Figura 14. Distribución de las lluvias mensuales en Albacete, España. Valores medios para la serie 1974–1997 y valor acumulado anual para dicha serie.

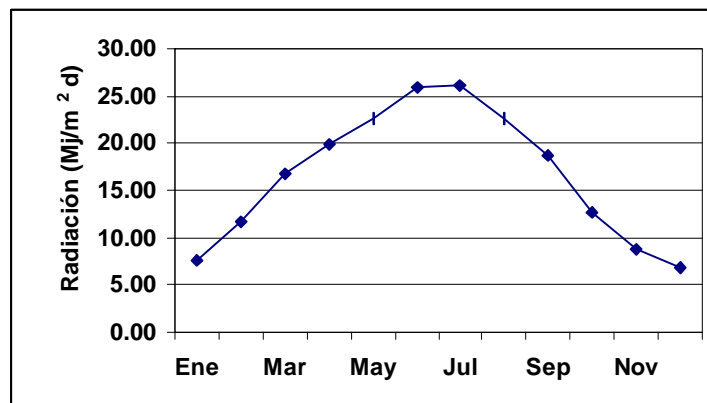


3.2.2.4 Radiación solar global

En la Figura n° 15, se presentan los valores de radiación solar global medios mensuales para el año medio de la serie climática 1974-1997.

La evolución de la radiación solar global mensual presenta los valores mínimos en los meses de enero ($7.61 \text{ Mj m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y diciembre ($6.79 \text{ Mj m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), alcanzando sus máximos en los meses de junio ($25.88 \text{ Mj m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y julio ($26.08 \text{ Mj m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Debido a la escasez de las precipitaciones en los meses de verano, la ocurrencia de días nublados no es un factor limitante de la potencialidad del cultivo de maíz, como ocurre algunos años en el ambiente I (Pergamino, Argentina).

Figura 15. Radiación solar global en Albacete, España. Año medio de la serie climática 1974–1997.

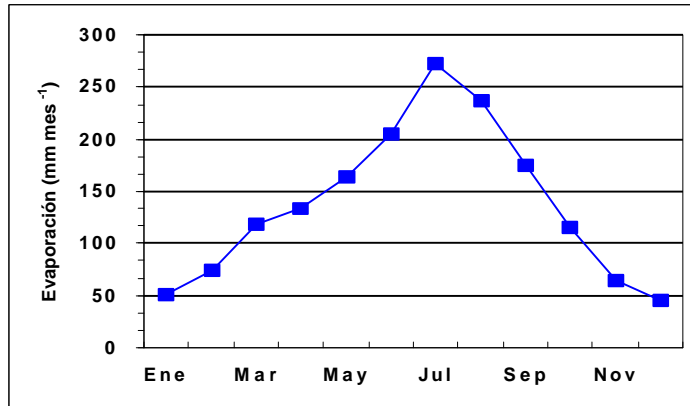


3.2.2.5 Evaporación

En la Figura nº 16, se presentan los valores mensuales de evaporación (tanque “Clase A”) para el año medio de la serie climática 1974–1997.

Durante el desarrollo del cultivo de maíz, se presenta una evolución de la evaporación con valores de 4.46 mm/d para el mes de abril, alcanzando los valores mas altos de evaporación en los meses de julio (8.81 mm/d) y agosto (7.64mm/d) siendo, por lo tanto, y de acuerdo a la distribución anual de las precipitaciones, éstos meses los que presentan mayores déficits pluviométricos.

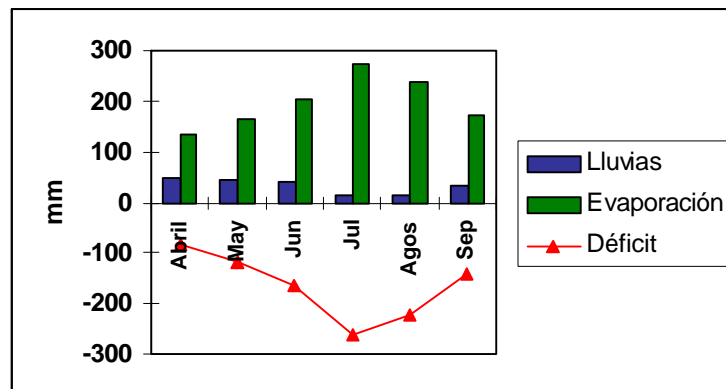
Figura 16. Evaporación (tanque “Clase A”) del año medio de la serie climática 1974-1997, Albacete, España.



3.2.2.6 Déficit pluviométrico

Según el balance climático (diferencia entre precipitaciones y evaporación), el déficit pluviométrico durante el ciclo del cultivo de maíz (abril-octubre) del año medio, para la serie climática considerada, es de 1066 mm, con extremos comprendidos entre 568 mm para el año 1986 y superiores a 1400 mm para el año 1974. En la Figura nº 17, se presenta la evolución de las lluvias, evaporación (tanque clase “A”) y déficit climático medios para la serie climática 1974-1997, para los meses en que se desarrolla el cultivo de maíz. La magnitud del déficit pluviométrico durante el ciclo de maíz para este ambiente, hace que sólo sea posible su cultivo en condiciones de riego. La magnitud del déficit crece gradualmente desde abril hasta julio, momento en que comienza a decrecer, aunque su magnitud en los meses de agosto y septiembre es importante (224 y 141 mm, respectivamente). El déficit máximo se da para el mes de julio, y es del orden de los 259 mm, mes que coincide con la floración del cultivo, etapa de máxima sensibilidad a la falta de agua.

Figura 17. Evolución de las lluvias, evaporación (tanque clase “A”), y déficit climático



medios, para la serie climática 1974-1997.

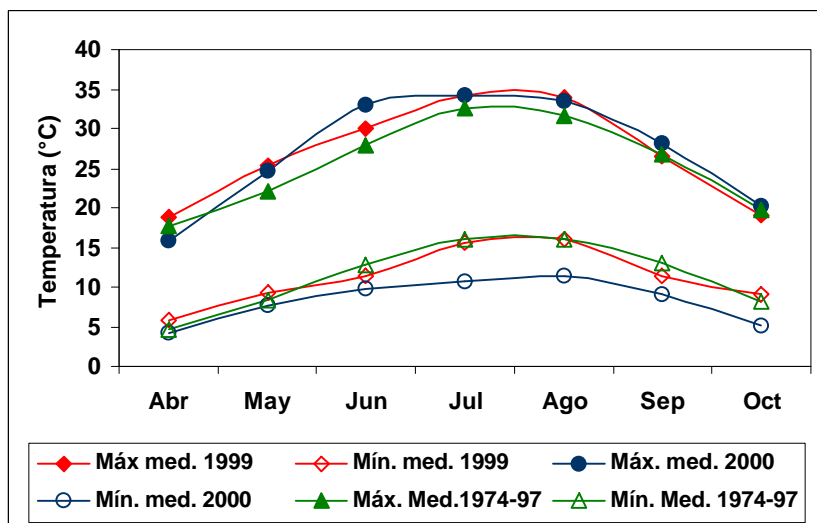
3.2.3 Condiciones climáticas de las campañas 1999 y 2000

Los datos climáticos que se presentan fueron tomados de la estación agroclimática “Anchor Station”, situada próxima al ensayo, a menos de 300 m de distancia.

3.2.3.1 Temperatura

En la Figura n° 18 se puede observar que las temperaturas máximas para los ciclos 1999 y 2000 estuvieron por encima de las de la serie de referencia, a excepción del mes de septiembre, para el año 2000. Las temperaturas mínimas para el ciclo agrícola 1999 estuvieron por debajo del valor medio de la serie 1974-97 para los meses de junio y septiembre, para el ciclo agrícola 2000 siempre fueron inferiores con respecto a dicha serie.

Figura 18. Evolución de las temperaturas máximas y mínimas mensuales durante los ciclos del cultivo de los años 1999 y 2000, comparadas con las correspondientes de la serie climática de referencia, 1974-1997.



Max. Med.= temperatura media de máximas; Min. Med.= temperatura media de mínimas

Este hecho determinó una mayor amplitud térmica durante el desarrollo del cultivo, con respecto a la media de la serie climática de referencia. Para el año 2000 la amplitud térmica fue mayor que para el año 1999. Esta situación posibilita al cultivo disponer de más días de fotosíntesis entre dos eventos fenológicos dados, ya que temperaturas diurnas relativamente elevadas permiten altas tasas fotosintéticas, mientras que bajas temperaturas nocturnas prolongan el período de crecimiento (Andrade *et al.*, 1996).

Según los valores citados como óptimos para el desarrollo del cultivo en el punto 3.1.3.1, para este ambiente, y durante los ciclos 1999 y 2000, la temperatura tampoco fue una variable limitante para la producción del cultivo, pero si más favorable debido a la amplitud térmica para el año 2000 con respecto a 1999.

3.2.3.2 Tiempo Térmico

En la Tabla n° 9 se presenta la acumulación térmica en valor promedio para todos los tratamientos, y la duración en días de las distintas etapas consideradas, para los dos ciclos de cultivo. El cálculo del Tiempo Térmico fue realizado según se expresa en el epígrafe 3.1.3.2, pero utilizando una temperatura base de crecimiento, para el híbrido utilizado en este ambiente, de 6 °C (Brisson *et al.*, 1998).

Tabla 9. Fechas, días transcurridos, y tiempo térmico acumulado en las distintas etapas del ciclo del cultivo en las campañas experimentales para los ciclos agrícolas 1999 y 2000.

a) Ciclo 1999					
Etapas del ciclo	Fecha	Duración etapa (días)	Duración acumulada (días)	Tiempo Térmico (° C)	Tiempo Térmico acumulado (° C)
Siembra – emergencia	05/05-12/05	7	7	97	97
Emergencia – V6	12/05-15/06	34	43	433	530
V6 – floración femenina	15/06-24/07	39	82	718	1248
Floración femenina – MF	24/07-18/09	56	138	986	2234
b) Ciclo 2000					
Etapas del ciclo	Fecha	Duración etapa (días)	Duración acumulada (días)	Tiempo Térmico (° C)	Tiempo Térmico acumulado (° C)
Siembra – emergencia	19/05-28/05	9	9	107	107
Emergencia – V6	28/05-30/06	33	42	557	664
V6 – floración femenina	30/06-31/07	31	73	588	1252
Floración femenina – MF	31/08- 28/09	58	131	990	2242

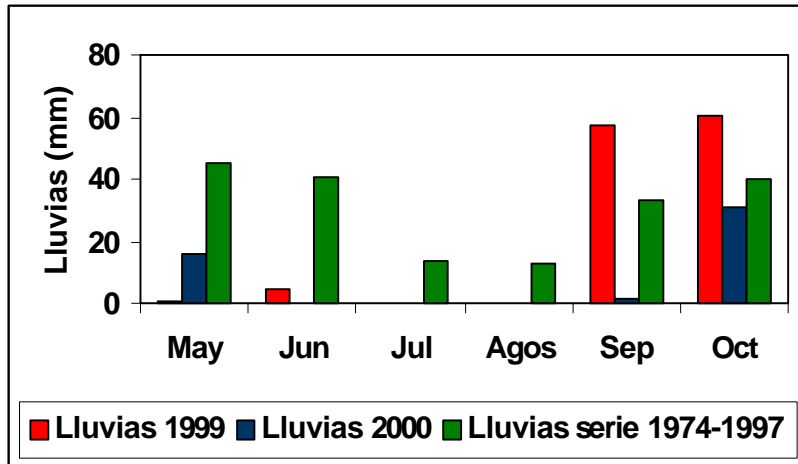
V6= sexta hoja expandida; MF= madurez fisiológica del grano

Se pudo observar que la sumatoria del tiempo térmico para alcanzar cada etapa fue mas estable para los periodos siembra-emergencia y floración femenina-MF, que para los dos restantes, aunque la variabilidad encontrada no impide la predicción de los distintos eventos fenológicos con el uso del Tiempo Térmico.

3.2.3.3 Precipitaciones

En la Figura n° 19, se presentan las precipitaciones para el ciclo 1999, 2000, y la serie climática 1974-97, durante el ciclo del cultivo de maíz. Como se observa en dicha figura, tanto el año 1999 como el 2000 se caracterizaron por el déficit pluviométrico, comparado con las precipitaciones de la serie. De cualquier forma, y como ya se expresó anteriormente, la única posibilidad de cultivo de maíz en este ambiente es en condiciones de irrigación.

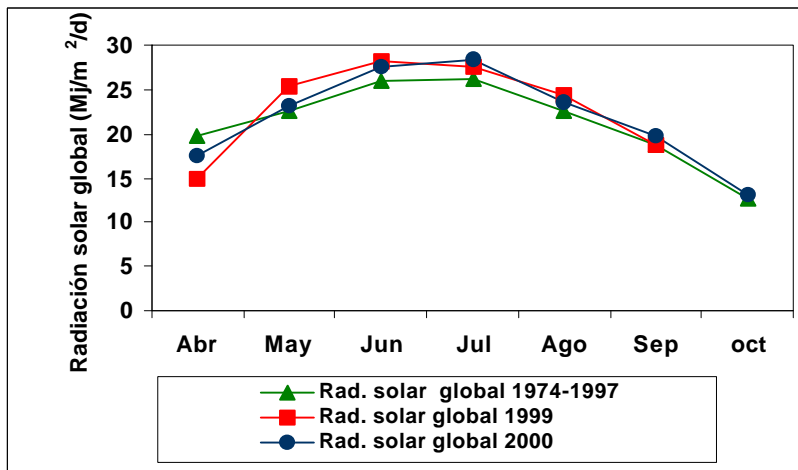
Figura 19. Precipitaciones para los ciclos agrícolas 1999 y 2000, y valor medio de la serie climática 1974-1997.



3.2.3.4 Radiación solar global

La evolución de los valores de radiación solar global fue similar para los dos años de ensayo, con respecto a los valores de la serie 1974-1997 (Fig. 20). Desde el mes de mayo hasta el mes de agosto, los valores, tanto para el año 1999 como para el año 2000, fueron superiores a los valores de la serie climática. La radiación no fue un factor limitante para la producción del cultivo de maíz para ninguno de los dos ciclos agrícolas.

Figura 20. Evolución de la radiación solar global para los dos ciclos de ensayo y para el año medio de la serie climática 1974-1997



Rad= radiación

3.2.4 Caracterización edáfica

3.2.4.1 Breve reseña geológica de la zona de ensayo

La zona de estudio queda morfológicamente encuadrada en el sector oriental de la llamada “Llanura Manchega”, que, a su vez, forma parte del amplio contexto de las cuencas internas continentales neógenas de la submeseta meridional (Sánchez *et al.*, 1994).

Los materiales que forman el suelo son por lo tanto neógenos (Plioceno Superior) depositados en ambientes lacustres someros, resultando un conjunto heterogéneo de margas y calizas con encostramientos laminares a techo (Sánchez *et al.*, 1994).

3.2.4.2 Clasificación del suelo de la parcela experimental

Según la Clasificación Taxonómica Americana (7^a aproximación), (<http://www.fao.org/docrep>, 1999), el suelo en donde se realizó la experimentación corresponde a:

ORDEN: Inceptisol
 SUBORDEN: Ochrepts
 GRAN GRUPO: Xerochrepts
 SUBGRUPO: Calcixerollic-Xerochrepts

3.2.4.3 Caracterización del perfil del suelo

Nombre del perfil: campo experimental, finca “Las Tiesas”, cobertura de riego por aspersión total enterrada.

Fecha: 24 de mayo de 1999.

Altitud: 699 m s.n.m.

Exposición: E

Forma del terreno:

- Posición fisiográfica, planicie.
- Terreno circundante, plano.

Pendiente : 0 – 2 %.

Drenaje: bien drenado.

Capa freática: no visible.

Uso: agrícola, regadío.

Vegetación: maíz grano.

Afloramientos rocosos: ninguno.

Pedregosidad:

- Abundancia: 0.1 – 3 % . Pedregoso.
- Tamaño: 0 – 7.5 cm. Gravas.

Erosión: no se observa.

Condiciones de humedad: húmedo.

Sales: libre de sales.

En la Fot. n° 4 se presenta una imagen del perfil del suelo de la parcela experimental, donde se observa la profundidad útil explorada por las raíces, de 0-0.50m.

Fotografía 4. Perfil del suelo de la parcela experimental

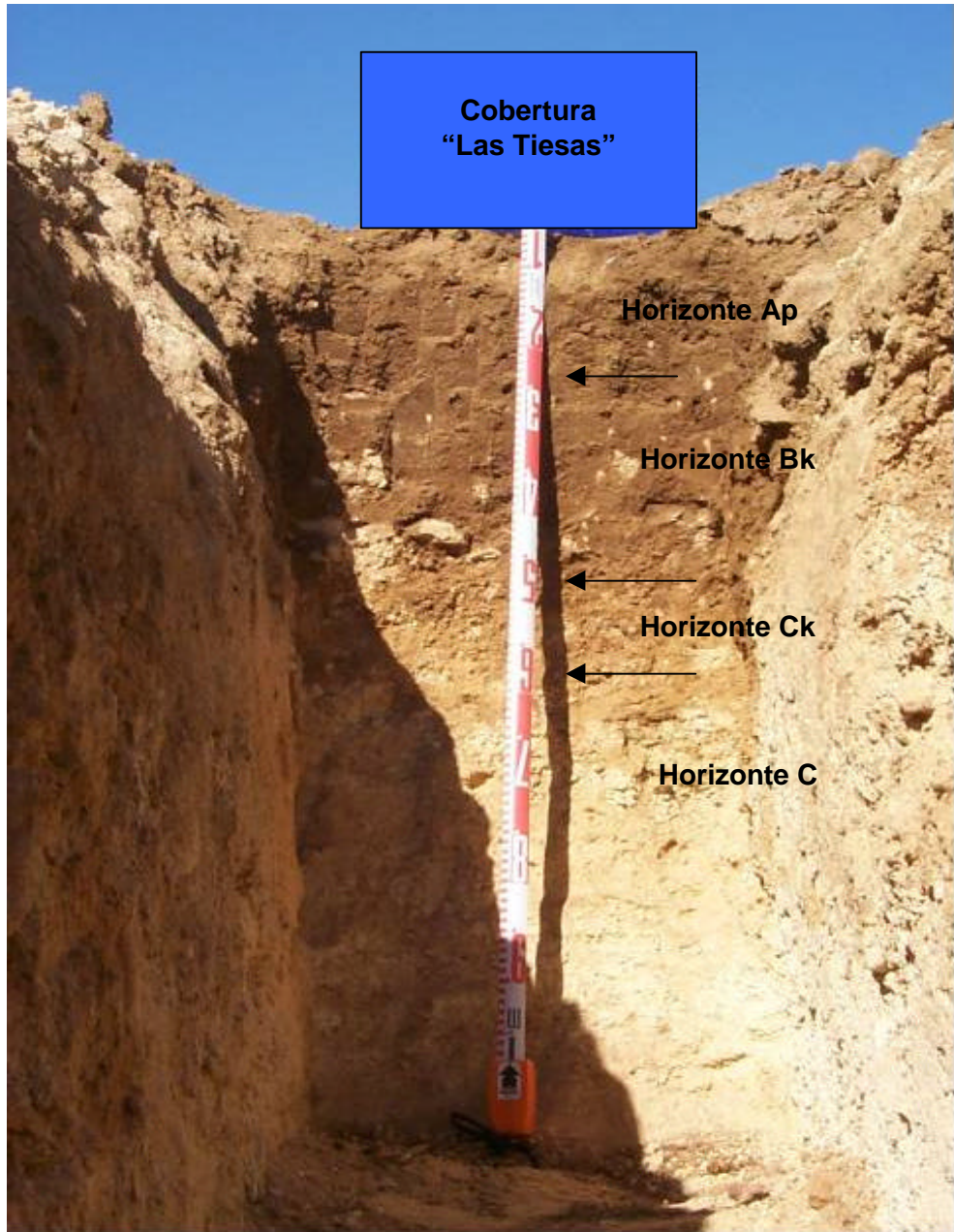


Tabla 10. Características morfológicas por horizonte.

Horizonte	Profundidad (cm)	Características morfológicas
Ap	0-25	Color 7.5 YR 4/6 en húmedo. Textura: francoarcillosa. Estructura: granular, gruesa, débil. Ligeramente adherente y plástico (mojado). Friable en húmedo. Fragmentos rocosos muy pocos, gravas; forma angular, meteorizados, naturaleza caliza. Nódulos muy pocos, pequeños, duros, irregulares de naturaleza caliza. Calcáreo. Raíces abundantes, muy finas y finas. Límite neto y plano.
Bk	26-50	Color 7.5 YR 5/6 en húmedo. Textura: francoarcillosa. Estructura: bloques subangulares, mediana, moderada. Adherente y ligeramente plástico (mojado). Firme en húmedo. Débilmente cementado. Fragmentos rocoso muy pocos, gravas; forma angular, meteorizados, naturaleza caliza. Nódulos pocos, pequeños, duros, irregulares de naturaleza caliza. Capa endurecida discontinua, laminar. Calcáreo. Raíces pocas y finas. Límite neto y plano.
Ck	51 – 60	Color 7.5 YR 8/6 en húmedo, 7.5 YR 8/4, en seco. Textura: francoarenosa. Estructura masiva. No adherente y no plástico (mojado). Friable en húmedo. Duro (seco). Débilmente cementado. Fragmentos rocoso muy pocos, gravas; forma angular, meteorizados, naturaleza caliza. Nódulos pocos, pequeños, duros, irregulares de naturaleza caliza. Calcáreo. Raíces muy pocas, finas. Límite neto y plano.
C	+ 61	Color 7.5 YR 8/4 en húmedo, 7.5 YR 8/2, en seco. Textura: francoarenosa. Estructura masiva. Adherente y ligeramente plástico (mojado). Extremadamente firme (húmedo). Muy duro (seco). No adherente y no plástico (mojado) Débilmente cementado. Fragmentos rocosos abundantes, gravas; forma angular, meteorizados, naturaleza caliza. Fuertemente calcáreo. Sin raíces.

Tabla 11. Caracterización granulométrica, físico-químico del perfil de la parcela experimental, Albacete, España.

Característica	Metodología	Horizonte			
		Ap	Bk	Ck	C
Profundidad (cm)		0-25	26-50	51-60	+ 60
Arena (%)	Pipeta Robinson	27	27	76	84
Limo (%)	Pipeta Robinson	37	36	18	10
Arcilla (%)	Pipeta Robinson	36	37	6	6
Textura	USDA	Franco-arcillosa	Franco-arcillosa	Franco-arenosa	Franco-arenosa
pH	1/2.5 H ₂ O	8.39	8.28	8.31	8.35
Conductividad eléctrica (dS/m)	1/2.5 H ₂ O, 25 °C	0.285	0.320	0.433	0.547
Materia orgánica (%)	Oxidación dicromato	1.87	1.52	1.58	0.57
Relación C/N		11	11	11	8
Nitrógeno total (%)	Kjeldahl	0.100	0.081	0.083	0.042
Fósforo asimilable (ppm)	Método Olsen	10	2	5	1
Potasio (ppm)	Extracción con acetato de amonio 1N	550	295	55	105
Carbonatos totales (%)	Calcímetro de Bernard a presión	41.18	41.89	71.89	71.59
Caliza activa (%)	Calcímetro de Bernard a presión	7.1	7.81	19.17	13.49

El pH es moderadamente básico (Tabla 11), es decir, presenta un elevado grado de saturación de la capacidad de intercambio catiónico por bases. Los valores de materia orgánica son bajos, disminuyendo a medida que profundizamos en el perfil. Este hecho puede ser explicado por el sistema de cultivo que se hace en la zona (alternativa y rotación de cultivos), con escasa incorporación de materia

orgánica y laboreo convencional. La relación C/N es normal para los suelos agrícolas, siendo menor en el horizonte C dado el bajo contenido de materia orgánica presente. En correspondencia con los valores de materia orgánica, el N total presenta un valor normal en el horizonte Ap, bajo en los horizontes Bk y Ck y muy bajo en el C. El valor de fósforo asimilable, considerando un sistema de producción de regadío extensivo en zona semiárida, es bajo para el horizonte Ap y escaso en el resto del perfil. El nivel de potasio en la capa arable es muy alto, normal en el horizonte Bk y muy bajo en los horizontes restantes. Los valores de carbonatos totales para todos los horizontes son muy altos, mientras que la caliza activa presenta valores normales en los dos primeros horizontes y muy altos en los más profundos, lo que está en correspondencia con la litología y la génesis de estos perfiles de suelos. En síntesis, para esta zona semiárida y los sistemas de cultivo dominantes en regadío, se trata de un suelo de fertilidad media-baja.

En la Tabla n° 12 se presentan los valores de las constantes hídricas de capacidad de campo (CC, 33 kPa) y punto de marchitez permanente (PMP, 1500 kPa) para los horizontes Ap y Bk, donde tiene lugar el máximo desarrollo radicular del cultivo de maíz (Epígrafe 4.2.2.2). El método utilizado ha sido la medición directa en la placa Richards (Richards, 1947 y 1948) y la estimación mediante los modelos empíricos de Gupta –Larson (Gupta-Larson *et al.*, 1979) y Rawls (Rawls *et al.*, 1982 y 1991); estos modelos empíricos determinan los porcentajes volumétricos del contenidos de humedad en CC y PMP en relación con los contenidos porcentuales de arena, limo, arcilla y materia orgánica, y la densidad aparente. Esta última propiedad física de ambos horizontes se ha medido mediante el método del cilindro (Klute, 1986).

Tabla 12. Valores de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), expresados como humedad volumétrica (HV, %), y agua útil (AU, mm) para los horizontes Ap y Bk.

Constante Hidrológica	Profundidad (cm)	Metodología		
		Placas Richards	Gupta –Larson	Rawls
CC	Ap 0-25	37.36	40.00	38.00
	Bk 26-50	41.36	39.00	38.00
PMP	Ap 0-25	26.30	29.00	23.00
	Bk 26-50	27.71	30.00	23.00
AU	Ap 0-25	27.65	27.50	37.50
	Bk 26-50	34.12	22.50	37.50
AU total		61.77	50	75

Para el cálculo de los mm de AU el modelo de Gupta –Larson *et al.* (1979) muestra una diferencia de 0.15 mm para el horizonte Ap con respecto a las placas Richards, mientras que la diferencia con el método de Rawls *et al.* (1982,1991) es superior en 9.85 mm. Para el horizonte Bk, se presenta la situación contraria; mientras que el resultado obtenido con el modelo de Gupta –Larson *et al.* (1979) es 11.62 mm menor, la diferencia con el modelo de Rawls *et al.* (1982,1991) es menor en 3.38.

En el presente trabajo, se utilizarán los resultados obtenidos con las placas Richards para los cálculos necesarios.

3.2.5 Diseño experimental

El diseño estadístico empleado fue un factorial completo al azar con tres repeticiones, manejando parcelas elementales de 81.9 m² (0.7 * 13 m). Dichas

parcelas encerraban 9 líneas, con una densidad poblacional en la siembra de 8.9 pl m⁻².

El experimento se condujo durante los ciclos agrícolas 1999 y 2000. Las fechas de siembra fueron el 05/05 y el 19/05 para los ciclos 1999 y 2000, respectivamente. En los dos ciclos agrícolas, se respetó la ubicación de los tratamientos en las mismas parcelas. El cultivar utilizado fue el híbrido simple Pregia (ciclo FAO 600). El ensayo fue conducido libre de malezas, plagas y enfermedades (Anejo 1). El sistema de riego empleado fue presurizado, en cobertura total enterrada.

Los tratamientos consistieron en diferentes niveles de fertilización nitrogenada: testigo, optimizado para la zona y convencional con dosis correspondientes, respectivamente, a 0, 175 y 300 UF N (campaña 1999) y 0, 150 y 300 UF N (campaña 2000). La dosis aplicada en el tratamiento llamado optimizado, que es un nivel intermedio entre el testigo y el utilizado por los agricultores en la zona, se definió según la metodología de balance propuesta por Sánchez *et al.* (1998). Las dosis del tratamiento llamado convencional refleja el manejo de la fertilización nitrogenada que realiza un productor en los regadíos de la zona.

En la campaña agrícola 1999, el tratamiento optimizado se fertilizó el 11/06 con 380 kg ha⁻¹ de urea (NPK, 46,0,0). En el tratamiento convencional, se fraccionaron las dosis aplicadas con nitrato amónico (NPK, 33.5,0,0) en 80, 140 y 80 UF N; las fechas de aplicación fueron el 11/06, 05/07 y 13/07, respectivamente. En el ciclo 2000, se aplicaron 326 kg ha⁻¹ de urea (NPK, 46,0,0) al tratamiento optimizado, el 05/07. Para el tratamiento convencional, las dosis y la fuente utilizada fueron las mismas que para la campaña agrícola 1999, aplicadas en las siguientes fechas: 05/07, 12/07 y 20/07. Para los dos años, se realizó una fertilización previa a la siembra a razón de 120 UF P₂O₅ (superfosfato de calcio, 18% P₂O₅) y 80 UF K₂O (sulfato potásico, 50 % K₂O). La forma de aplicación del fertilizante mineral se presenta en el Anejo n°1. En la Tabla n° 13, se recogen los tratamientos resultantes del diseño experimental.

Tabla 13. Tratamientos del diseño experimental en Albacete, Castilla- La Mancha, España.

Fertilización	Tratamiento	UF N mineral	
		1999	2000
Testigo	T	0	0
Convencional	NC	300	300
Optimizada	Nop	175	150

3.2.6 Metodología de la programación del riego

Los consumos diarios del cultivo del maíz se obtuvieron siguiendo la metodología utilizada por el Servicio de Asesoramiento de Riegos de Albacete (SARA) (Ortega *et al.*, 1997; ITAP, 1998). La programación del riego, con el objetivo de máxima producción, se desarrolló atendiendo al método descrito por Martín de Santa Olalla y de Juan (1993) y de Juan *et al.* (1999). Para la programación diaria de riego la metodología utilizada fue la un balance de agua simplificado, desarrollado de acuerdo a la metodología propuesta por Doorenbos y Pruitt (1984) y Doorenbos y Kassam (1986). La evapotranspiración de referencia, referida a una cubierta vegetal uniforme, fue calculada diariamente utilizando la fórmula semiempírica de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). Los datos climáticos fueron recogidos en una estación meteorológica automática.

Se verificó que el contenido hídrico edáfico obtenido como resultado de esta programación se mantuviera alrededor del 50 % de AU en los primeros 0.50 m, mediante el método gravimétrico, asumiendo que, por debajo de este nivel, la evapotranspiración máxima del cultivo es afectada y, consecuentemente, los rendimientos máximos (Geiser *et al.*, 1982).

El sistema de riego empleado fue una cobertura total enterrada de aspersión, en marco de 15 m X 15 m, trabajando a una presión de 3.20 kg cm⁻² y con una pluviometría de 7 mm h⁻¹. En la Tabla n° 14, se presentan las fechas, lámina aplicada, números de riegos, precipitaciones, y total de agua recibida por el cultivo de maíz, para los dos ciclos agrícolas.

Tabla 14. Lámina mensual aplicada, número de riegos y precipitación para los ciclos 1999 y 2000.

	Lámina aplicada (mm)	Número de riegos	Precipitaciones (mm)	Total mensual (mm)
Ciclo 1999				
Mayo	75.90	4	1.10	77.00
Junio	145.30	12	4.80	150.10
Julio	227.70	12	0.00	227.70
Agosto	234.60	10	0.00	234.60
Septiembre	54.99	2	57.90	112.89
Total	738.49	40	63.00	801.48
Ciclo 2000				
Mayo	28.00	2	16.20	44.20
Junio	126.00	10	0.00	126.00
Julio	231.00	14	0.00	231.00
Agosto	259.00	13	0.00	259.00
Septiembre	126.00	9	1.60	127.60
Total	770	48	17.80	787.80

3.2.6.1 Calidad de agua de riego utilizada

En la Tabla n° 15, se presenta la calidad del agua de riego utilizada.

Tabla 15. Valores medios para el año 1999 y 2000, de los distintos parámetros que caracterizan la calidad del agua de riego utilizada en el ensayo.

Parámetro	Valor
pH	7.95
C.E (uS/cm)	940
Sales totales (g/l)	1.28
Aniones (meq/l)	
Cloruros	1.30
Sulfatos	6.36
Carbonatos	Ausencia
Bicarbonatos	4.95
Nitratos (mg/l)	24.56
Cationes (meq/l)	
Sodio	1.99
Potasio	0.04
Calcio	10.99
Magnesio	4.10
Indices	
SAR	0.72
CRS	< 0
Indice de Scott	39.97
Dureza (grados franceses)	75.60
Boro (mg/l)	0.01

Del resultado del análisis de la calidad de agua para riego presentada en la Tabla n° 15, se observa que, debido al contenido de nitratos (mg l^{-1}) presentes en el agua, existirá un aporte de N por medio del riego. El contenido de N aportado con el agua de riego, de acuerdo a los volúmenes de riego utilizados, fue de 41 kg N ha^{-1} .

3.2.7 Fitotecnia del maíz

En el Anejo 1 (Tabla 1 y 2), se presentan los itinerarios técnicos del cultivo de maíz para los ciclos agrícolas 1999 y 2000.

3.2.8 Mediciones realizadas en los ciclos 1999 y 2000

3.2.8.1 Suelo

Se caracterizó el perfil edáfico de la parcela de ensayo, en cuanto a :

- Descripción de los horizontes (secuencia, espesor, características) (Epígrafe 3.2.4.3).

- Determinación de las constantes hídricas edáficas, siguiendo la metodología de las membranas de Richards (Klute, 1986).

- Determinación de la densidad aparente de cada uno de los horizontes, aplicando el método de cilindros (Klute, 1986).

Además, se determinaron las condiciones edáficas iniciales del perfil del suelo en lo que se refiere a:

- Situación hídrica inicial en cada uno de los horizontes en las parcelas elementales, hasta 0.50 m de profundidad. La metodología seguida fue la gravimétrica (Klute, 1986).

- Situación nutricional inicial, en cada uno de los horizontes y las parcelas elementales, hasta 0.50 m de profundidad, en lo que se refiere a las distintas formas de nitrógeno presentes en el suelo en cada parcela elemental y horizonte: N-NO_3^- (extracción con sulfato cálcico. Método ac. Fenoldisulfónico López Rita, 1990), N-NH_4^+ (extracción con cloruro potásico. Método azul de indofenol, López Rita, 1990), y N orgánico (Kjeldahl, López Rita, 1990).

Se determinó la evolución hídrica edáfica en cada parcela elemental y por horizonte, según la metodología descrita anteriormente en el epígrafe 3.1.6. Las fechas de medición, para el ciclo agrícola 1999, fueron las siguientes: 03/05, 24/05, 03/06, 08/06, 11/06, 18/06, 28/06, 06/07, 16/07, 21/07, 02/08, 11/08, 17/08, 27/08, 30/08, y 30/09. Para el ciclo agrícola 2000, las fechas fueron las siguientes: 19/05, 25/05, 30/05, 08/06, 13/06, 27/06, 30/06, 05/7, 14/07, 21/07, 25/07, 03/08, 09/08, 18/08, 25/08, 07/09, 14/09, 22/09, 29/09, y 20/10.

3.2.8.2 Cultivo de maíz

a) Análisis de crecimiento y desarrollo

- . Fijación en el tiempo de las distintas fases de desarrollo del ciclo agronómico del cultivo de maíz y la duración de las etapas de mayor relevancia según la metodología descrita en el Epígrafe 3.1.8.2.

- . Evolución de la materia seca aérea particionada. La metodología seguida es la descrita en el epígrafe 3.1.8.2. Las fechas de muestreo, en el ciclo agrícola 1999, fueron: 11/06, 28/06, 07/07, 21/07, 28/07, 09/08, 25/08 y 30/09 (estadios V5, V7, V9, Vt, R1, R3, R4, y R6, respectivamente). En el ciclo agrícola 2000, las fechas de

muestreo fueron: 23/06, 13/07, 27/07, 03/08, 21/08, 07/09, y 20/10 (estadios V5, V9, Vt, R1, R3, R4, y R6, respectivamente).

- . Medición del área foliar. Las mediciones de superficie foliar fueron realizadas en las mismas plantas y momentos de muestreo que para el estudio de la evolución de la materia seca. El instrumental utilizado fue un Licor 3100 Leaf Area Meter (LI-COR, Lincoln, NE, USA).

- . Elaboración de los índices de crecimiento. Su cálculo se realizó según se especifica en el epígrafe 3.1.8.2.

- . Medición de la tasa de llenado de grano. Se llevó a cabo según se especifica en el epígrafe 3.1.8.2. Se realizaron de dos a tres muestreos semanales durante la etapa de llenado de grano (Vt a R6), con lo que el total de mediciones fue de 18 y 26 para los ciclos 1999 y 2000, respectivamente. Los índices de crecimiento analizados son los que se muestran en el epígrafe 3.1.8.2.

b) Cuantificación del balance radiativo

- . El balance radiativo se realizó siguiendo la metodología expuesta en el epígrafe 3.1.8.2. Se hicieron mediciones semanales en las siguientes fechas: 11/06, 28/06, 07/07, 21/07 (etapa vegetativa), 28/07, 09/08, 25/08, y 30/09 (etapa reproductiva) durante el ciclo 1999, y el 13/06, 23/06, 30/06, 05/07, 14/07, 16/07, 18/07, 25/07 (etapa vegetativa), 01/08, 09/08, 16/08, 22/08, 01/09, 08/09, 22/09, y 20/10 (etapa reproductiva) durante el ciclo 2000. El instrumental utilizado fue SunScan (Delta-T Devices, Cambridge, UK).

La metodología empleada para el cálculo del porcentaje de PARa y de la Eficiencia en el Uso de la Radiación (EUR) se efectuó según se explica en el epígrafe 3.1.8.2.

c) Medición de la densidad volumétrica radical

Se realizó una medida puntual en la etapa del ciclo floración-comienzo de llenado de grano, en todas las parcelas elementales y los dos ciclos agrícolas, según se describe en el epígrafe 3.1.8.2. Las muestras fueron tomadas por horizonte, hasta la profundidad de 0.50 m.

3.2.8.3 Estudio de la dinámica de absorción de nitrógeno

Para el estudio de la dinámica de absorción de nitrógeno, en cada parcela elemental y en los dos años de ensayo, se siguió la metodología expuesta en el Epígrafe 3.1.8.3. Los momentos de muestreo fueron los mismos que los señalados en las mediciones de la materia seca particionada (Epígrafe 3.2.8.2).

3.2.8.4 Cuantificación del grado de estrés hídrico

Se midió la evolución del potencial xilemático según se describe en el Epígrafe 3.1.8.4, en todas las parcelas elementales. Durante el ciclo 1999, se hicieron mediciones semanales en planta durante la etapa comprendida desde la floración hasta la mitad del período de llenado efectivo de grano, a las 5:30, 11:00, 14:00 y 21:00 h; las fechas de mediciones fueron: 06/07, 20/07, 27/07, 05/08, 11/08, 17/08, 26/08 y 30/08. Durante el ciclo 2000, se hicieron mediciones semanales en la etapa referida anteriormente, a las 11:00, 14:00 y 21:00 h; las fechas de mediciones fueron: 18/07, 25/07, 01/08, 09/08, 16/08, 22/08, 01/09 y 07/09.

También, en esta última campaña, se realizaron dos mediciones a las 5:30, los días 09/08 y 22/08. El equipo utilizado fue una cámara de presión Scholander, modelo 3005 (Santa Bárbara, CA, USA).

. Fue medida la temperatura del canopeo mediante la termometría infrarroja, según se describe en el Epígrafe 3.1.8.4. El instrumental utilizado fue Thermopoint 80, TMT-80, Agema Infrared Systems, Danderyd, Suecia. Este parámetro se midió en todas parcelas elementales y en las mismas fechas en las que se determinó el potencial xilemático, a las 11:00 y 14:00 hs. Con las mediciones se realizó el cálculo del índice SDD, según se describe en el epígrafe 3.1.8.4.

. Medición indirecta del frente del avance radical a partir de las mediciones de la dinámica del perfil hídrico en distintos momentos del ciclo del cultivo. Con este objetivo, se efectuaron mediciones de la humedad del suelo en todas las parcelas elementales, y en cada uno de los horizontes, por el método gravimétrico. Las fechas de medición fueron las ya enumeradas en el epígrafe 3.2.8.1.

3.2.8.5 Medición del rendimiento en grano y sus componentes. Cálculo del Índice de Cosecha (HI).

. La metodología seguida se describe en el epígrafe 3.1.8.2. La superficie de recolección fue de 18.25 m^{-2} , en cada parcela elemental, en las campañas agrícolas 1999 y 2000. En la Fot. n° 5 se presenta el estado del cultivo en el momento de la recolección, para los tres niveles nitrogenados.

. Cálculo del IC. Se utilizó la misma metodología que para el ambiente I (Epígrafe 3.1.8.5).

Fotografía 5. Estado del cultivo en el momento de la recolección.



3.2.8.6 Tratamiento estadístico de los datos

Al igual que para el ambiente I, la mayor parte de los resultados fueron tratados con análisis de varianza de un factor, fecha por fecha, mediante la utilización de programa estadístico SPSS V 10.0. Los test de comparación de medias fueron utilizados para constatar, fundamentalmente, las tendencias observadas. El test utilizado fue el de Tuckey (Tuckey, 1949), el nivel de riesgo elegido en α , fue fijado en todos los casos en 5 %.

Un alto número de resultado fue analizado por técnicas de regresión lineal y no lineal (Borowiak, 1989). La lógica que permite los ajustes no lineares utilizó el algoritmo de iteración de Marquarth, el que es considerado como uno de los mas robustos en este tipo de cálculos (Tomassone *et al.*, 1983). La selección del modelo matemático se realizó teniendo en cuenta la parte de la varianza que explicaba el

modelo (R^2), y la significación agronómica del mismo, privilegiando siempre aquellos modelos con menor número de parámetros, de manera tal de reducir el intervalo de confianza en las estimaciones.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1.1. Desarrollo, crecimiento y rendimiento: ambiente I

4.1.1.1 Desarrollo del cultivo de maíz en el ambiente I

La temperatura tiene una gran influencia en todas las tasas de los procesos biológicos y afecta todos los aspectos relacionados con el crecimiento y desarrollo. Se define desarrollo como un progreso ordenado hacia estados definidos desde la germinación hasta la muerte.

Para el cultivo de maíz, un nivel inadecuado de nitrógeno resulta en una disminución en el crecimiento del área foliar; sin embargo, el número de hojas es escasamente afectado (Lemcoff y Loomis, 1986; Muchow, 1988). Los resultados de este trabajo concuerdan con los obtenidos por otros investigadores (Girardin *et al.*, 1987; Uhart y Andrade, 1995), ya que no se encontraron diferencias en el número final de hojas para los diferentes niveles de nitrógeno aplicados (datos no presentados). Por otra parte, si bien el número de hojas a desplegar está asociado a un requerimiento térmico expresado por el filocrono, y un mayor número de hojas implica una mayor suma térmica para cambiar el estado del ápice de vegetativo a reproductivo, esta característica está fuertemente asociada al genotipo y, en nuestro caso, el híbrido utilizado fue el mismo, con lo cual no aportó como variable para modificar la duración del período emergencia a floración femenina.

En la Tabla n°16, se presenta la duración y el Tiempo Térmico medios para todos los tratamientos, ya que las diferencias entre tratamientos en este sentido fueron irrelevantes. Ni la presencia de un estrés hídrico, ni de los diferentes niveles de N, tuvieron influencia en la fenología del cultivo, ya que la única diferencia observada fue en el momento de ocurrencia de la floración para el tratamiento de secano y los niveles de fertilización nitrogenada Fn y Fi, siendo la fecha de ocurrencia de la antesis y la aparición de estigmas el 28/12 y el 30/12/1999 respectivamente, para Fi, mientras que para el tratamiento Fn tanto la antesis como la aparición de estigmas ocurrieron el 30/12/1999. Esta diferencia fue de escasa importancia; expresada en Tiempo Térmico, de 32.9 °C.

En función del genotipo, el requerimiento térmico del período floración-madurez varía entre 600 y 900 ° C acumulados sobre una base de 8 °C (Kiniry y Bonhomme, 1991). En la Tabla n°16 se puede observar que la duración de la etapa floración femenina-MF (R6) fue de 799°C. Otegui *et al.* (1995b), encuentran una duración de entre 778 y 977 °C, dependiendo del híbrido y la fecha de siembra, para el norte de la provincia de Buenos Aires; mientras que Cirilo (1994) encuentra una sumatoria térmica de entre 828 y 927 °C para cumplir esta etapa en el sudeste de la provincia de Buenos Aires. Los datos muestran estabilidad en esta zona para este criterio, por lo que, en este ambiente, se justifica el uso de la acumulación de unidades térmicas para predecir la madurez fisiológica.

Finalmente, la etapa de llenado de granos dependerá del peso final que pueda alcanzar el genotipo y de la tasa de llenado, en función de la temperatura. El Tiempo Térmico durante la etapa "lag", etapa comprendida desde R1 al comienzo de la etapa de llenado efectivo de grano, fue de 243 °C. Kiniry (1991) encontró una sumatoria térmica de 170 °C para esta etapa, sin diferencia genotípicas importantes. La fase lineal de la etapa de llenado de granos está altamente controlada por la temperatura (Jones *et al.*, 1981; Tollenaar y Bruulsema, 1988). Para este ambiente, la duración de la etapa de llenado de grano fue de 557 °C, para los tratamientos T1, T2, y T3, y de 512 y 534°C para T5 y T8, respectivamente. Los diferentes niveles nitrogenados para los tratamientos conducidos con el criterio Prop (T1, T2, y T3) no afectaron la duración de esta etapa, mientras que la variación hídrica si disminuyó la

duración en 45 y 23°C para los niveles Prpc y Sec con respecto a Prop. Ketring *et al.* (1989) encontraron que la tasa de desarrollo fue modificada por la disponibilidad hídrica en el cultivo de cacahuate, por lo que a pesar de que el desarrollo en este cultivo puede ser descrito por el Tiempo Térmico, es importante la inclusión en los modelos de simulación de cultivos de otras variables ambientales, a pesar de ser la temperatura la principal conductora del desarrollo. Existió una diferencia de 35 °C para alcanzar el estado de R6, entre los tratamientos de secano y los de riego. Al ser la magnitud de estas diferencias pequeña, se puede considerar estable al Tiempo Térmico y útil para predecir la fenología del cultivo en este ambiente.

Tabla 16. Duración en días y Tiempo Térmico promedio de las diferentes etapas fenológicas.

Etapa del ciclo	Fecha	Duración de la etapa (días)	Duración acumulada (días)	Tiempo Térmico (° C)	Tiempo Térmico acumulado (° C)
Siembra – emergencia	07-16/10	9	9	80	80
Emergencia – V6	16/10-18/11	33	42	372	452
V6 – floración femenina	18/11-28/12	39	82	566	1018
Floración femenina - MF	28/12/99-15/02/00	51	133	799	1817

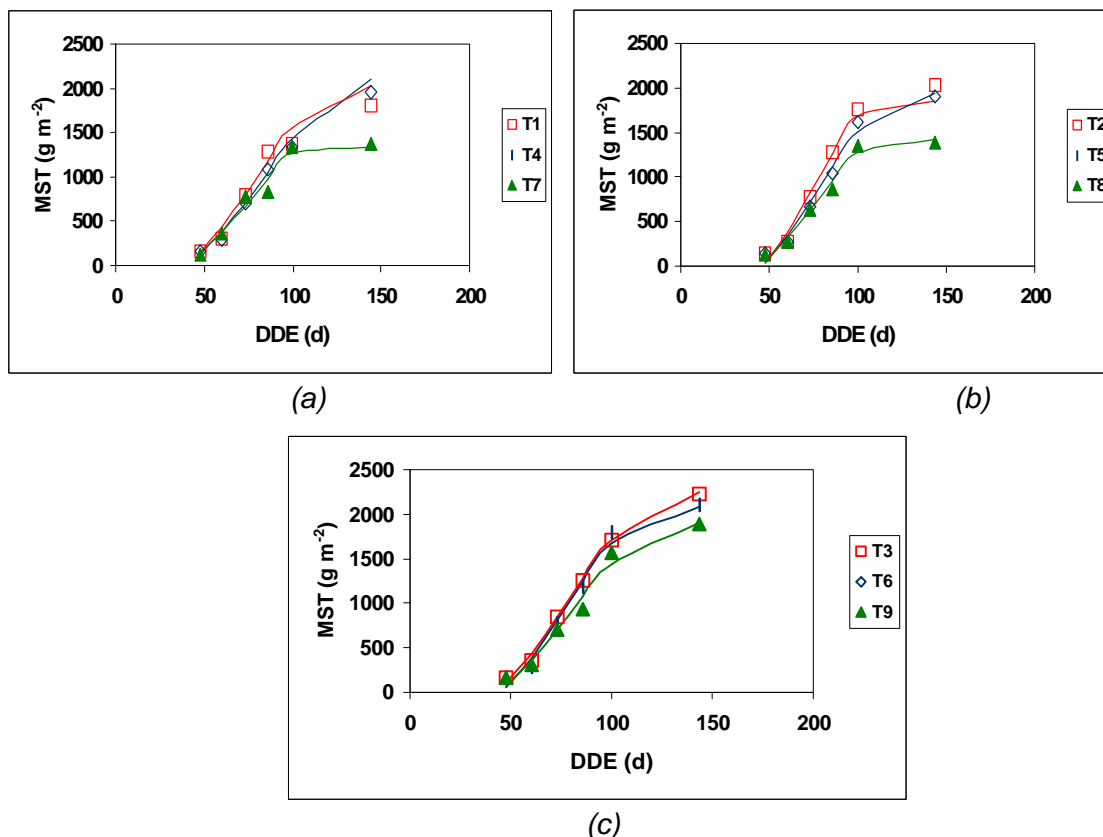
V6= sexta hoja expandida; MF= madurez fisiológica del grano

4.1.1.2 Producción de biomasa aérea y velocidad de crecimiento

El análisis de la acumulación de la materia seca total (MST), comparando niveles hídricos para un mismo nivel nitrogenado y niveles nitrogenados para un mismo nivel hídrico, mostró una mayor respuesta en la producción de MST debida a los diferentes niveles hídricos aplicados que frente a los diferentes niveles de fertilización nitrogenada; por esta razón, se presenta en la Figura n° 21 la comparación entre niveles hídricos, para la dinámica de acumulación de materia seca, en función de los días de crecimiento desde la emergencia (en base 8).

Hasta la floración, los diferentes tratamientos acumularon entre el 36 y el 45 % de la MST, habiéndose medido los mayores porcentajes de acumulación para los tratamientos que estuvieron sometidos a una deficiencia hídrica. Dentro de estos últimos, los mayores porcentajes de acumulación de MST se observaron para los niveles inferiores de nitrógeno, lo que pone de manifiesto que la incidencia de estas deficiencias, considerando los menores valores de MST final obtenidos en estos tratamientos (T7, T8, y T9), aumenta a medida que se desarrolla el ciclo del cultivo, ya que, todavía falta por concretar una importante ganancia de peso, que tiene lugar a partir de este momento y hasta la madurez fisiológica de los granos (Andrade *et al.*, 1996).

Figura 21. Evolución de la materia seca aérea total para cada nivel de fertilización nitrogenada: (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa , agrupados por estrategias de programación de riego: Prop, Prpc, y Sec. Los símbolos representan los valores calculados y las líneas las ecuaciones de ajuste.



DDE, días desde emergencia; MST= materia seca total. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

En la Tabla n° 17 se presentan las ecuaciones de ajuste para la evolución de la MST en todos los tratamientos. Los mayores coeficientes de regresión se obtuvieron con la relación de la evolución de MST en función de DDE, frente al Tiempo Térmico.

Tabla 17. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R^2) de los modelos matemáticos (polinomios de tercer grado) que representan la evolución, a lo largo del ciclo agronómico del maíz, de la materia seca aérea total.

Tratamiento	a (x) ³	b (x) ²	c (x)	d	Nivel de significación	R^2
T1	-0.00289	0.6709	-22.574	-1.9392	*	0.98
T2	-0.00419	0.9347	-34.706	8.5981	**	0.98
T3	-0.00280	0.7021	-24.808	2.0406	**	0.99
T4	-0.00268	0.6779	-29.432	279.08	**	0.99
T5	-0.00329	0.7666	-28.614	10.958	**	0.99
T6	-0.00373	0.8583	-31.866	11.118	**	0.98
T7	-0.00273	0.5951	-19.623	1.1757	*	0.98
T8	-0.00299	0.6669	-24.088	7.0204	**	0.98
T9	-0.00284	0.6670	-24.001	9.5495	*	0.98

*: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$; R^2 = coeficiente de determinación; a,b,c,d= coeficientes de los modelos de ajuste. Estas ecuaciones polinómicas son válidas desde 48 DDE hasta el 144 DDE. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

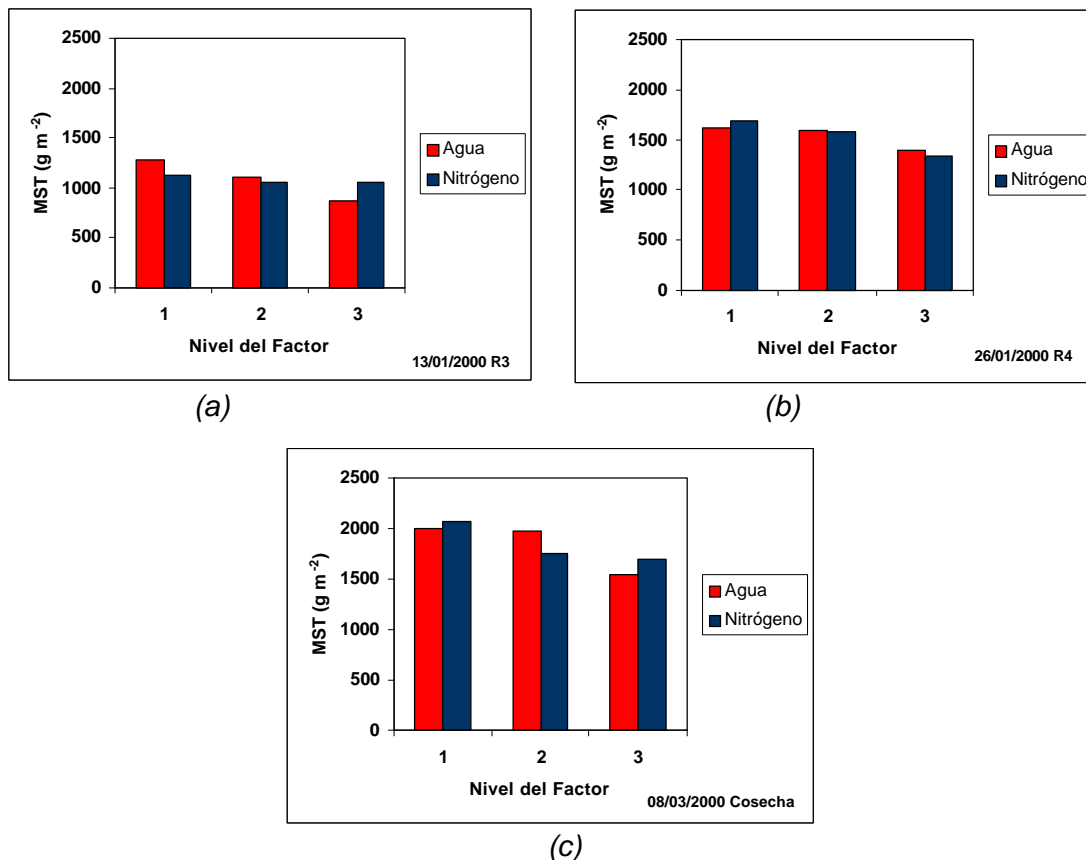
Todos los tratamientos comenzaron a mostrar diferencias en la producción de MST a partir del día 86 desde emergencia (86 DE). Para el día 86 DE (R3), las interacciones no fueron estadísticamente significativas entre tratamientos (Tabla 1, Anejo 2; Fig. 22a); sin embargo, sí las hubo para el factor agua entre el tratamiento Sec y los dos restantes: Prop y Prpc (Fig. 22a), mientras que, para el factor nitrógeno tampoco existieron diferencias significativas entre tratamientos. Reddy *et al.* (1991) encuentran que una deficiencia de N posterior a Vt redujo la acumulación de MS tanto hojas y tallos, como en órganos reproductivos.

Para el día 100 DE (R4) (Fig. 22b), las diferencias fueron altamente significativas para el factor nitrógeno, entre los niveles Fn y los dos restantes: Fi y Fa (Fig. 22b) y significativas para el factor agua, sin que se manifestara el efecto de la interacción agua x nitrógeno (Tabla 1, Anejo 2). Entre el día 83 y 100 DDE, las precipitaciones fueron de 69.3mm, luego de un período de sequía, en el que llovieron 22.5 y 76 mm en los meses de noviembre y diciembre, respectivamente. Este hecho determinó una recuperación del consumo hídrico en los tratamientos de secano, y el factor nitrógeno pasó a ser mas limitante para este período. Uhart y Andrade (1995) encuentran una disminución en la MST debida a una deficiencia nitrogenada en un cultivo de maíz sin limitaciones hídricas. Esta reducción fue de 59 y 68 %, 15 días post-floración y a cosecha, respectivamente. Girardin *et al.* (1987) encuentran una reducción del 25 % en la producción de MST debida a una deficiencia nitrogenada. Pandey *et al.* (2000) en un estudio sobre el efecto de la interacción entre el riego deficitario y la dosis de N aplicado en el cultivo de maíz cultivado en un ambiente árido, en la acumulación de MST, encuentran que, la respuesta a la dosis de N aplicada difiere conjuntamente con el nivel de riego aplicado, y que, la absorción hídrica está mas influenciada por la disponibilidad de agua que por la de N. El riego deficitario en este trabajo afectó la producción de MST en todos los niveles de fertilización nitrogenada; y produjo pérdidas de mayor importancia en la producción de la MST, cuando coincidió con las etapas reproductivas del cultivo.

En el día 144 DE (cosecha) (Fig. 22c), la producción de MST no presentó diferencias estadísticamente significativas para los niveles hídricos o nitrogenados, ni para su interacción (Tabla 1, Anejo 2). Para esta última fecha de muestreo, a pesar de la que diferencia en la producción de MST debido al factor agua no fue estadísticamente significativa, entre el nivel 1 y 3, la diferencia fue de 4654 kg ha⁻¹, valor que fue similar al de la diferencia mínima significativa: 4713.2 kg ha⁻¹. En este caso, que estadísticamente no hubo diferencias significativas, la respuesta al factor agua fue relevante, si se analizan tendencias a nivel agronómico.

En general, y para las tres últimas fechas de muestreo, cuando se incrementó la producción de MST debido a uno de los factores, agua o nitrógeno, también, existió un incremento debido al incremento en el otro factor, lo que mostró la falta de interacción entre los factores agua x nitrógeno (Fig. 22).

Figura 22. Valores medios de producción de materia seca total (MST) en función de los niveles de agua y nitrógeno para las tres últimas fechas de muestreo. Factor agua: nivel 1=Prop, nivel 2= Prpc; nivel 3= Sec. Factor N: nivel 1= Fa; nivel 2= Fi; nivel 3= Fn.



En los tratamientos conducidos con el criterio Prop de programación de riego, la aplicación de una dosis superior a Fi no incrementó la producción de MST, pero si existió un incremento en la producción de MST con respecto a Fn. La dosis Fn tuvo una producción menor de MST, en el orden de 11 y 19 % con respecto a Fi y Fa, respectivamente. A partir del día 100 desde emergencia, se puede ver que existen diferencias entre las tasas de acumulación de MST en los tratamientos conducidos en secano, siendo mayores cuando mayor es el nivel de nitrógeno (T9).

Para el tratamiento conducido con la programación de riego Prpc, no se detectaron diferencias en la producción de MST entre los niveles Fn y Fi, pero si entre éstos y el nivel Fa. La producción de MST el día 144 DE fue, para Fa, un 7 y 10 % mayor, con respecto a Fn y Fi, respectivamente. Las diferencias, sin embargo, no fueron estadísticamente significativas. Las diferencias mas marcadas entre los niveles hídricos se midieron para Fi (Tabla 1, Anejo 2).

En los tratamientos conducidos en secano, se encontró la misma tendencia que para el nivel Prpc, ya que no se manifestaron diferencias en la producción de MST entre las dosis Fn y Fi; sin embargo, si hubo respuesta a la dosis Fa. Esta diferencia en el estado R6, fue del orden del 7 y 10 % para Fn y Fi, respectivamente, con respecto a Fa (Tabla 1, Anejo 2).

Para un mismo nivel de nitrógeno, Fn, el tratamiento Sec tuvo un rendimiento final, en materia seca, 24 y 30 % menor que Prop y Prpc, respectivamente (Fig. 21). Cuando se analiza el nivel Fi, el tratamiento de secano tuvo un rendimiento en MST,

32 y 27 % menor que Prop y Prpc, respectivamente. Para el nivel Fa, las diferencias fueron menores, del orden de 16 y 11 %, con respecto a Prop y Prpc, respectivamente. El patrón de crecimiento encontrado en el presente trabajo es consistente con los descriptos por numerosos autores (Duncan, 1975; Barloy, 1984; Andrade *et al.*, 1996).

Ya que las diferencias encontradas debido a los niveles hídricos son de mayor magnitud que aquellas encontradas en la comparación entre niveles nitrogenados, se puede decir que, para este ambiente, la variable hídrica resultó ser más limitante, en la producción de MST, que la nutrición nitrogenada.

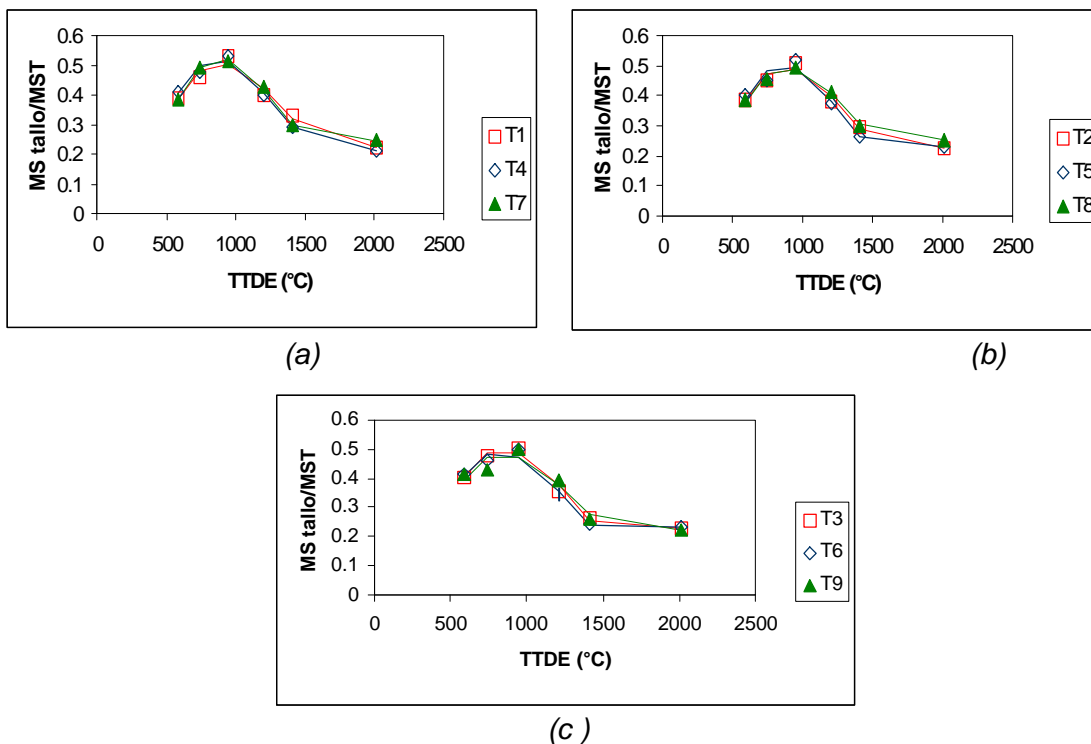
4.1.1.3 Participación porcentual de los diferentes órganos aéreos en la materia seca total

En la Fig. n° 23 se presenta la evolución de la relación MStallo/MST para todos los tratamientos, para los diferentes niveles hídricos. Se puede observar que esta relación es bastante conservadora para los niveles hídricos analizados. Ni el efecto de los diferentes niveles nitrogenados, ni hídricos modificaron esta relación, a pesar de que se logró un rango amplio para ambos factores. Los valores medidos fueron similares, al igual que la evolución seguida por esta relación. La repartición de estructuras de reservas en la planta no se realiza según una proporción fija, depende de las necesidades en carbohidratos estructurales del tallo, que es un carácter de fuerte componente genético, poco modificado por la disponibilidad de asimilados (Ruget, 1991).

La evolución de la relación MStallo/MST muestra un incremento hasta la floración, y luego comienza una disminución de la participación porcentual del tallo en la MST. La partición de carbono en las plantas está directamente relacionada con su oferta y demanda, a través del desarrollo del cultivo. Existen controles indirectos, hormonales y nutricionales, entre los diferentes órganos en crecimiento (Wardlarc, 1990). A partir de la diferenciación del ápice de crecimiento de la planta de maíz, del estado vegetativo al reproductivo, el crecimiento del tallo depende de la producción de giberelinas por parte de la espiga en desarrollo, y ambos órganos competirán por la provisión de fotoasimilados si éstos son limitantes (Gifford y Thorne, 1984).

En un estudio sobre la contribución de los carbohidratos solubles del tallo al rendimiento en grano del cultivo de maíz, cultivado bajo diferentes densidades de siembra, Daynar *et al.* (1969) encuentran que, la acumulación de carbohidratos en el tallo inmediatamente después de la floración femenina fue debida principalmente a una capacidad limitada de la espiga como destino. Posteriormente, la disminución en las reservas del tallo fue el resultado tanto de aumento en la capacidad de la espiga como destino, o posiblemente una reducción en la capacidad fotosintética del cultivo. Es de esperar que, las variedades de maíz de bajo potencial de rendimiento, no muestren removilización de carbohidratos solubles a partir del tallo.

Figura 23. Evolución del peso del tallo en relación a la MST (MS tallo/MST) en función de los grados días desde la emergencia (TTDE, °C), para todos los tratamientos: (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa. Los símbolos representan los valores calculados y las líneas, las ecuaciones de ajuste.



MStallo= materia seca tallo; MST= materia seca total; T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

En la Tabla n° 18, se presentan las ecuaciones de ajustes para la evolución de la relación Mstallo/MST en función del tiempo térmico desde emergencia (°C). Los ajustes logrados, con ecuaciones polinómicas de tercer grado, alcanzaron altos niveles de significancia y coeficientes de determinación, por lo que es una relación que está fuertemente influenciada por la temperatura y, probablemente, sea modificada por un estrés hídrico o nitrogenado según la magnitud del mismo. En el presente trabajo, ni la magnitud del estrés hídrico, ni nitrogenado, llegaron a modificar esta relación.

Tabla 18. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R^2) de los polinomios de tercer grado que representan la evolución de la participación porcentual de la materia seca del tallo en la total.

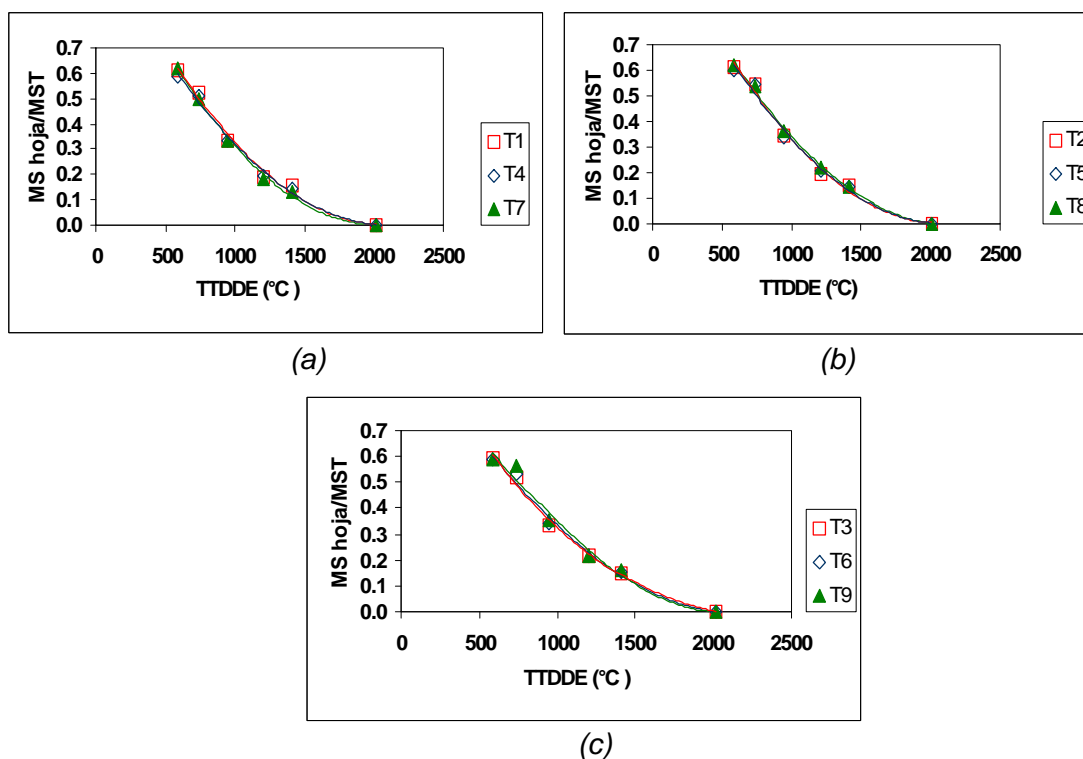
Tratamiento	a (x) ³	b (x) ²	c (x)	d	Nivel de significación	R ²
T1	7.85392 E-10	-3.20816 E-06	0.00385	-0.93053	*	0.93
T2	8.34239 E-10	-3.34177 E-06	0.00393	-0.94548	*	0.94
T3	9.47979 E-10	-3.70630 E-06	0.00423	-0.99591	*	0.97
T4	8.95343 E-10	-3.58744 E-06	0.00420	-1.00608	*	0.96
T5	9.58237 E-10	-3.77346 E-06	0.00436	-1.06473	*	0.92
T6	9.14633 E-10	-3.53482 E-06	0.00397	-0.89132	*	0.95
T7	9.79276 E-10	-3.91858 E -06	0.00463	-1.18364	**	0.99
T8	8.13269 E-10	-3.26319 E -06	0.00386	-0.93039	*	0.98
T9	7.80759 E -10	-3.09070 E -06	0.00356	-0.78927	*	0.87

*: p 0.05, **: p 0.01; a,b,c,d= coeficientes de los modelos de ajuste. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

Al igual que ocurre para la relación Mstallo/MST, la relación MShoja/MST (Fig. 24) aparece como muy estable ante los diferentes niveles de agua y nitrógeno impuestos, ya que no se observan diferencias en su evolución ni en la magnitud de los valores medidos dentro de cada nivel hídrico ni nitrogenado.

La evolución de esta relación muestra un decrecimiento constante a lo largo del ciclo del cultivo de maíz. En los cereales, existe un corto período luego de la germinación, cuando las raíces constituyen el destino más importante para las reservas de la semilla. Luego de este momento, esa dominancia se pierde cuando la parte aérea es expuesta a la radiación solar, y las hojas se transforman en la principal fuente de carbono mediante la fotosíntesis (Wardlac, 1990). Una vez que comienza el crecimiento exponencial del tallo, la relación MShoja/MST disminuye progresivamente.

Figura 24. Evolución del peso de las hojas fotosintetizantes en relación a la MST (MS hoja/MST) en función de los grados-días (TTDE) desde la emergencia para todos los tratamientos: (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa. Los símbolos representan los valores calculados y la líneas las ecuaciones de ajuste.



MS hoja= materia seca hoja fotosintetizadora; MST= materia seca total; TTDE= Tiempo Térmico desde emergencia. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

La relación MShoja/MST presenta un buen ajuste con ecuaciones polinómicas de tercer grado, en función del Tiempo Térmico (°C) desde emergencia, con altos coeficientes de determinación y, para todos los niveles, significativa (Tabla 19). Al igual que para la relación Mstallo/MST, la temperatura resulta ser el factor más importante que gobierna esta relación, no afectándola, en este caso, ni el estrés hídrico ni nitrogenado, lo que, probablemente, está indicando que es una relación con un fuerte componente genético.

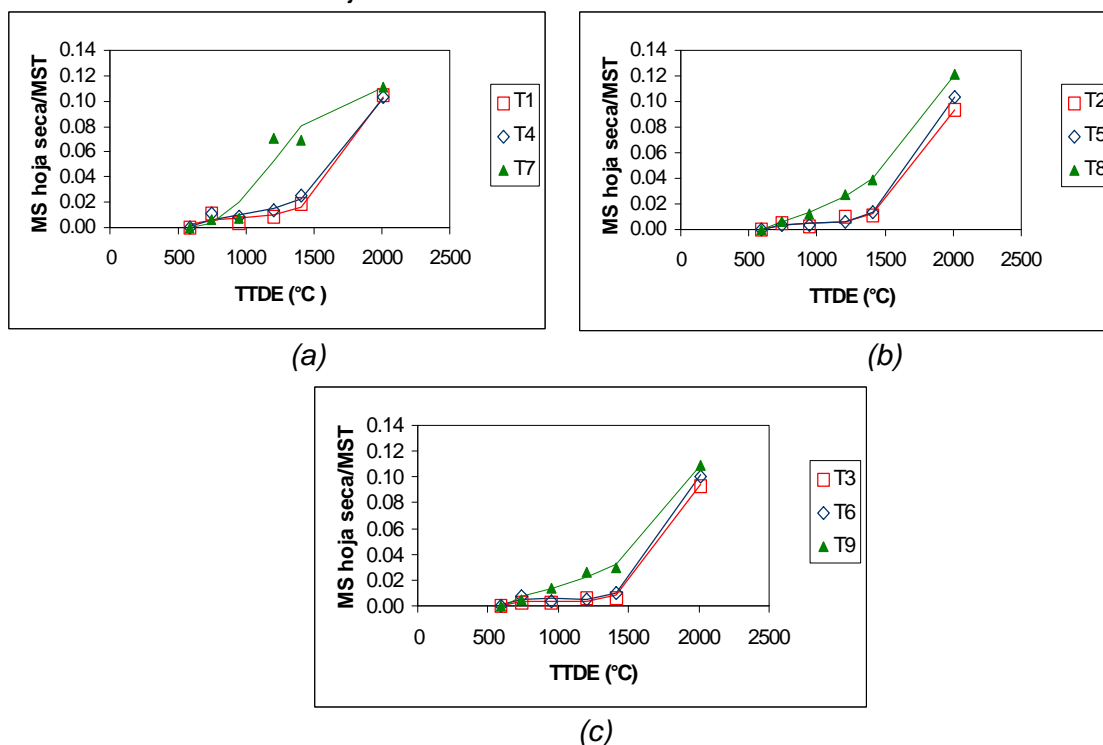
Tabla 19. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R^2) de los modelos matemáticos (polinomios de tercer grado) que representan la evolución de la participación porcentual de la materia seca de las hojas fotosintetizadoras en la total.

Tratamiento	a (x^3)	b (x^2)	c (x)	d	Nivel de significación	R^2
T1	-1.20639 E-10	7.44557 E-07	-0.001703	1.39584	*	0.98
T2	-6.53721 E-11	5.38297 E-07	-0.00148	1.33139	*	0.97
T3	-6.63414 E-11	5.01421 E-07	-0.00136	1.25005	**	0.99
T4	-5.28248 E-11	4.61109 E-07	-0.00133	1.23351	**	0.98
T5	1.44853 E-11	2.13198 E-07	-0.00107	1.17203	*	0.97
T6	9.70052 E-12	1.94363 E-07	-0.00098	1.11151	*	0.98
T7	-1.23436 E-10	7.81894 E -07	-0.00178	1.42645	**	0.99
T8	4.86894 E-11	6.99730 E -08	-0.00089	1.11940	**	0.99
T9	8.38159 E -11	-9.77267 E -06	-0.00064	1.00593	*	0.95

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$; a,b,c,d= coeficientes de los modelos de ajuste. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

La relación porcentual hoja fotosintetizadora/MST fue similar para todos los tratamientos. Sin embargo, para hoja seca se observaron comportamientos diferentes en esta evolución entre los tratamientos de riego y seco (Fig. 25).

Figura 25. Evolución del peso de las hojas secas en relación a la MST (MS hoja seca/ MST) en función de los grados días acumulados desde la emergencia (TTDE, °C). (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa. Los símbolos representan los valores calculados y las líneas las ecuaciones de ajuste.



MS hoja seca= materia seca hoja seca; MST= materia seca total. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

Entre los diferentes órganos analizados, la relación MS hoja seca/ MST fue la que mayores diferencias mostró. Las diversas situaciones hídricas determinaron diferencias en las relaciones porcentuales entre el peso seco del órgano analizado

en relación a la MST para hoja seca y raíz (Epígrafe 4.1.2.2). De las relaciones analizadas hasta el momento, la MShoja seca/MST es la primera entre todas las estudiadas, que presenta un comportamiento diferencial en función de los niveles hídricos (Fig. 25). Para los tres niveles hídricos, y a partir de la floración, se manifiestan las diferencias en este cociente. Dentro del menor nivel de nutrición nitrogenada, Fn (Fig. 25a), es donde mayores diferencias se encontraron, lo que demuestra una clara relación inversa entre el nivel de disponibilidad de nitrógeno y la senescencia foliar y, consecuentemente, un impacto sobre el mantenimiento de la superficie foliar fotosintetizante, la duración del área foliar (LAD), y una modificación de la principal fuente de fotosintatos para la etapa de llenado de grano (Andrade *et al.*, 1996). En la Tabla n° 20 se presentan los modelos matemáticos de ajuste de la relación entre la evolución de la participación porcentual de la materia seca de las hojas secas en la total y el Tiempo Térmico.

Tabla 20. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R^2) de los modelos matemáticos (polinomios de tercer grado) que representan la evolución de la participación porcentual de la materia seca de las hojas secas en la total.

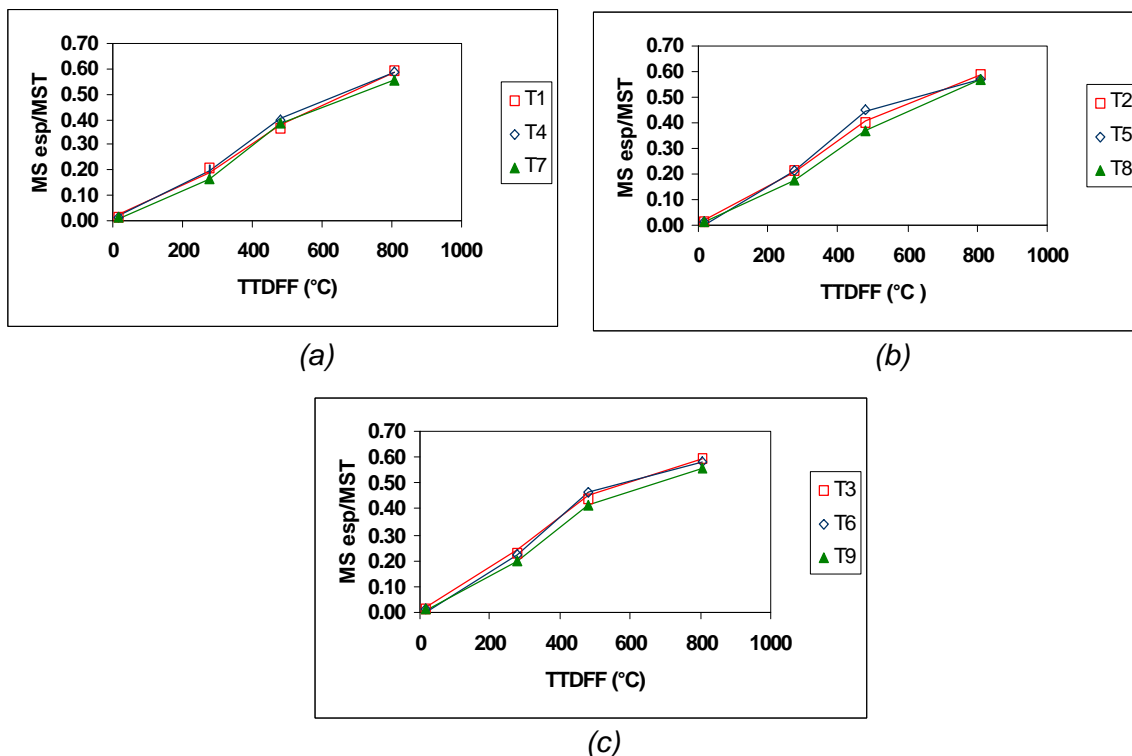
Tratamiento	a (x) ³	b (x) ²	c (x)	d	Nivel de significación	R ²
T1	7.54366 E-11	-2.12901 E-07	0.00020	-0.05920	*	0.98
T2	7.64806 E-11	-2.22405 E-07	0.00022	-0.06622	**	0.99
T3	8.55431E-11	-2.51526 E-07	0.00024	-0.07364	**	0.99
T4	6.61969 E-11	-1.92140 E-07	0.00020	-0.06340	**	0.99
T5	7.76049 E-11	-2.18248 E-07	0.00021	-0.06163	**	0.99
T6	9.77159 E-11	-2.93319 E-07	0.00029	-0.08682	**	0.99
T7	-1.13769 E-10	4.22912 E -07	- 0.00039	0.10407	*	0.85
T8	3.74454 E-11	-8.90946 E -08	0.00011	- 0.04027	**	0.99
T9	6.02000 E -11	- 1.80136E -07	0.00021	-0.07437	**	0.99

*: p 0.05, **: p 0.01; a,b,c,d= coeficientes de los modelos de ajuste. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

Los valores de la relación entre la materia seca final de la espiga/materia seca total a madurez fisiológica fueron de 59, 59, 60, 59, 57, 58, 56, 57, y 55, para T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, Y T9, respectivamente (Fig. 26). La relación en la madurez está relacionada con el número y actividad de los destinos reproductivos (Uhart *et al.*, 1995), y la definición de esos destinos está relacionada con el CGR en la floración, que es modificado por la disponibilidad de N. En la floración, la cantidad de MS particionada a espiga crece en forma exponencial, mostrando una tendencia totalmente diferente a la que siguen el tallo y las hojas fotosintetizadoras, lo que deja en evidencia que, a partir de este momento, la espiga es el órgano dominante, compitiendo por asimilados con hojas, panícula y tallo (Otegui *et al.*, 1995).

La materia seca final acumulada en la espiga se vio reducida por la deficiencia nitrogenada, en 20 y 10 % para Fn y Fi, respectivamente, con respecto a Fa y la programación de riego Prop. Para el nivel hídrico Prpc, la reducción fue de 6 y 12 % para Fn y Fi, respectivamente, con respecto a Fa. En los tratamientos de secano, se midieron las diferencias mas marcadas, del 35 y 33 % para Fn y Fi, respectivamente, con respecto a Fa.

Figura 26. Evolución del peso de la espiga (zuro+granos) y la materia seca aérea total (MS esp/ MST) en función de los grados-días desde la floración femenina para todos los tratamientos: (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa. Los símbolos representan los valores calculados y la líneas las ecuaciones de ajuste. Ajuste realizado con el modelo de Gompertz.



MS esp= materia espiga; MST= materia seca total; TTDE= Tiempo Térmico desde emergencia. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

En la Figura n° 26, se muestra la evolución de la relación MS esp/MST ajustada con el modelo de Gompertz, que permite describir esta cinética:

$$Ms\ esp/MST = A \exp \left[-\exp (c-k\ TT8) \right] \quad (1)$$

donde: A= valor de la asíntota; TT8=suma de los grados-día en base 8 desde la floración femenina; c y k= coeficientes.

En la Tabla n° 21, se presentan los valores de los coeficientes para todos los tratamientos, intervalo de confianza (95 %), y su respectivo coeficiente de determinación (R^2).

Mediante esta relación, se puede calcular la MS alojada en la espiga en el período postfloración. Basado en estudios con ^{14}C , se observó que los fotosintatos provenientes de hojas individuales, sometidas a diferentes rangos de sombreado y defoliaciones, realizadas en forma posterior a la ocurrencia de la antesis, no limitaron el crecimiento de los granos como consecuencia de la capacidad de la fuente, si la condiciones hídricas y nutricionales no eran limitantes (Evans, 1978). En el presente trabajo, la presencia de una deficiencia tanto hídrica como nitrogenada, afectó no solo el peso de la espiga en valor absoluto (Epígrafe 4.1.1.8), sino también la participación porcentual del peso seco de la espiga en la MST.

Tabla 21. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R^2) de los modelos matemáticos (modelo de Gompertz) que representan la evolución de la participación porcentual de la materia seca de la espiga en la total.

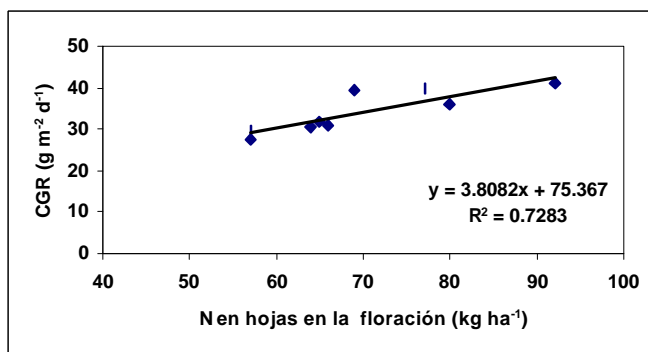
Tratamiento	A	c	k	Nivel de significación	R^2
T1	0.714±1.139	1.266±2.519	0.004±0.019	*	0.99
T2	0.665±0.665	1.335±0.359	0.004±1.419	**	0.99
T3	0.637±0.064	1.436±0.429	0.005±0.016	**	0.99
T4	0.666±0.239	1.378±0.969	0.004±0.004	**	0.99
T5	0.589±0.174	1.802±2.107	0.006±0.007	*	0.99
T6	0.596±0.163	1.854±2.167	0.007±0.007	**	0.99
T7	0.602±0.272	1.720±2.050	0.005±0.007	**	0.99
T8	0.653±0.014	1.428±0.053	0.004±0.001	**	0.99
T9	0.592±0.209	1.609±1.809	0.005±0.109	**	0.99

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$; c, K= coeficientes de los modelos de ajuste. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

El resultado del análisis de varianza para dos factores (Tabla 2, Anejo 2) para el peso de los diferentes órganos aéreos, mostró que la interacción entre los factores agua y nitrógeno sólo se expresó estadísticamente significativa, para la variable peso de hojas secas y en el momento de muestreo R3. Para esa variable, y dentro de los tratamientos sin aplicación de riego, el nivel de fertilización de 30 kgN ha⁻¹ (Fn), mostró diferencias significativamente menores (Tuckey, $\alpha = 0.05$) frente a las dosis de 90 (Fi) y 120 (Fa) kgN ha⁻¹. Para la fecha 13/01/2000 (R3), el efecto del factor agua fue significativo para todos los órganos analizados, mientras que el factor nitrógeno lo fue para todos a excepción del tallo. En esta fecha, se puede observar el efecto del N sobre la producción de hoja seca: para todos los niveles hídricos el nivel Fa presentó valores considerablemente menores de hoja seca. Para el resto de las variables analizadas, el nivel Fa tuvo los mayores valores de producción. En la fecha del 26/01/2000 (R4), el efecto del factor agua también fue significativo sobre la producción de MS de todos los órganos, a excepción de las hojas, mientras que el nitrógeno no tuvo efecto significativo en la producción de tallos, pero si en el resto de los órganos analizados. En la fecha del 08/03/2000, solo el factor agua tuvo efecto significativo en la producción de espigas. Surge nuevamente de este análisis que, para este ambiente productivo, la disponibilidad hídrica resulta mas limitante que la nitrogenada.

En la Figura n° 27 se presenta la relación hallada en el presente trabajo entre la tasa de crecimiento del cultivo en la floración (CGR) y la concentración de nitrógeno (N) foliar en la floración.

Figura 27. Tasa de crecimiento del cultivo en la floración (CGR) en función de la concentración de nitrógeno (N) foliar en la floración.



Existe una relación lineal y altamente significativa ($R^2 = 0.73$, $P < 0.01$) entre la concentración de nitrógeno foliar y la tasa de crecimiento del cultivo en la floración (Fig. 27). La deficiencia nitrogenada disminuyó la tasa de crecimiento del cultivo entre un 3 y un 33 %, comparado con los tratamientos sin estrés, dentro de cada nivel hídrico. La menor reducción se obtuvo para el tratamiento en el cual la programación de riego fue Prop, mientras que el valor del 33 % se midió en los tratamientos conducidos en condiciones de secano. Resultados similares fueron hallados por Uhart y Andrade (1995) quienes encontraron que la deficiencia nitrogenada disminuyó entre un 15 y un 59 % la tasa de crecimiento del cultivo en la floración, comparado con los tratamientos en donde la nutrición nitrogenada no fue limitante.

4.1.1.4 Area foliar

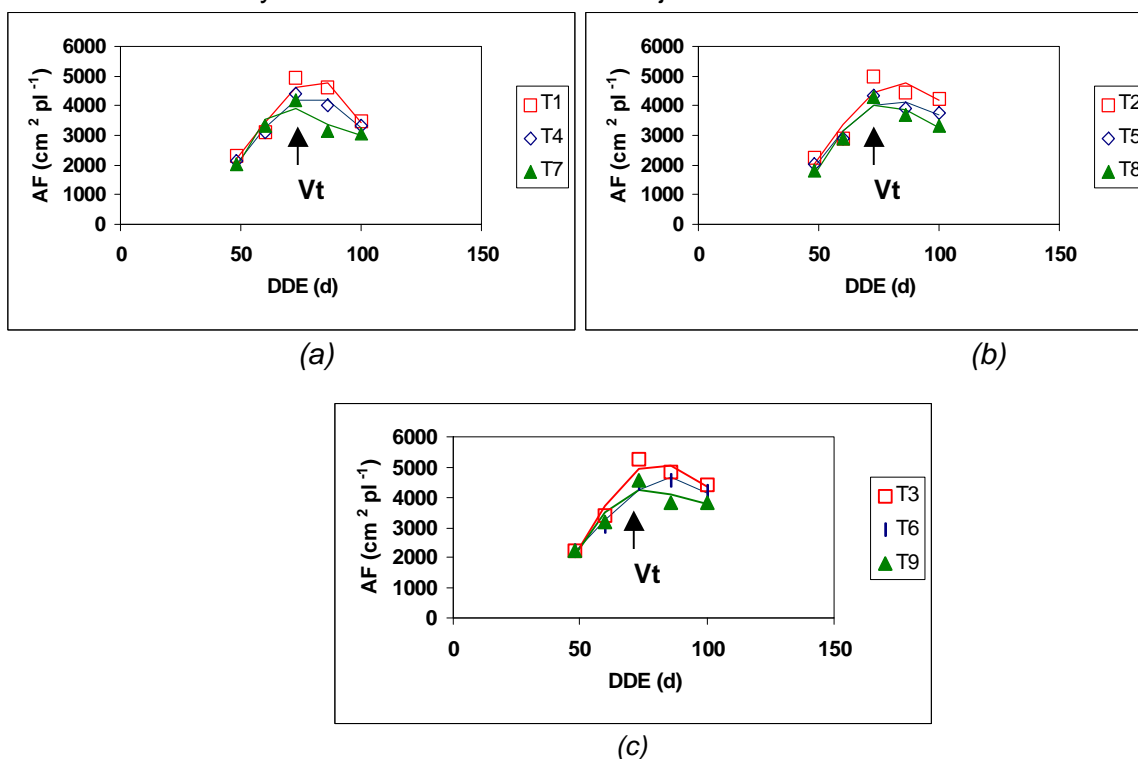
El efecto del agua en el área foliar fue significativo a partir de Vt, y hasta R4 (Tabla 3, Anejo 2). Las diferencias en AF comienzan a mostrarse a partir de Vt, para todos los niveles hídricos (Fig. 28). En este momento, el efecto del nitrógeno no es significativo, ni tampoco el de la interacción agua x N. En R3 es estadísticamente significativo el efecto del N, y se observa una tendencia marcada incrementar el valor de AF con dosis mayores de N. En esta fecha, el valor de la interacción tampoco es significativo. En la última fecha analizada (08/03/2000), el factor N es altamente significativo, lo que estaría indicando que el nitrógeno tiene influencia principalmente en la duración del área foliar, siendo este efecto mas importante que el efecto en el valor absoluto de la misma. La influencia del déficit hídrico se manifiesta de forma mas temprana que la de la deficiencia nitrogenada.

Las máximas diferencias entre niveles hídricos en el área foliar, se pueden observar dentro del nivel mas bajo de nitrógeno, Fn. Para este nivel, las diferencias se manifiestan desde floración (Vt), se mantienen en R3, y disminuyen en R4. El efecto de la deficiencia hídrica en la reducción del área foliar fue máxima en R3, del 31 % (1419 cm²), para el nivel Fn de fertilización.

Para los tres niveles de fertilización nitrogenada, se observa que la tasa de senescencia es más rápida para el tratamiento de secano. La presencia de un estrés hídrico acelera la senescencia foliar (Jordan, 1983). La ocurrencia de un estrés hídrico en el período vegetativo está asociado a la reducción del crecimiento de tallos y hojas, y resulta en bajos valores de IAF (Acevedo *et al.*, 1971). Maturano *et al.* (1997) no encuentran diferencias estadísticamente significativas entre el AF del cultivo de maíz conducido bajo un régimen de riego permanente, frente al AF que se obtuvo en tratamientos regados durante el período crítico a la falta de agua, con diferentes frecuencias e intensidades de riego.

La reducción de la expansión foliar debido a un déficit hídrico reduce el área foliar y la MST, y está fuertemente relacionada con la transpiración (Rosenthal *et al.*, 1987). Acevedo *et al.* (1971) y Hsiao *et al.* (1976) encuentran que la expansión foliar en maíz es mas sensible a una deficiencia hídrica que la transpiración, por lo que es el primer proceso afectado. Esta diferencia en la sensibilidad tendrá efecto en la eficiencia en el uso del agua, (EUA), como se analiza en el Epígrafe 4.1.2.4.

Figura 28. Evolución del área foliar en función de los días desde emergencia (DDE). (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa. Prop, Prpc, Sec. Los símbolos representan los valores calculados y las líneas las ecuaciones de ajuste.



AF= área foliar; DDE= días desde la emergencia; T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

En la Tabla n° 22 se presentan, los modelos matemáticos que representan la evolución del área foliar durante el ciclo de cultivo del maíz en relación a los días transcurridos desde la emergencia. Los coeficientes de determinación hallados para esta relación fueron mayores que los hallados para la relación entre el AF y el Tiempo Térmico desde la emergencia (TTDE, °C), y de mayor significación agronómica ya que predice con mayor precisión los momentos de ocurrencia del AF máxima.

Tabla 22. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R^2) de los modelos matemáticos (polinomios de tercer grado), que representan la evolución del área foliar (AF, $\text{cm}^2 \text{pl}^{-1}$) durante el ciclo de cultivo del maíz en relación a los días transcurridos desde la emergencia (DDE).

Tratamiento	a (x) ³	b (x) ²	c (x)	d	Nivel de significación	R ²
T1	-5.863 E-06	0.000516	0.032	5.599	**	0.94
T2	3.379 E-06	-0.001392	0.162	2.683	*	0.89
T3	7.406 E-06	-0.002392	0.241	0.735	*	0.95
T4	2.767 E-06	-0.001334	0.159	2.762	**	0.96
T5	7.146 E-06	-0.002207	0.217	1.439	**	0.94
T6	-9.4772 E-06	-0.000328	0.077	4.823	**	0.97
T7	0.0000235	-0.005938	0.485	-4.644	**	0.94
T8	0.0000129	-0.003668	0.334	-1.597	*	0.94
T9	0.0000138	-0.003684	0.319	-0.736	**	0.90

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$; a,b,c,d= coeficientes de los modelos de ajuste. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

4.1.1.5 Análisis de crecimiento

a) Índice de área foliar (IAF)

La Figura n° 29, presenta la evolución del IAF para los diferentes niveles hídricos, dentro de cada nivel nitrogenado: (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa. La reducción en la superficie foliar entre los niveles hídricos se observa a partir de los 741°C, es decir 60 DDE. El IAF máximo se alcanzó en floración para todos los tratamientos, con valores que oscilaron entre 4.21 (T3) y 3.24 (T7). Para este ambiente y el mismo híbrido utilizado, Maturano *et al.*, (1997) encuentran valores máximos de IAF de 4.12 y 4.54 para dos años de experimentación de maíz bajo condiciones de riego, para los dos años de experimentación, los valores de IAF estuvieron por encima del valor crítico (Gardner *et al.*, 1985).

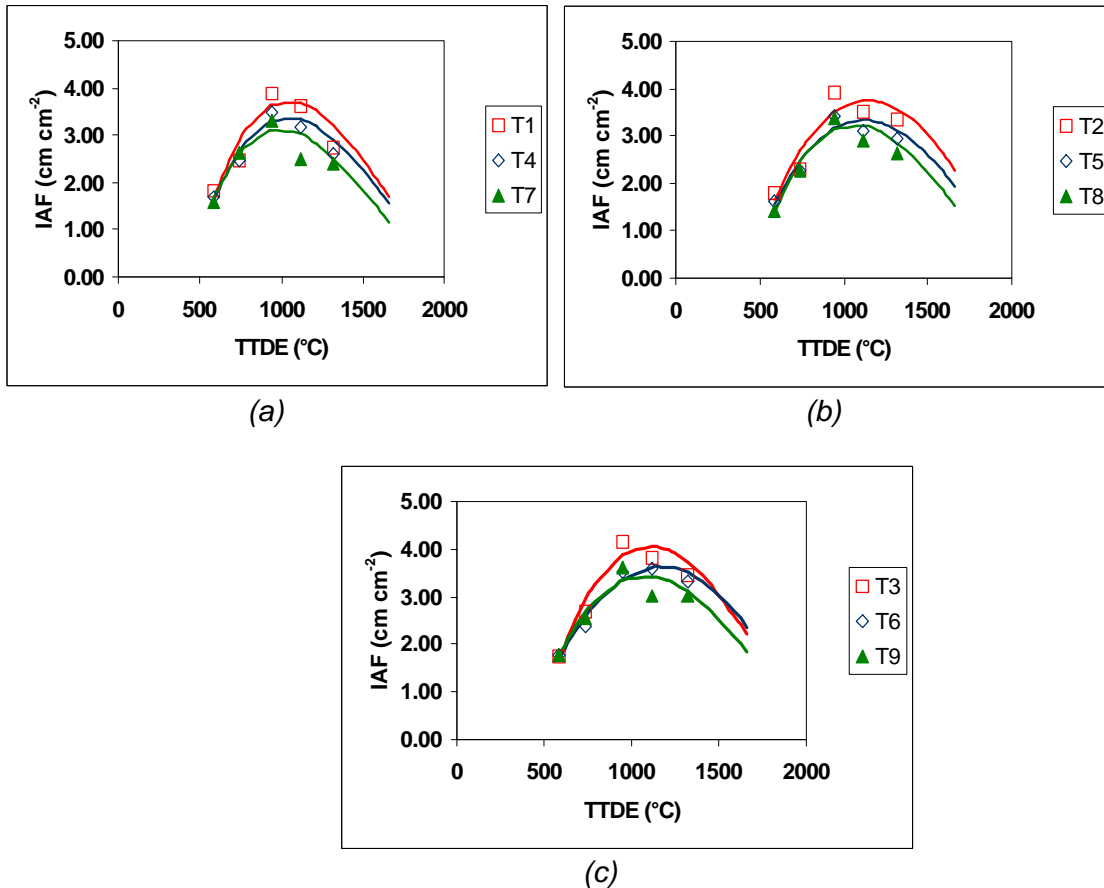
Para el nivel nitrogenado Fn (Fig. 29a), las mayores reducciones en el IAF se midieron el día 86 DE (1117.1°C), y fueron del orden de 13 y 31 % para T4 y T7 respectivamente, con respecto a T1. Dentro del nivel Fi (Fig. 29b), la reducción del IAF entre los niveles hídricos fue del orden de 12 y 21 % para T5 y T8 con respecto a T2. Esta diferencia se midió el día 100 DE (1322 °C). Para el nivel Fa (Fig. 29c), la reducción del IAF fue del orden de 15 y 21 % para T6 y T9, respectivamente, con respecto a T3. Estas diferencias se midieron los días 73 (946.2 °C) y 86 DE (1117.1°C), respectivamente.

Comparando los tres niveles de nutrición nitrogenada dentro de cada nivel hídrico, para todos los casos, la mayor diferencia se midió el día 100 DE (1322 °C). Resultados similares fueron hallados por Novoa y Loomis (1981), Lemcoff y Loomis (1986), Girardin *et al.* (1987), y Cox *et al.* (1993), mientras que Uhart y Andrade (1995) encuentran diferencias en el IAF debidas a la deficiencia nitrogenada a partir del estado V6-V7. Esta mayor diferencia se midió entre los niveles extremos de N (Fn y Fa), para los tratamientos conducidos bajo riego, mostrando una reducción del orden del 21 %. La máxima diferencia entre los tratamientos Fi y Fa se midió para las condiciones de secano, y fue del orden del 13 %. Los valores de IAF máximos alcanzados en floración no presentaron diferencias estadísticamente significativas para los diferentes niveles de N, ni para la interacción, pero sí entre niveles hídricos (Tuckey, $\alpha= 0.05$) (Tabla 4, Anejo 2).

El análisis de varianza para los factores agua y nitrógeno, y su interacción, mostró que, para el momento de la floración femenina (Vt) sólo el efecto del factor agua sobre el IAF fue altamente significativo (Tabla 4, Anejo 2). En la floración, el efecto del agua mostró diferencias altamente significativas entre el nivel hídrico Prop, con respecto a Prpc y Sec. En R3, el resultado fue el mismo que en Vt, pero ya las diferencias se expresaron entre los tratamientos de riego (Prop y Prpc) con respecto al tratamiento Sec. Este hecho estaría indicando que el efecto del riego en el período crítico se ve recién a partir de grano lechoso (R3). En R4, las diferencias por niveles hídricos se dan entre los tratamientos Prop y Sec. En este mismo estado del ciclo, el factor nitrógeno fue altamente significativo, mientras que el del agua fue significativo, sin que se manifieste significación en la interacción agua x nitrógeno.

Las diferencias debidas al factor nitrógeno se expresan entre el nivel Fn y Fa. Es importante destacar que el resultado es el mismo que el hallado en el análisis de la evolución de la MST. De este análisis, se puede concluir que, para este ambiente, el efecto de la disponibilidad hídrica es mas limitante que el de la disponibilidad nitrogenada, para la evolución del IAF.

Figura 29. Evolución del Índice de Área Foliar (IAF) para los diferentes niveles hídricos dentro de cada nivel nitrogenado: (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa. Prop, Prpc, Sec. Los símbolos representan los valores observados, y las líneas las ecuaciones de ajuste.



IAF= índice de área foliar; TTDE= Tiempo Térmico desde emergencia. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

En la Tabla n° 23 se presentan los modelos matemáticos (ecuaciones polinómicas de tercer grado) que representan la evolución del índice de área foliar (IAF) a lo largo del ciclo de cultivo de maíz. La selección del modelo de ajuste en esta relación tuvo como objetivo la búsqueda de una ecuación que, agrónomicamente, representara de la mejor forma, la evolución del IAF, es decir, el momento de ocurrencia del IAF máximo y la duración de la misma, con significación estadística y alto valor del coeficiente de determinación.

Tabla 23. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R^2) de los modelos matemáticos (polinomios de tercer grado), que representan la evolución del índice de área foliar (IAF, $\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$) durante el ciclo de cultivo del maíz en relación a los días transcurridos desde la emergencia (DDE).

Tratamiento	a (x^3)	b (x^2)	c (x)	d	Nivel de significación	R^2
T1	4.055186 E-9	-0.00002066	0.02994	-9.62530	*	0.93
T2	1.499831 E-9	-0.00001131	0.01991	-6.46323	*	0.91
T3	2.959687 E-9	-0.00001736	0.02748	-9.09042	*	0.96
T4	3.394354 E-9	-0.00001753	0.02552	-8.02045	*	0.98
T5	1.642437 E -9	-0.00001107	0.01855	-5.86443	*	0.96
T6	4.57246 E -10	-0.00000710	0.01473	-4.61121	*	0.98
T7	4.091424 E-9	-0.00001943	0.02655	-8.08107	*	0.92
T8	3.382285 E-9	-0.00001753	0.02576	-8.39087	*	0.95
T9	2.251120 E-9	-0.00001330	0.02081	-6.35042	*	0.93

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$; a,b,c,d= coeficientes de los modelos de ajuste. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

b) Duración del área foliar (LAD)

Las reducciones en la duración del área foliar total (LADt), debido al efecto de los diferentes niveles nitrogenados, fueron de 7 y 20 días para T1, con respecto a T2 y T3, respectivamente. Para el nivel hídrico Prop, las reducciones medidas en el tratamiento Fn (T4), con respecto a Fi (T5) y Fa (T6), fueron de 1 y 18 días, respectivamente. Para el nivel hídrico Sec, las reducciones fueron de 5 y 21 días para T7, con respecto a T8 y T9, respectivamente.

El déficit hídrico tuvo un efecto más marcado en la reducción de la duración de la LADt que el nitrogenado, ya que fue de 13 y 28 días menor para T4 y T7, respectivamente, con respecto a T1; 9 y 29 días menor para T5 y T8, respectivamente, con respecto a T2 y de 10 y 26 días para T6 y T9, respectivamente, con respecto a T3. En condiciones de secano, la dosis Fa incrementó la duración tanto del LADt como postfloración (LADf). Estadísticamente, existieron diferencias significativas en el LADt (Tuckey, $\alpha = 0.05$), tanto para el factor agua, como para el factor nitrógeno, pero no para su interacción. Las diferencias debidas al factor agua, separan el nivel Prop de los dos restantes. Las diferencias debidas al factor N, separan el nivel Fn del Fa, no siendo el nivel intermedio, Fi, diferente estadísticamente de los otros dos. El análisis para LAD a partir de floración (LADf), también mostró diferencias estadísticamente significativas para el factor agua y N, (Tuckey, $\alpha = 0.05$), pero no para su interacción. Las diferencias debidas los factores agua fueron altamente significativas, siendo el nivel Prop diferente a los otros dos. Para el factor N, el resultado es el mismo que para LADt, el nivel Fn fue diferente del Fa, sin embargo el nivel Fi no fue diferente, estadísticamente, de los dos restantes.

Gherbin *et al.* (1996), también encuentran variaciones en el LADt para el cultivo de sorgo como respuesta a diferentes criterios de riego aplicados.

c) Tasa de crecimiento absoluto del cultivo (“Crop Growth Rate”, CGR)

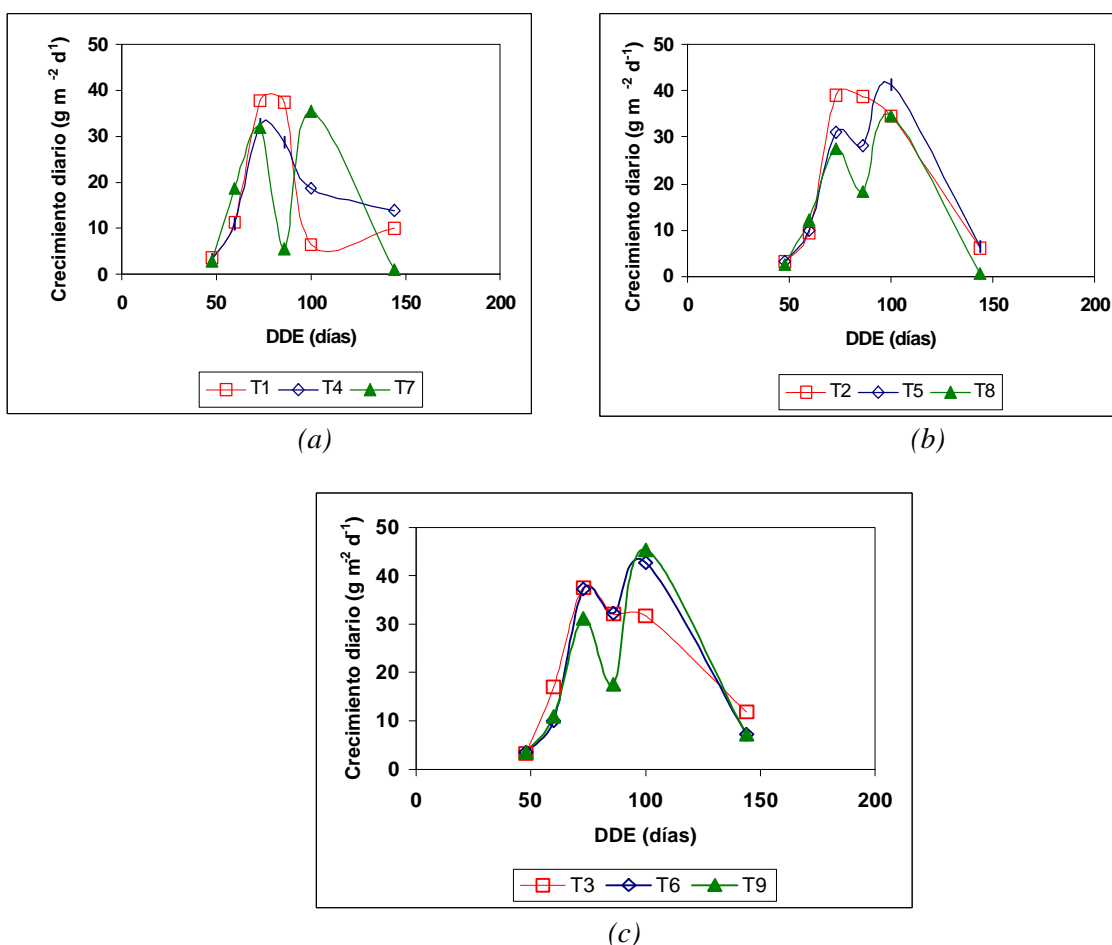
El CGR es una medida del incremento de materia seca total por unidad de superficie y define la capacidad productiva de una comunidad vegetal (Watson, 1952).

En la Fig. n° 30, se presenta la velocidad de crecimiento absoluto del cultivo determinado como diferencia entre dos fechas, para todos los tratamientos. Se utilizó en este caso el método clásico, debido a que el método funcional a partir de

ajustes realizados, no representa las variaciones en la tasa de crecimiento del cultivo, fundamentalmente en los tratamientos de secano donde se detectó una recuperación en la tasa del crecimiento luego de un período de estrés hídrico. Esta es una limitación propia del método, ya que no proporciona necesariamente la mejor descripción del fenómeno estudiado, pudiendo enmascarar el efecto de una adversidad ambiental puntual (Buttery, 1969).

El análisis de varianza realizado a partir de los tres momentos finales de muestreo, mostró diferencias altamente significativas CGR, en función de los niveles de agua, para el período comprendido entre los 73 y 86 DDE (Tabla 5, Anejo 2). El efecto del nitrógeno sobre el CGR fue estadísticamente significativo para el período siguiente, desde los 86 a los 100 DDE. Este resultado es coincidente con lo encontrado por Pandey *et al.* (2000), donde la respuesta de CGR a la aplicación de N en el cultivo de maíz fue modificada por el estrés hídrico.

Figura 30. Velocidad diaria de crecimiento del cultivo ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) determinados como diferencia entre dos fechas, para los niveles nitrogenados: (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa, y sus combinaciones con los tres niveles de riego: Prop, Prpc, Sec.



DDE = días desde la emergencia. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

El primer máximo en el CGR, se alcanza para todos los tratamientos el día 73 DE (Vt). Luego, se observa, para los tratamientos de secano y los tratamientos conducidos con la programación de riego Prpc, y el nivel Fi y Fa de fertilización nitrogenada, que existe una disminución en la velocidad de crecimiento, que

posteriormente, se recupera, y se alcanza otro máximo, con valores absolutos mayores que el primero. Analizando cada nivel nitrogenado, las diferencias entre las tasas de crecimiento debidas al aporte hídrico, comienzan a notarse a partir de floración.

En las parcelas conducidas con la programación de riego Prop, las diferencias para este índice comienzan a observarse en forma marcada recién a partir de la mitad del período “lag”, momento en el que T1 muestra una disminución en la velocidad de crecimiento con respecto a T2 y T3. La disminución de este parámetro, para el día 100 DE puede deberse, posiblemente, a errores propios de muestreo. De cualquier forma se pueden observar tendencias en su evolución. Las diferencias para los tratamientos de secano y de riego se observan desde el comienzo de llenado de grano. En los tratamientos de secano, se puede observar una disminución de la tasa de crecimiento en floración que luego se recupera; esto puede deberse a las escasas precipitaciones ocurridas entre los momentos de muestreo de V6 a Vt (73.2 mm), mientras que durante el período comprendido entre Vt y grano lechoso se registraron 69.3 mm en 13 días. Esta tendencia también se observó para T6, donde posiblemente, ante una situación de nutrición nitrogenada alta, el agua pasó a ser el factor limitante en la velocidad de crecimiento del cultivo. El cálculo del CGR, a partir de valores ajustados de MST, no refleja las variaciones en la velocidad de crecimiento debido a la recuperación, luego de un período de déficit hídrico, por lo que se optó por presentar los valores de velocidades de crecimiento a partir de los valores medidos. Resultados encontrados para el cultivo de tomate, muestran que los diferentes índices de crecimiento fueron muy influenciados por el régimen de irrigación (Castignano *et al.*, 1985). Para el cultivo de sorgo, también se encontró una respuesta diferencial del CGR ante diversos regímenes de riego aplicados (Gherbin *et al.*, 1996).

Realizando el análisis, dentro de un mismo nivel hídrico para los diferentes niveles de nitrógeno, las diferencias en las tasas de crecimiento, comienzan a hacerse visibles a partir del estado de novena hoja (V9), aumentando a medida que disminuye el nivel de nitrógeno aportado. La mayor diferencia en el CGR debida al efecto de la deficiencia nitrogenada, se midió para el período comprendido entre los días 86 a 100 DE, siendo estas disminuciones del orden del 79, 62 y 29 % dentro de los niveles hídricos Prop, Prpc, y Sec, respectivamente. Uhart y Andrade (1995) encuentran reducciones de entre 15 y 59 % del CGR en la floración, debido a una deficiencia nitrogenada. Reducciones similares fueron encontradas por Girardin *et al.* (1987) y Muchow y Davis (1988a).

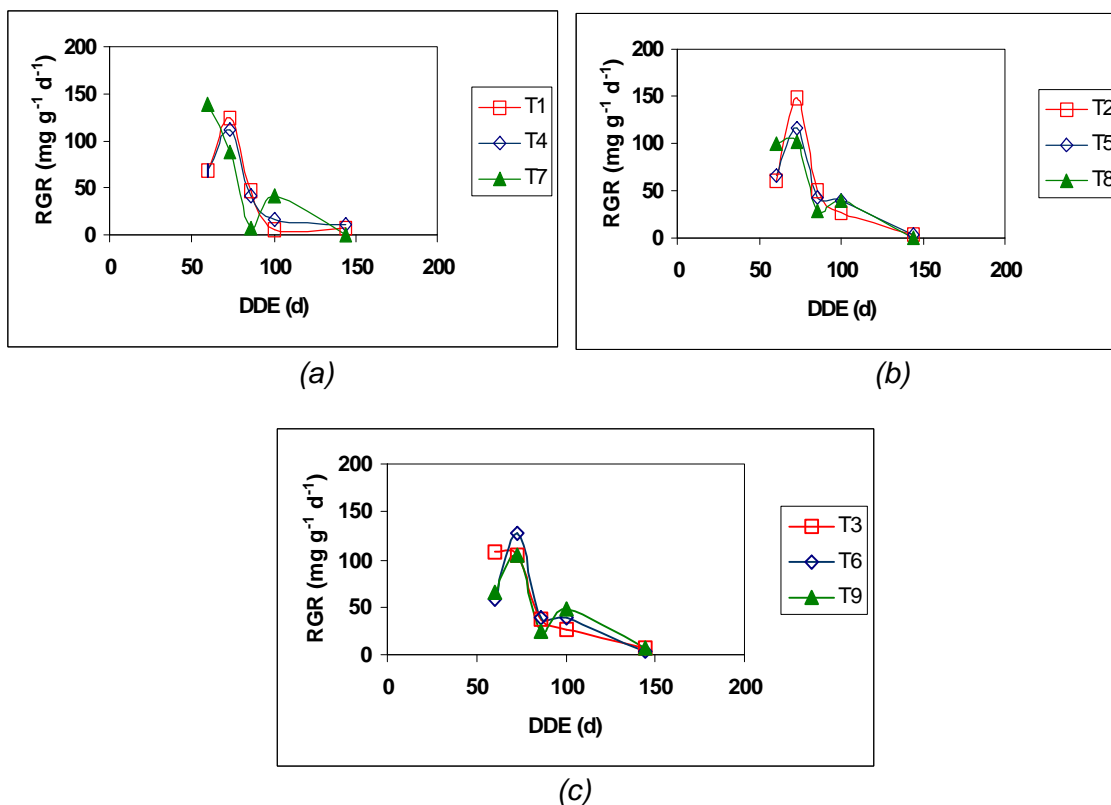
El hecho de contar con un mayor número de muestreos de MST durante el ciclo del cultivo, o bien a partir del momento en que se instalan diferencias importantes, permitiría una mejor descripción de los valores máximos y mínimos de CGR, poniendo en evidencia una corta duración tanto de la caída como de la recuperación de la tasa de crecimiento. A partir de los gráficos elaborados, queda de manifiesto que es discutible la confiabilidad de los ajustes que utiliza el método funcional, en situaciones en las que existe un estrés hídrico o condiciones ambientales adversas, que se presentan en forma puntual, ya que el resultado del ajuste enmascara estas situaciones.

d) Velocidad relativa de crecimiento (“Relative Growth Rate”; RGR)

EL RGR expresa el incremento en materia seca por unidad de materia seca presente, y por unidad de tiempo. La evolución de este índice es decreciente a lo largo del ciclo. El valor máximo también se alcanzó cercano a la floración, después de este momento disminuye, presentando variaciones según el tratamiento (Fig. 31).

Para los tratamientos de secano, existió una recuperación en la velocidad relativa de crecimiento, como consecuencia de la ocurrencia de precipitaciones después de un período de estrés hídrico, al igual que en los demás índices presentados. Lo mismo ocurrió con la programación de riego Prop y los niveles mayores de fertilización, (Fi y Fa, Fig. 31b, c), pero las variaciones son menos marcadas en RGR con respecto a lo observado para los demás índices. Esta recuperación en el RGR hizo que la evolución de este índice no fuera coincidente con la descrita en la bibliografía para diferentes cultivos (Buttery, 1969; Evans, 1972; Harris, 1978; Maman *et al.*, 1999; y Srinivas y Hedge, 1984).

Figura 31. Velocidad relativa de crecimiento del cultivo ($\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$) determinados como diferencia entre dos fechas, para los niveles nitrogenados: (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa, y sus combinaciones con los tres niveles de riego: Prop, Prpc, Sec.



RGR= velocidad relativa de crecimiento; DDE =días desde la emergencia. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

El resultado del análisis de varianza mostró que el efecto del agua fue altamente significativo y significativo para los períodos comprendidos entre los días 73- 86 y 86-100 DE (R3-R4), respectivamente (Tabla 6, Anejo 2). Para el primer período, el efecto del agua fue diferente entre los niveles de riego y el de secano, mientras que en el segundo período la diferencia se midió entre el nivel Prop y Sec. Sin embargo, ni el efecto del nitrógeno ni el de la interacción agua x nitrógeno fue significativo para ninguna de las fechas analizadas. En el período R3-R4, se alcanzan los mayores valores para el RGR, en los tratamientos de secano y Prpc, debido a la ocurrencia de lluvias, como fue expresado en el párrafo anterior.

e) Velocidad de asimilación neta (“Net Assimilation Rate”, NAR)

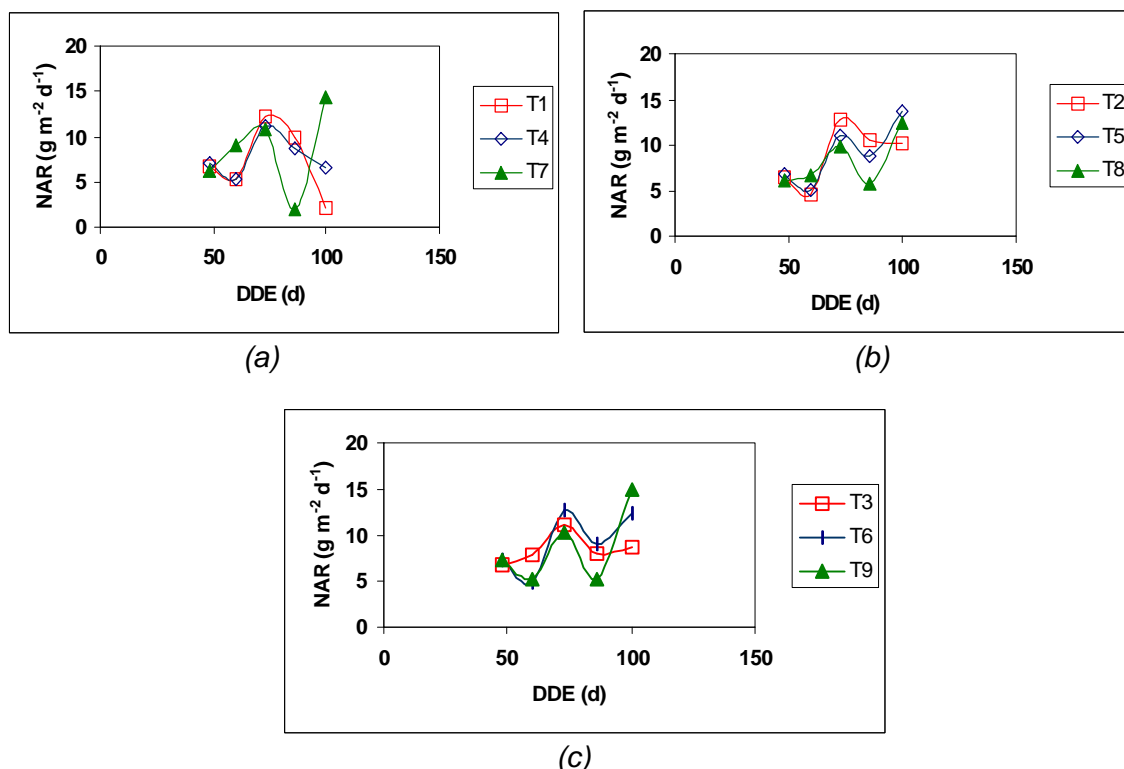
La velocidad de asimilación neta es la producción de materia seca por unidad de superficie foliar asimiladora y por unidad de tiempo. Tiene un componente fotosintético y otro respiratorio, por lo que es una medida de la eficiencia fotosintética de una comunidad de plantas (Evans, 1972; Gardner *et al.*, 1990). Es una medida promedio de la capacidad fotosintética del cultivo, lo que implica sobrestimar la eficiencia de algunas hojas y subestimar la de las restantes.

El valor del NAR está directamente influenciado por el ambiente, ya que es una medida del superávit de la fotosíntesis sobre la respiración, ambos procesos fisiológicos dependientes de las condiciones ambientales (Watson, 1952; Hunt, 1978). El valor de NAR decrece a medida que la planta envejece, siendo máximo al inicio del ciclo del cultivo, cuando la mayoría de las hojas están expuestas a la luz directa. A medida que aumenta el IAF, la tasa de asimilación neta disminuye, conjuntamente con el incremento de tejidos heterotróficos en la planta, lo que incrementa la respiración (De Juan *et al.*, 1992).

En la Fig. n° 32 se presenta la evolución del NAR para los diferentes tratamientos nitrogenados. Se puede observar que la evolución en este índice no es la descrita previamente, ya que existen variaciones en su evolución. Se aplicó el método clásico para representarlo, ya que el funcional enmascara estas variaciones, al igual que sucede con la evolución del CGR.

Para todos los tratamientos, se alcanza el primer máximo coincidente con la floración (Vt), y luego, según el tratamiento, la evolución fue diferente. El análisis de varianza mostró que para este índice, sólo el efecto del factor agua fue altamente significativo, para el período comprendido entre los días 73-86 y 86-100 DE, respectivamente (Tabla 7, Anejo 2). Sin embargo, ni el efecto del nitrógeno ni el de la interacción agua x nitrógeno fue significativo, para ninguna de las fechas analizadas. El aumento de las disponibilidades de nutrientes minerales, aún cuando puede incrementar la superficie foliar, tiene sólo un efecto ligero sobre el NAR (Botella *et al.*, 1997). A excepción de los tratamientos T1, T2, y T4, los tratamientos restantes mostraron un incremento en los valores de NAR hacia el final del ciclo del cultivo. En los tratamientos de secano, y en los tratamientos fertilizados con los niveles Fi y Fa dentro del nivel Prpc (Fig. 32b,c), este incremento puede deberse, como ya se expuso en el análisis de RGR, a una alta sensibilidad de respuesta del cultivo a la ocurrencia de lluvias posteriormente a la floración, favoreciendo también la absorción de nitrógeno, que determinaron esa recuperación exponencial en el crecimiento del mismo, asociado al crecimiento de los granos y a una acumulación de MS en tallo durante el período “lag” (fase de activa división celular del grano, previa al inicio de la etapa lineal de llenado efectivo). En los tratamientos conducidos con el nivel de riego Prpc, como se expresa en el Epígrafe 4.1.2.1, el riego fue deficitario de acuerdo al objetivo propuesto.

Figura 32. Velocidad de asimilación neta (NAR; $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$), determinada como diferencia entre dos fechas, para los niveles nitrogenados: (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa, y sus combinaciones con los tres niveles de riego: Prop, Prpc, Sec.



NAR= velocidad de asimilación neta; DDE= días desde emergencia. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

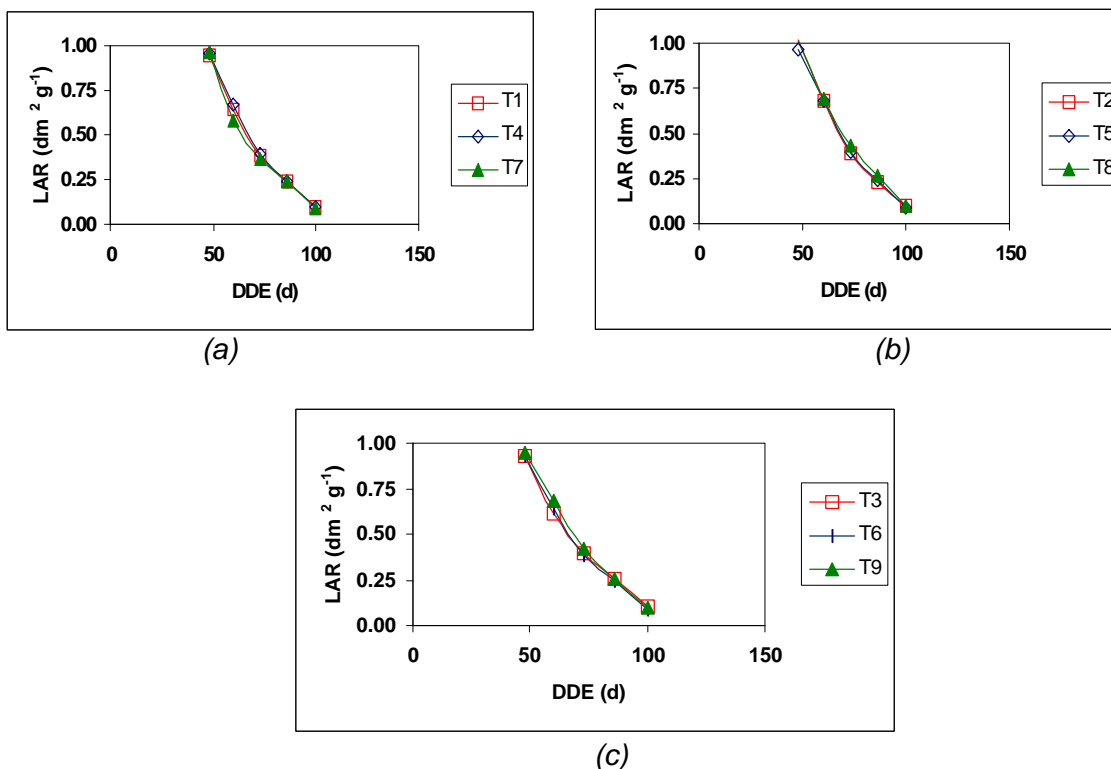
La evolución del NAR encontrada en el presente trabajo, no es coincidente con la descripción de la evolución de este índice hecha por Scott y Batchelon, 1979; Srinivas y Hedge, 1984; Perumal y Sahota, 1986; Botella *et al.*, 1997; Yusurf *et al.*, 1999; sin embargo, es importante destacar que las condiciones en que se realizaron estos trabajos no incluían limitaciones hídricas ni nutricionales, por lo que, nuevamente, surge la importancia de utilizar el método clásico de análisis de crecimiento cuando existen deficiencias puntuales, bióticas o abióticas, que afectan la evolución de los índices de crecimiento.

f) Relación de área foliar (“Leaf área ratio”, LAR)

El índice LAR relaciona la superficie de las hojas verdes de la planta con el peso seco total de la misma en un momento determinado (Noggle y Fritz, 1984). Está directamente relacionado con el RGR, e inversamente con el NAR (de Juan *et al.*, 1992). Este índice no está muy influenciado ni por una deficiencia hídrica ni nitrogenada, como se muestra en la Fig. n° 33. Para los tres niveles de fertilización nitrogenada analizados, no existieron diferencias entre los niveles hídricos.

El análisis de varianza realizado para este índice (Tabla 8, Anejo 2) no mostró diferencias significativas para ninguna de las fechas analizadas. El efecto del factor agua, nitrógeno, ni la interacción entre ambos, resultó ser significativo a partir de R3, ni en etapas anteriores.

Figura 33. Evolución del índice LAR, ($\text{dm}^2 \text{g}^{-1}$) determinada como diferencia entre dos fechas, para los niveles nitrogenados: (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa, y sus combinaciones con los tres niveles de riego: Prop, Prpc, Sec.



LAR= relación de área foliar; DDE= días desde emergencia. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

g) Tasa de crecimiento absoluto de la Espiga (EGR)

El (EGR) alcanzó los mayores valores para el nivel nitrogenado Fa, con respecto a los niveles Fi y Fn. (Fig. 34a). Dentro de cada nivel nitrogenado, existieron diferencias entre los distintos niveles hídricos. Para todos los niveles nitrogenados, ya a partir del día 86 DE se manifestaron diferencias entre los niveles hídricos.

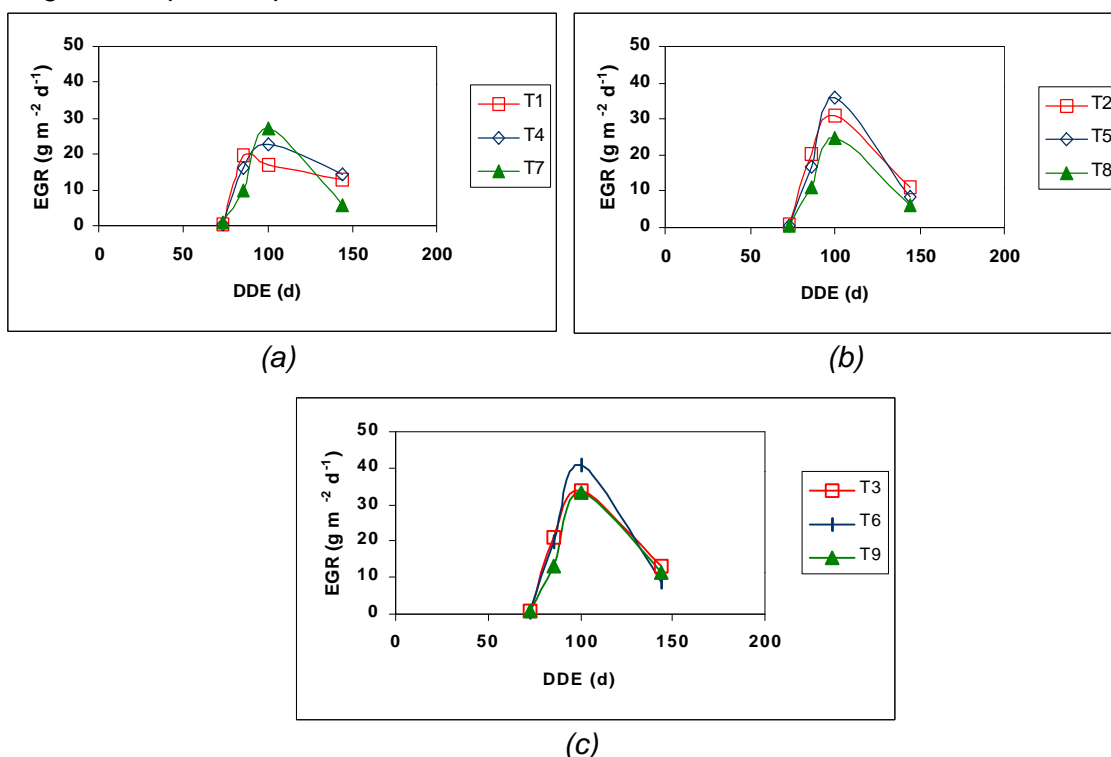
Para el nivel Fn (Fig. 34a), en el día 86 DE, los valores de EGR se separan entre tratamientos, siendo mayor para el tratamiento de mayor disponibilidad hídrica, Prop, y, en orden decreciente, para Prpc y Sec. Esta tendencia se repitió para los tres niveles nitrogenados. Para el día 100 DE, esta tendencia se modifica, siendo el mayor valor de EGR el del tratamiento Sec (T7); sin embargo, existió una disminución más rápida en los valores de este índice y, consecuentemente, el peso final de la espiga fue menor que para las estrategias de programación de riego Prop y Prpc. Esta es la misma tendencia se observó para otros índices, en los que en los tratamientos de secano existió una recuperación luego de la ocurrencia de lluvias, tras un período de estrés hídrico. Para la última fecha de muestreo, los valores mayores de EGR se midieron para los niveles hídricos menos limitantes; el valor mas reducido fue para el tratamiento T7.

Para el nivel Fi (Fig. 34b), el tratamiento de Sec (T8), siempre mostró valores menores de EGR, para todas las fechas evaluadas. En el día 86 DE, los valores mayores fueron para Prop, y, en orden decreciente, para Prpc y Sec. En el día 100 DE, el orden cambia para los tratamientos de riego, siendo mayor el valor de EGR

para Prpc con respecto a Prop. Para el nivel Fa (Fig. 34c), aunque, con valores absolutos mayores, la tendencia fue similar a la observada en Fi, aunque para este nivel nitrogenado, la evolución del EGR es muy similar en los niveles hídricos Prop y Sec.

Para la programación de riego Prop, la deficiencia nitrogenada redujo la tasa de crecimiento de la espiga en un 49 y 8 % para T1 y T2, respectivamente, con respecto a T3. Para Prpc, la reducción fue de 44 y 12 % para T4 y T5, respectivamente, con respecto a T6. En los tratamientos de secano, la reducción fue de 19 y 26 % para T7 y T8, respectivamente, con respecto a T9.

Figura 34. Evolución del índice de crecimiento absoluto de la espiga para todos los tratamientos, determinados como diferencia entre dos fechas, para los niveles nitrogenados: (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa, y sus combinaciones con los tres niveles de riego: Prop, Prpc, Sec.



EGR= índice de crecimiento absoluto de la espiga; DDE= días desde emergencia. . T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

El análisis de varianza mostró que el efecto del factor agua fue altamente significativo en el EGR del período comprendido entre los días 73 a 86 DE (Vt-R3), existiendo diferencias entre el nivel Prop y los dos restantes (Tabla 9, Anejo 2). Para este período, el factor nitrógeno fue significativo, existiendo diferencias entre los niveles extremos de N. La interacción agua x nitrógeno no fue significativa. En el día 100 DE, el efecto del factor nitrógeno fue altamente significativo, mientras que ni el factor agua ni la interacción lo fueron. La diferencia debida al N se observó para los niveles nitrogenado Fa y Fi, con respecto a Fn. Este resultado ya fue observado en el análisis de varianza realizado para otros índices, y es, coincidentemente, el día 100 DE, luego de la ocurrencia de lluvias, que el factor nitrógeno pasa a ser mas determinante en la evolución de los distintos parámetros analizados. Para el día 144 DE, ningún factor ni la interacción resultaron

significativos. Para este índice, la incidencia del nitrógeno fue mas importante que la de los diferentes niveles hídricos.

En la Tabla n° 24 se presentan los coeficientes de las ecuaciones de ajuste del índice de crecimiento de la espiga, $y = a \cdot x - b$, para todos los tratamientos. Los ajustes se realizaron en función de los días desde emergencia (DE), con altos coeficientes de determinación ($R^2 > 0.93$). La velocidad de crecimiento de la espiga cercana a la floración está muy relacionada con el rendimiento, a través del componente de mayor peso como es el número de granos por metro cuadrado (Uhart y Andrade, 1995). Por esta razón, es importante encontrar modelos de ajuste con altos coeficientes de determinación y significativos, ya que será una variable de peso para la predicción del rendimiento, si se cuenta con datos de crecimiento real de la espiga. La relación entre el número de granos por metro cuadrado y el EGR a floración, para este ambiente, es presentada en la Figura n° 46, (Epígrafe 4.1.1.11).

Tabla 24. Coeficientes y estadísticos mas importantes del modelo matemático ($y = a \cdot x - b$) que relaciona, durante el período de acumulación lineal de la biomasa seca de la espiga (EGR, $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$), dicha evolución con los días desde emergencia (DDE, d).

Tratamiento	a	b	Nivel de significación	R ²
T1	0.7277	727.26	**	0.99
T2	0.6551	651.94	*	0.99
T3	0.7261	727.26	**	0.99
T4	0.477	469.74	**	0.97
T5	0.7808	800.73	**	0.98
T6	0.8455	862.08	*	0.98
T7	0.5526	571.82	**	0.93
T8	0.531	543.85	**	0.97
T9	0.7032	726.35	**	0.95

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$; a,b = coeficientes de los modelos de ajuste. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

4.1.1.6 Radiación fotosintéticamente activa interceptada por la cubierta vegetal (RFAi)

En la Fig. n° 35 se presenta la evolución del porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi), en función del IAF, calculado con la ecuaciones de ajuste (Epígrafe 4.1.1.5), para los momentos de medición de la radiación. Para el nivel de fertilización Fn (Fig. 35a), en los niveles hídricos Prop y Prpc, el porcentaje de RFAi fue ajustado con una función lineal mas + meseta, mientras que el tratamiento Sec (T7) fue ajustado por regresión lineal. Las ecuaciones de ajuste para todos los tratamientos se presentan en la Tabla n° 25. El tratamiento T1 alcanzó el mayor % de RFAi (83 %), con un IAF de 2.8, el tratamiento T4 lo alcanzó con un IAF de 2.9, pero el % de RFAi fue menor, de 74. La pendiente de los ajustes con funciones lineal + meseta, corresponde a la senescencia foliar y a la etapa donde el porcentaje de cobertura no es total.

Para el nivel de fertilización Fi (Fig. 35b), se observa la misma tendencia que para Fn (Fig. 35a), ya que los tratamientos conducidos bajo riego mostraron una evolución lineal + meseta, mientras que el tratamiento de secano (T8) fue ajustado por regresión lineal. Sin embargo, para este nivel de fertilización nitrogenada, las evoluciones de la relación entre la RFAi y el IAF para los tratamientos de riego son similares. Este hecho está indicando que, cuando existe un nivel nitrogenado no deficiente, se estaría haciendo un uso mas eficiente del riego aplicándolo durante el

período crítico a la falta de agua. Estas tendencias encontradas para los niveles Fn y Fi, están relacionados con los mayores valores de IAF medidos para los tratamientos conducidos bajo riego.

Para el nivel de fertilización Fa (Fig. 35c), y los tratamientos conducidos bajo riego (T3 y T6), la tendencia fue lineal incrementando el % de RFAi a medida que se incrementa el IAF, sin llegar a una meseta. Para el tratamiento de secano (T9) en este nivel de fertilización, la tendencia fue la misma.

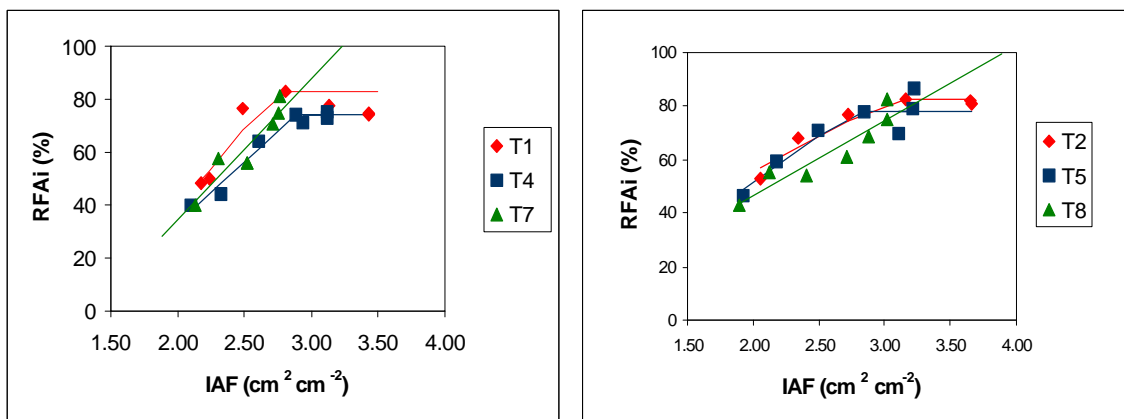
Para un mismo nivel hídrico (Fig. 35, Prop, Prpc, Å Sec), en este caso los tratamientos que fueron conducidos con la programación de riego Prop, la dosis Fa (T3) presentó los valores mas alto de IAF y, consecuentemente, los mayores porcentajes de intercepción de la RFA, siguiendo, en orden decreciente, los tratamientos T2 y T1 (Fi y Fn, respectivamente). El déficit hídrico tuvo una mayor incidencia en la reducción del % de RFA interceptada que el déficit nitrogenado para este ambiente. Las mayores reducciones fueron del 25 % del T8 (Sec), con respecto al T2 (Prop), y las menores, del 2 % del T7 (Fn), con respecto a T8 (Fi). Las reducciones debidas a las diferentes condiciones nitrogenadas variaron entre un 2 y un 12 %, mientras que las debidas a la deficiencia hídrica fueron entre un 5 y un 26 %.

Los tratamientos de secano también sufrieron un retraso en interceptar la máxima RFA para las dosis Fn y Fi, de 14 días, mientras que ésto no se observó para Fa.

Tanto la deficiencia hídrica como nitrogenada tuvieron un mayor efecto en la EUR que en el porcentaje de RFAi. Estos resultados son coincidentes con los hallados por Muchow *et al.* (1988) aunque con menores valores absolutos. Cuando no se tiene en cuenta la variación diaria de la proporción de RFA interceptada, como en este caso, se subestima la radiación interceptada y sobrestima la eficiencia en el uso de la radiación (Muchow, 1985). La reducción de la RFA absorbida (RFAa) debido a un déficit en la nutrición nitrogenada, o a la ocurrencia de un estrés hídrico, es la principal causa de la disminución en la producción de materia seca (Muchow, 1985).

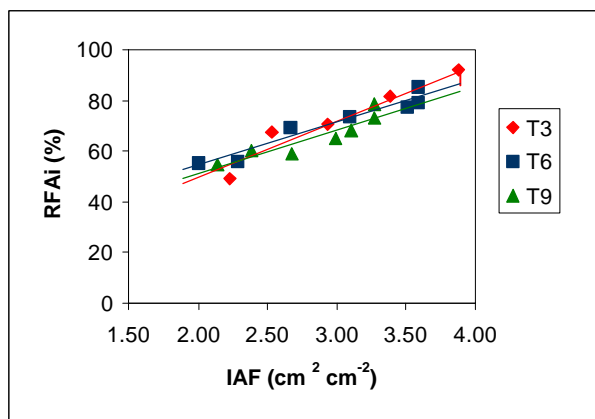
El IAF crítico, es decir aquel que permite alcanzar las tasas de crecimiento máximas, y con la cual se logra el 95 % de intercepción de la RFA (Andrade *et al.*, 1996), alcanzó, en las condiciones estudiadas, valores entre 3.5 y 4, en los tratamientos que no tuvieron limitaciones hídricas ni nitrogenadas. Con estos valores de IAF, se alcanzaron también los porcentajes máximos de intercepción de la RFA, que, para nuestro ambiente argentino, fue de alrededor del 80 %. La tasa de crecimiento del cultivo está estrechamente relacionada con la radiación interceptada (Arguissain, 1990).

Figura 35. Evolución del porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada (%RFA) en función del índice de área foliar (IAF) para (a) Fn, (b) Fi y (c) Fa, y su combinaciones con los tres niveles de riego: Prop, Prpc, Sec.



(a)

(b)



(c)

T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

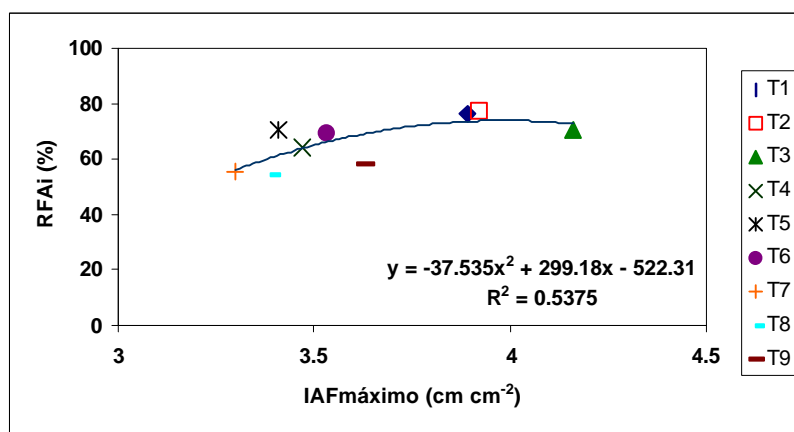
Tabla 25. Modelos de ajuste para la relación RFA interceptada - IAF (regresión lineal, regresión lineal + "plateau"); coeficientes y estadísticos mas importantes.

Tratamiento	Plateau	c (x)	d	Nivel de significación	R ²
T1	si x > .741865 entonces y= 83.01	59.558	80.29	*	0.90
T2	si x >3.046851 entonces y= 82.48	25.688	4.2125	*	0.91
T3		22.266	4.9771	**	0.94
T4	si x >2.879167 entonces y= 74.33	46.767	60.3200	*	0.96
T5	si x >2.782735 entonces y= 78.14	34.115	16.7930	**	0.96
T6		17.144	20.074	**	0.93
T7		53.595	-73.316	*	0.86
T8		28.047	-9.3827	*	0.87
T9		17.163	16.783	**	0.84

*: p < 0.05, **: p < 0.01; c,d = coeficientes de los modelos de ajuste. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

En la Fig. n° 36, se presenta la relación entre el porcentaje de RFA interceptada y el IAF máximo medido, para todos los tratamientos diferenciados en el diseño experimental. El IAF máximo, por encima del cual no se incrementó el porcentaje de RFAi, fue de, aproximadamente 4. Este IAF se alcanzó para todos los tratamientos que tuvieron la mayor disponibilidad hídrica. Valores de IAF crítico de entre 4 y 5 fueron medidos para el sureste bonaerense por Andrade *et al.* (1996). Los valores de IAF máximo medidos son mayores que los calculados según la ecuación de ajuste (Epígrafe 4.1.1.5) para cada momento de medición de la radiación, ya que estos momentos no coincidieron con el IAF máximo; se observa, en la Fig. n° 36, que el % RFAi correspondiente al IAF máximo, nunca alcanza porcentajes tan altos como los presentados en la Fig. n° 35, interceptados con menores valores de IAF, ya que estos puntos se encontrarían en la meseta de los ajustes, para aquellos ajustes lineales + meseta, y para los obtenidos por regresión lineal, estarían potencialmente formando la meseta en el porcentaje de intercepción.

Figura 36. Relación entre el porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi, %) y los valores máximos del índice de área foliar (IAF máximo, cm cm^{-2}), para todos los tratamientos diferenciados en el diseño experimental.



T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

4.1.1.7 Absorción de radiación solar y conversión en materia seca

En la Fig. n° 37, se presenta la relación entre la materia seca aérea acumulada en función de la radiación fotosintéticamente activa absorbida acumulada (RFAa, MJ m^{-2}), a partir del estado V7. La pendiente, o coeficiente de regresión, de esta relación lineal, es la eficiencia en el uso de la radiación (EUR). El valor obtenido es un promedio para el ciclo del cultivo. La regresión fue forzada a pasar por el origen (Gallagher y Biscoe, 1978). Esta forma de presentar la EUR debe ser analizada de una manera crítica, a pesar de los altos valores del coeficiente de determinación ($R^2 > 0.79$), ya que, la pendiente de esta regresión tiende a suavizar las variaciones en la EUR según las diferentes etapas del ciclo del cultivo, con diferente significación biológica. La EUR, en este trabajo, fue calculada con la acumulación de MST aérea. Las diferencias en la EUR entre tratamientos, puede haber estado influenciada por diferencias en la partición de MS hacia las raíces entre tratamientos (Tollenaar y Aguilera, 1992). En efecto, Plénet (1995) encontró que el coeficiente de conversión (C_b , gMS MJ^{-1}), según la partición entre la biomasa aérea y radical, varía en función de la etapa del cultivo. En su estudio, la partición de MS a las raíces representó un 50 % de la MS producida por unidad energética, durante la etapa siembra-V15, y, solamente, un 16 % durante la etapa V15-floración. Después de este momento, la partición de MS a las raíces fue despreciable. La EUR de

numerosas especies disminuye durante la etapa reproductiva de acumulación de MS (Gallagher y Biscoe, 1978; Bell *et al.*, 1987).

La relación raíz/parte aérea medidas a floración (Epígrafe 4.1.2.2) fue menor para los tratamientos regados, lo que explica que los tratamientos conducidos bajo riego, al tener una menor partición hacia las raíces, hayan tenido valores mayores de EUR. La misma tendencia se midió para los diferentes niveles de fertilización nitrogenada; los tratamientos con mayores dosis de N tuvieron una menor relación raíz/parte aérea, y también, una mayor EUR.

Durante el período de llenado de grano, la variación en la EUR, además de estar asociada con el cambio en la partición de la materia seca a raíz, está relacionada con variaciones en la capacidad fotosintética de la hoja, asociada, a su vez, con las translocaciones de N desde las hojas hacia los granos (Sinclair y Horie, 1989) y un incremento en la respiración por unidad de área foliar del cultivo (Gallagher y Biscoe, 1978). Los valores de EUR son específicos de cada especie. Para cultivos como el girasol, la disminución de la EUR en la etapa de llenado de granos se debe también a la alteración del costo de síntesis de la MS (Hall *et al.*, 1994).

La EUR no presentó diferencias entre las diferentes formas de programación de riego (Prop y Prpc), pero sí entre éstas y el tratamiento de secano (Sec). Los valores medidos fueron de 4.33, 4.43, y 4.01 g MS MJ⁻¹, para Prop, Prpc y Sec, respectivamente Fig. n° 37a, Tabla n° 26. En los tratamientos de secano, la EUR fue un 9.5 y 8 % menor con respecto a Prop y Prpc, respectivamente. Andrade *et al.*, (1993a,b), encontraron valores de EUR para el sureste bonaerense de entre 2.63 y 4.09 para el período siembra-floración, y para diferentes fechas de siembra y años de ensayo. Valores de EUR de 3.3 g MJ⁻¹ fueron hallados por Williams *et al.* (1965), y de 2.27 g MJ⁻¹ Andrade *et al.* (1996). Kiriya *et al.* (1989) y Prince (1991) muestran que existe gran variabilidad entre los valores de EUR hallados en la bibliografía. Es importante señalar que la medición directa en el presente trabajo de la RFAa, en ambos ambientes, tiende a subestimar la EUR post-floración, debido a que computa la absorción de hojas senescentes (Gallo *et al.*, 1993).

Los valores de EUR para la etapa de llenado de grano fueron menores, pero se mantuvo la tendencia, ya que no se midieron diferencias entre los tratamientos de riego, pero sí entre éstos y los de secano. Los valores obtenidos en la etapa de llenado fueron de 3.15, 3.69, y 2.50 g MS MJ⁻¹ para Prop, Prpc y Sec, respectivamente. Un déficit hídrico afecta varios aspectos del desarrollo, crecimiento y rendimiento del cultivo (Hsiao, 1973; Hsiao *et al.*, 1976). Es difícil de determinar cual es el principal efecto del estrés hídrico en el comportamiento de la planta en el campo. Una aproximación es considerar el crecimiento del cultivo en términos de radiación interceptada por el canopeo, y la eficiencia en su utilización (Monteith, 1977). Resultados de un trabajo realizado en leguminosas con tres niveles hídricos ponen de manifiesto que, en presencia de un déficit hídrico, la EUR disminuye en un 20 y 75 %, dependiendo del momento de ocurrencia de la misma (Muchow, 1985). La disminución encontrada en el presente trabajo en la EUR, durante el período de llenado de grano, fue del 20 y 32 % en los tratamientos de secano con respecto a Prop y Prpc, respectivamente. La ocurrencia de un estrés hídrico en etapas tempranas de desarrollo disminuirá la expansión foliar, llegando el un cultivo con menor IAF en etapas tardías de desarrollo, su efecto será sobre el cierre estomático y en la aceleración de la senescencia.

Cuando se analizan los diferentes niveles de fertilización nitrogenada, se encuentran valores mayores de EUR, para todo el ciclo del cultivo, para la dosis mas

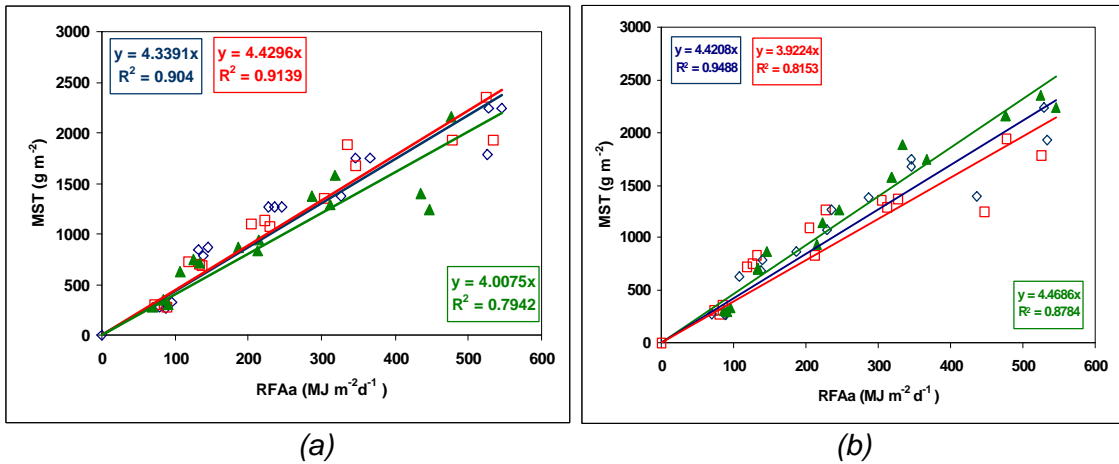
alta de nitrógeno, Fa, 4.47 g MJ⁻¹, y, en orden decreciente, 4.42 y 3.92 g MJ⁻¹ para Fi y Fn, respectivamente (Fig. 37b, Tabla 26). Uhart y Andrade (1995) encuentran disminuciones en la EUR en la floración, debidas a la presencia de una deficiencia nitrogenada, de entre 7 y 51 %. Resultados similares fueron hallados por Girardin *et al.* (1987) y Muchow y Davis (1988). En el presente trabajo, la deficiencia nitrogenada produjo una reducción del 12 y 11% en la EUR, con respecto a los niveles Fa y Fi, respectivamente. El efecto de la deficiencia nitrogenada fue mas marcado en la reducción de la EUR que el de la deficiencia hídrica. Los valores de EUR para la etapa de llenado de grano fueron de 2.50, 3.29, y 4.00 g MS MJ⁻¹ para Fn, Fi, y Fa, respectivamente.

El maíz muestra una alta sensibilidad en la EUR frente a diferentes niveles de N, es decir, variaciones en la EUR con cambios pequeños en la concentración de N foliar. Concentraciones muy altas de N foliar, cercanas a 1.2 g m⁻², se corresponden con los máximos valores de EUR; incrementos de N por encima de estos valores tendrán respuestas pequeñas en las variaciones de la EUR. Es claro que, si la tasa de N aportada para el crecimiento de nuevas hojas es restringida, la cantidad de área foliar producida también será restringida (Novoa y Loomis, 1981; Radin, 1983; Lemcoff y Loomis, 1986). Concentraciones más altas de N foliar están asociadas con tasas fotosintéticas mas altas a nivel hoja y estudios teóricos muestran que, también, aumenta la fotosíntesis a nivel del canopeo (Montheith, 1972). Esta es, posiblemente, la causa de la diferencias en la pendiente entre los niveles nitrogenados (Gallagher y Biscoe, 1978), (Fig. n° 37b).

La tasa de acumulación de MST varia en proporción directa con la proporción de radiación interceptada (Sinclair *et al.*, 1989), y ésta con el IAF. Por lo tanto, las condiciones hídricas y nitrogenadas que produjeron valores de IAF inferiores al crítico resultaron en valores menores de EUR, debido a que una fracción elevada del IAF está sometida a un nivel de radiación cercano al de saturación fotosintética. Estas hojas, que están lumínicamente saturadas, son menos eficientes que aquellas hojas sombreadas. A medida que la proporción de hojas sombreadas aumenta, la EUR aumenta (Sinclair *et al.*, 1989).

Considerar el crecimiento en términos de la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida, y la eficiencia con que el cultivo la transforma en MST, es fisiológicamente mas relevante, y analíticamente mas fructífero que usar los análisis de crecimiento tradicionales (Gallagher y Biscoe, 1978). Existe una relación entre el número de granos y la radiación interceptada después de la antesis (Kiniry *et al.*, 1985, Otegui, 1997, II). Las mayores pérdidas en el número de granos por espiga ocurren en plantas sombreadas durante la fase "lag" de llenado de grano (Kiniry *et al.*, 1985). La producción de granos depende de la radiación disponible por planta después de floración. Es posible que la producción global de la planta sea afectada por sus condiciones de crecimiento en estados previos a la floración, sin que ésto tenga consecuencias sobre la producción de granos (Ruget, 1989).

Figura 37. Relación entre la materia seca acumulada (MST) y la radiación fotosintéticamente activa absorbida acumulada (RFAa) durante el ciclo del cultivo. (a) comparación entre niveles hídricos: Sec Prpc, Prop; (b) comparación entre niveles nitrogenados; Fa, Fn, Fi.



Nota= Los ajustes fueron realizados utilizando la técnica de la regresión lineal, resultando los modelos altamente significativos.

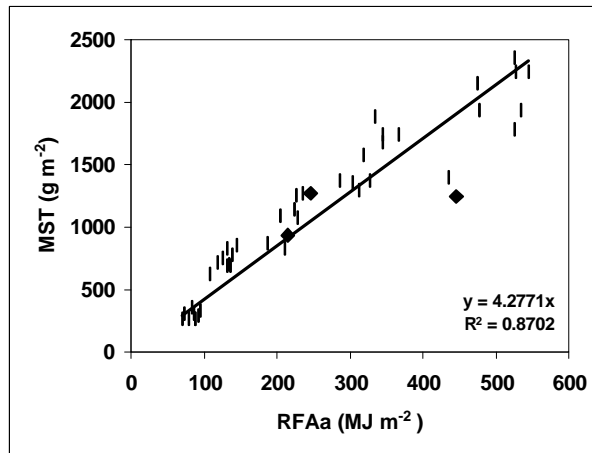
Tabla 26. Eficiencia en el uso de la radiación fotosintéticamente activa (EUR), para todo el ciclo de cultivo, y los diferentes niveles de agua y nitrógeno expresados en g MJ^{-1} .

Agua		Nivel de significación
Nivel	EUR (g MJ^{-1})	
Prop	4.33	NS
Prpc	4.43	
Sec	4.01	
Nitrógeno		**
Fa	4.47 a	
Fi	4.42 a	
Fn	3.92 b	

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, NS= no significativo. Prop= riego óptimo; Prpc= riego en el período crítico; Sec= seco; Fn= nivel normal de fertilización; Fi= nivel intermedio de fertilización; Fa= nivel alto de fertilización.

El análisis de todos los niveles hídricos y nitrogenados confundidos da como resultado una eficiencia en el uso de la radiación media para todas las situaciones fue de 4.28 g MJ^{-1} (Fig. 38). La regresión fue forzada al origen. Este valor es una media para este ambiente, que confunde los diferentes niveles hídricos y nutricionales generados.

Figura 38. Relación entre la materia seca acumulada (MST) y la radiación fotosintéticamente activa absorbida acumulada (RFAa), durante el ciclo del cultivo para todos los tratamientos del diseño experimental.



Nota= El ajuste fue realizado utilizando la técnica de la regresión lineal, resultando los modelos altamente significativos.

4.1.1.8 Acumulación y partición de fotoasimilados

En la presente Tesis Doctoral, se alcanzaron altos valores de intercepción de la RFA, cuando los tratamientos no tuvieron deficiencias hídricas ni nitrogenadas, con valores también altos de EUR, que permitieron alcanzar valores altos en la producción de MST para el ambiente argentino de Pergamino. En el presente epígrafe, se analiza cómo fue la acumulación y partición de esa MST acumulada.

En la Figura n° 39, se presenta la evolución de la materia seca acumulada de la espiga (MSe) y del resto de órganos aéreos (MSne), después de la aparición de estigmas (DDFF). El análisis ha sido realizado comparando niveles hídricos para cada nivel de N. Esta relación permite determinar la materia seca alojada en la espiga después de la floración femenina.

Con respecto al nivel Fi (Fig. 39b), se puede observar que, con esta disponibilidad de N, existe una acumulación de MSne hasta 30 DDFF, mientras que, para Fn (Fig. 39a), la acumulación se dio hasta 18 DDFF, momento cuando comienza la removilización, para los tratamientos T1 y T4. Este hecho indica que, ante una disponibilidad de N limitada, se reduce la capacidad del sistema fotosintético, razón por la cual la removilización comienza en forma anticipada, con respecto a niveles mayores de N disponible, para, de esta forma, asegurar el flujo de asimilados durante la etapa de llenado de grano. Los valores de acumulación de MS obtenidos por regresión lineal fueron de 13.78, 10.74, y 1.78 g m⁻² d⁻¹ para T1, T4, y T7, respectivamente. En el caso de Fn, sólo el tratamiento Sec presenta una recuperación en la asimilación de MS el día 30 DDFF, debido a la ocurrencia de lluvias, luego de un período de deficiencia hídrica. El incremento de MSne para T2, T5, y T8 fue de 10.31, 8.01, y 7.87 g m⁻² d⁻¹ respectivamente.

Para los niveles Fa (Fig. 39c), el incremento en la MSne se produjo hasta 30 DDFF para T6, mientras que en el tratamiento T9, el incremento fue hasta madurez fisiológica; posiblemente, debido al alto nivel de nutrición nitrogenada que se expresó después de la recuperación de un período de estrés hídrico, debido a la ocurrencia de lluvias. El aumento de MSne fue de 8.15, 7.17, y 5.86 g m⁻² d⁻¹ para

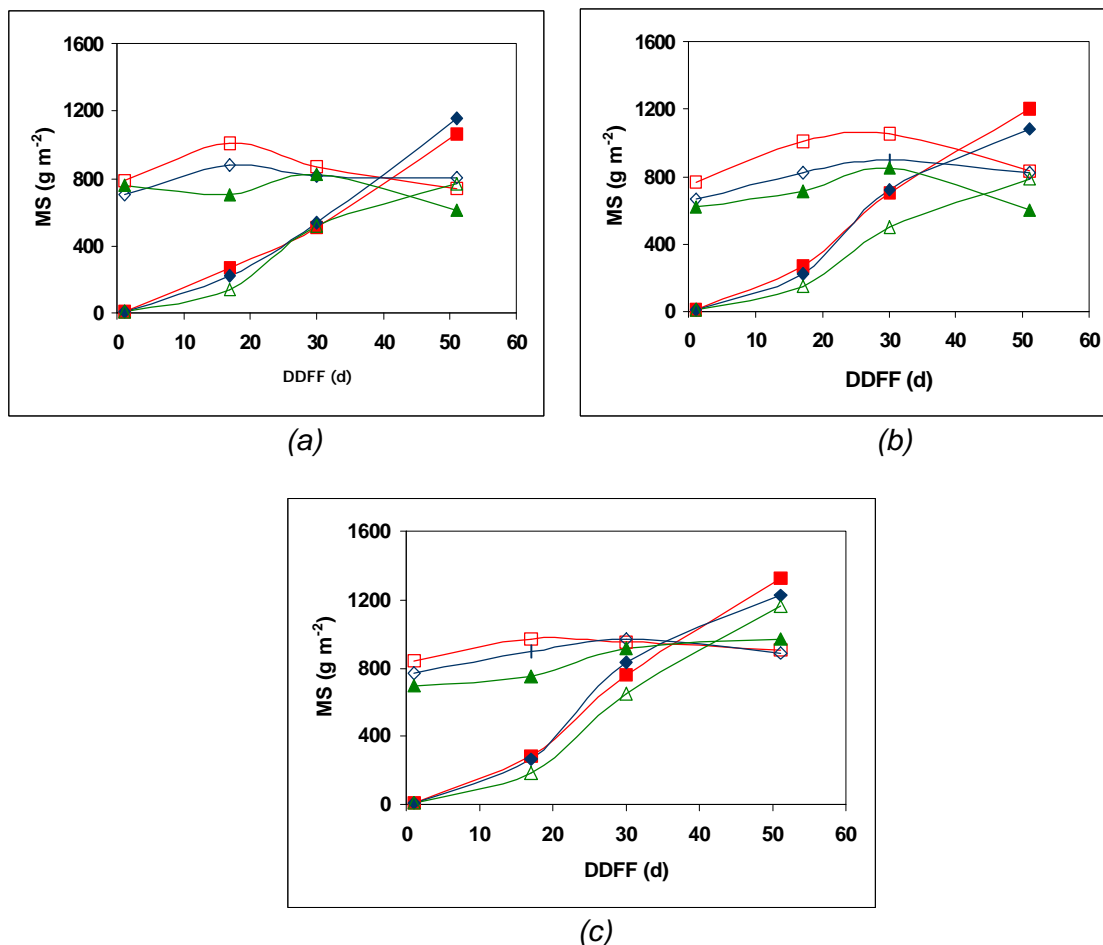
T3, T6, y T9 respectivamente. La mayor duración en la acumulación de MSne, en los tratamientos sin limitaciones hídricas postfloración, está indicando que la producción de fotoasimilados superó a la demanda, resultados que coinciden con investigaciones previas (Tollenaar, 1977).

Esta acumulación de MS representa, en promedio, un 30 % de la materia seca acumulada a floración, con valores que oscilan entre 40 y 7 %. Valores similares fueron hallados por Plénet (1995). Luego de este período de acumulación, el peso de la MSne disminuye hasta R6, progresivamente. El ritmo de pérdida de MS, obtenido por regresión lineal, para la MSne fue de 7.72, 2.01 y 15.97 g m⁻² d⁻¹ para T1, T4 y T7, respectivamente. El estudio de removilización de MS se realizó a partir de la evolución de cantidades de MSne en postfloración. En ausencia de marcadores, estos valores son de transferencias aparentes (Plénet, 1995). Para los niveles que recibieron menor dosis de N (Fn), la removilización comienza antes que en los tratamientos fertilizados con mayores aportaciones de nitrógeno.

Para T2, T5, y T8, los valores hallados fueron de 10.5, 3.59, y 11.87 g m⁻² d⁻¹, respectivamente. Para T3 y T6, la removilización fue de 2.02 y 3.99 g m⁻² d⁻¹, respectivamente. Para el tratamiento T9, posiblemente debido a un error en el muestreo final de MS, el incremento de la misma se midió hasta MF. Otra posible causa para explicar este hecho es que, como encuentran Girardin *et al.*, (1985) si el N es provisto nuevamente después de este período de estrés, se retrasa la senescencia. Una explicación posible a este efecto es una compensación de las plantas estresadas caracterizada por una mayor asimilación de N-NO₃ por parte de las raíces. Esta compensación debida a la absorción de N postfloración suministra el N requerido por la espiga, sin necesidad de removilizar a partir de hojas. En el T9, la disponibilidad de N postfloración se debió a la ocurrencia de lluvias en este momento. Hall *et al.* (1981) y Schulsser y Westgate (1991, I) encuentran una rápida recuperación en la tasa fotosintética del cultivo de maíz sometido a una estrés hídrico, en, aproximadamente, 1 día, cuando los tratamientos estresados son regados nuevamente.

La removilización fue siempre mayor en los tratamientos de secano con respecto a los de riego; posiblemente, por una reducción de la capacidad fotosintética. Esta disminución en la acumulación de MS postfloración está relacionada con menores valores en la EUR, como se presenta en el Epígrafe 4.1.1.7. Estas pérdidas corresponden fundamentalmente a una removilización de reservas temporarias, esencialmente a nivel de tallo. Esta removilización asegura un papel tampon en relación al carbono proveniente de la fotosíntesis, lo que explica la regularidad del llenado de granos en condiciones naturales (Daynard *et al.*, 1969). Estos valores medidos representaron un 25, 6 y 42 % del peso final de la espiga para T1, T4, y T7, respectivamente. Para T2, T5, y T8, los porcentajes fueron de 18, 7, y 32 %, respectivamente. Mientras que, para T3 y T6 fueron de 5 y 11 %, respectivamente. En valor absoluto, la removilización tuvo una variación entre 68 y 543 g m⁻², probablemente debida a las diferentes relaciones fuente/destino de los tratamientos. El mayor valor fue para T7, en el que fue restrictivo tanto la disponibilidad hídrica como la nitrogenada. Las plantas estresadas mostraron una mayor removilización desde las partes ne. Estos resultados son coincidentes con los hallados por Uhart *et al.* (1995). Los porcentajes fueron calculados sin tener en cuenta las pérdidas por respiración, que han sido estimadas por Ruget (1991) en 1 g m⁻² d⁻¹. Los valores obtenidos difieren de los utilizados en el modelo CERES-maize (20%), aunque, en este modelo, el porcentaje de removilización es calculado a partir del peso de tallo a floración. La repartición de asimilados depende también de la densidad del cultivo, que modificará la radiación disponible por planta (Ruget, 1989).

Figura 39. Evolución de la acumulación de la materia seca de la espiga (MSe) y de la acumulación y removilización de materia seca en el resto (MSne) para los diferentes niveles hídricos dentro de cada nivel nitrogenado: (a) Fn, (b) Fi, y (c) Fa. Prop MSne, Prpc MSne, Sec MSne Prop MSe, Prpc MSe, Sec MSe



DDFF= días desde la floración femenina. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

Los valores mayores de acumulación de MSe se dieron para los tratamientos Prop, en los niveles Fi y Fa, mientras que, para Fn, el tratamiento Prpc fue el de mayor valor en la acumulación de MSe. La mayor diferencia en la acumulación de Mse se midió para el nivel Fi, y fue de 419 g m⁻², menor para T8 con respecto a T2. El nivel Fa fue el que presentó menores diferencias entre tratamientos en los valores de MSe finales. Los menores valores de acumulación de Mse en los tratamientos de secano, con respecto a los de riego, influyeron en la pérdida de granos, debido a la reducción en la provisión de fotosimilados a la espiga (Epígrafe 4.1.1.9). Esta menor acumulación está indicando una reducción en la tasa fotosintética en los tratamientos sometidos a estrés hídrico (Schulsser y Westgate, 1991 II).

La acumulación y removilización dependen de la relación fuente/destino, que, a su vez, depende de la interacción genotipo-ambiente, que puede ser alterada por factores de manejo, como son la densidad de siembra, nutrientes, agua y otros factores. Los cambios en la relación fuente/destino, por una deficiencia hídrica o nutricional, afectarán la partición de C durante la etapa de llenado de granos, ya que existe una acumulación de carbohidratos en el tallo cuando los destinos son limitantes, o una removilización cuando la fuente es limitante (Daynard *et al.*, 1969; Christensen *et al.*, 1981; Uhart y Andrade, 1995). En

el presente trabajo, se encontraron modificaciones en la partición de C durante la etapa de llenado de granos, debidas tanto a restricciones en la nutrición nitrogenada como en la disponibilidad hídrica.

El híbrido utilizado en este ambiente, Pergamino, Argentina, es mas dependiente de la removilización para el llenado de granos (Maddoni *et al.*, 1998), ya que es de mayor número de granos y de menor tamaño (Epígrafe 4.1.1.9), con respecto al híbrido utilizado en el ambiente II (Albacete, España).

4.1.1.9 Crecimiento del grano

a) Tasa de llenado del grano

En las primeras semanas posteriores a la floración femenina, el grano fecundado acumula poco peso, ya que se encuentra en una fase activa de división celular; esta etapa se denomina fase "lag". Condiciones desfavorables en esta etapa disminuyen el tamaño potencial del grano (Jones *et al.*, 1985). La fuerza potencial de los destinos para la transferencia de asimilados al grano queda determinada en este momento (Reddy and Daynard, 1983).

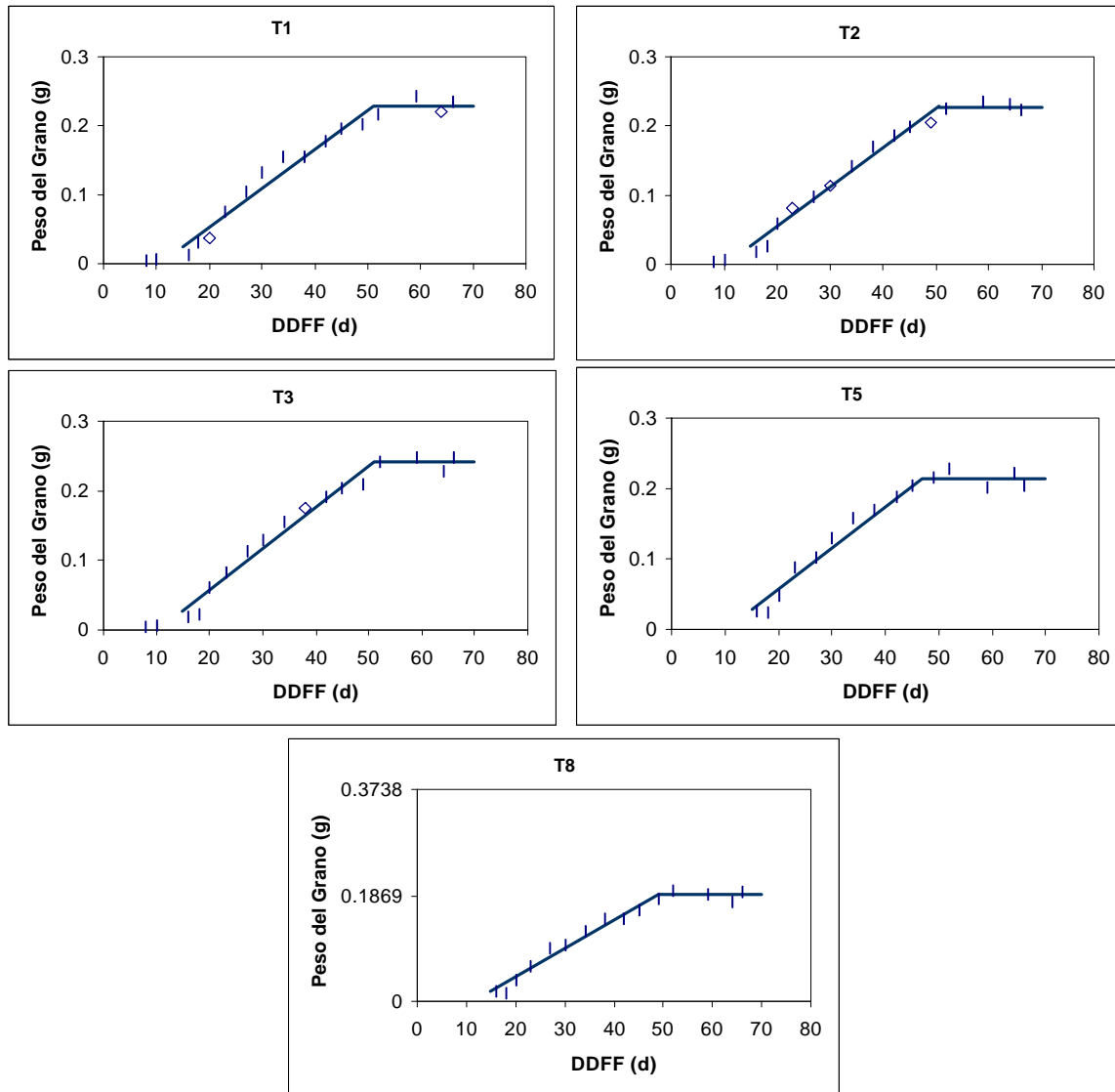
Luego de este período, comienza la etapa efectiva de llenado de grano; la tasa de llenado en esta etapa es relativamente constante, a menos que exista un déficit de asimilados almacenados para translocar durante el llenado de grano (Ritchie *et al.*, 1991). Esta etapa se caracteriza por la duración y la tasa de crecimiento del grano.

En este ambiente (Pergamino, Argentina), las mediciones de llenado de grano se hicieron en los tratamientos conducidos con el nivel hídrico Prop, y los tres niveles nitrogenados, y, para Prpc y Sec, con el nivel de fertilización nitrogenada intermedia (Fn) con el objetivo de realizar las comparaciones tanto entre niveles hídricos como nitrogenados.

Para los tratamientos analizados, no se encontraron diferencias en la duración de la etapa "lag", que fue de 16 días, correspondiente a un Tiempo Térmico de 243 °C (Fig. 40). Ni el efecto de los diferentes niveles nitrogenados ni el de los hídricos logrados tuvieron influencia en la duración de la etapa "lag". La acumulación de materia seca en grano fue afectada por el estrés hídrico (Fig. 40; T8). La velocidad de llenado de grano es menor en condiciones limitantes. Esta menor tasa puede deberse a la disponibilidad de asimilados para el llenado o a la cantidad de los mismos. El flujo de asimilados hacia grano, generalmente, no es limitante, por lo que, entonces, la cantidad de los mismos limita el llenado de los granos (Ruget, 1991). Los tratamientos en los que la disponibilidad de N fue limitada (T1, con respecto a T2 y T3), o tuvieron una deficiencia hídrica (T8, con respecto a T2 y T5), alcanzaron menores tasas de llenado (Fig. 40; Tabla 28).

La acumulación de MS en el grano depende, entre otros factores, de la tasa y la duración del crecimiento del cultivo, y de la asimilación de reservas desde otros órganos de la planta. Una disminución en la provisión de asimilados en esta etapa, o una limitación térmica, afecta el tamaño potencial del grano. Una limitación en la transferencia de asimilados al grano adelanta la madurez fisiológica (R6) (Daynard, 1972; Tollenaar y Daynard, 1978; Reddy y Daynard, 1983; Jones *et al.*, 1985).

Figura 40. Evolución del peso de grano para los tratamientos T1, T2, T3, T5, y T8, en función de los días transcurridos desde la floración femenina (DDFF).



T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T5= Prpc, Fn; T8= Sec, Fn.

En la Tabla N° 27 se presentan los modelos de ajuste (regresión lineal + meseta) para la tasa de llenado de grano para los diferentes tratamientos analizados, con sus correspondientes coeficientes y estadísticos más importantes.

Tabla 27. Modelos de ajuste para la tasa de llenado de grano (regresión lineal + "plateau"); coeficientes y estadísticos más importantes.

Tratamiento	Meseta	c (x)	d	Nivel de significación	R ²
T1	si $x > 51.2$ entonces $y = 0.228$	0.005621	-0.06016	*	0.96
T2	si $x > 50.7$ entonces $y = 0.228$	0.005679	-0.0596	*	0.98
T3	si $x > 50.9$ entonces $y = 0.241$	0.005966	-0.06261	**	0.97
T5	si $x > 47.0$ entonces $y = 0.214$	0.005810	-0.05898	*	0.97
T8	si $x > 49.1$ entonces $y = 0.188$	0.005009	-0.05801	**	0.97

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$; c,d = coeficientes de los modelos de ajuste. R²= coeficiente de determinación
T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T5= Prpc, Fn; T8= Sec, Fn.

El rendimiento en grano depende, en parte, de la cantidad de carbohidratos solubles almacenados, y de la distribución de los mismos en fotoasimilados de reserva y estructurales (Ruget, 1991).

En la Tabla n° 28, se presentan las tasas de acumulación de MS en grano durante el período efectivo de llenado de los granos (etapa lineal de acumulación de peso del grano) para los tratamientos analizados.

Tabla 28. Tasa de acumulación de materia seca, y duración del llenado efectivo del grano, en los tratamientos objeto de estudio.

Tratamiento	Tasa de llenado (mg d ⁻¹)	Duración del período efectivo de llenado de los granos (d)
T1	5.6	51
T2	5.7	51
T3	6.0	51
T5	5.8	47
T8	5.0	49

T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T5= Prpc, Fn; T8= Sec, Fn.

La tasa de llenado de los granos mostró diferencias estadísticamente significativas entre los niveles hídricos y no entre los niveles nitrogenados, ni para la interacción agua x nitrógeno (Tuckey, α 0.05). En la Tabla n° 10 (Anejo 2), se presentan los resultados del análisis de varianza de dos factores para las tasas de llenado. Un déficit hídrico después de la floración, puede provocar un desecamiento muy rápido del tallo y la detención de la translocación (Bloc *et al.*, 1983). Cirilo *et al.* (1996) encuentran para el sureste bonaerense tasas de llenado de grano que oscilan entre 5.7 mg gr⁻¹ d⁻¹, para siembras tardías en el mes de diciembre, y 7.4 mg gr⁻¹ d⁻¹, para siembras en el mes de noviembre, con duraciones del período de llenado efectivo de grano de 40.4 y 30.9 días, respectivamente.

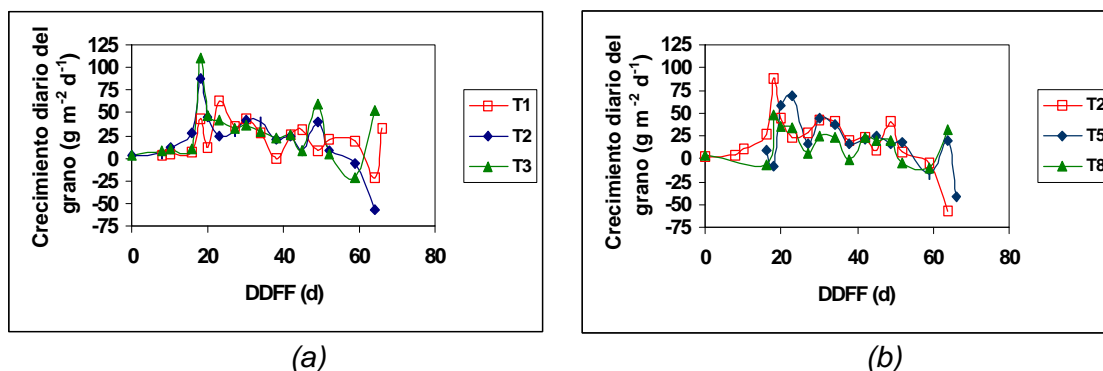
La duración efectiva de la etapa de llenado de los granos es el cociente entre el peso final del grano y la tasa de crecimiento de los granos durante la etapa lineal de acumulación de peso. Esta duración fue menor en los tratamientos con menor disponibilidad hídrica, T5 y T8. Westgate y Thomson Grant (1989), encontraron que los estados hídricos limitantes para el grano pueden acortar la etapa de llenado de grano. Esto puede ocurrir porque la provisión de fotoasimilados a los granos durante el período de llenado es baja debido a una limitación hídrica. Existen numerosos trabajos que confirman como la duración de esta etapa en el cultivo de maíz está regulada, no sólo por la fuente fotosintética disponible, sino también por la temperatura (Derieux y Bonhomme, 1982 II; Kiniry y Bonhomme, 1991). En el presente trabajo, la temperatura no fue limitante ni durante la etapa "lag" (24.3 °C, temperatura media del aire), ni durante la etapa de llenado efectivo de grano (23.3 °C, temperatura media del aire). Las temperaturas estuvieron por encima de los umbrales que afectan la EUR (16°C), o la partición de MS a grano (19 °C) (Wilson *et al.*, 1995).

Cirilo y Andrade (1996) encontraron valores de 0.3 mg d⁻¹ de incremento en la tasa de llenado de grano por cada °C de incremento de la temperatura media, entre 15 y 26 °C. La duración de esta etapa depende del peso final que puede lograr el grano y de la mayor o menor velocidad en alcanzar ese peso, en función de la temperatura. El peso medio de los granos resulta entonces del efecto combinado que ejercen dos factores concurrentes: la duración del período efectivo de llenado y la tasa de llenado.

b) Tasa de crecimiento del grano

La tasa de crecimiento del grano alcanzó valores superiores en los tratamientos con las mayores dosis de nitrógeno (Fig. 41). Las tasas de crecimiento del grano están relacionada con la duración del período “lag” (Maddoni *et al.*, 1998). Cuanto mayor es la duración de la etapa “lag”, mayores son las tasas de crecimiento del grano. Para el ambiente argentino, no se midieron diferencias en la duración de la etapa “lag” debidas al agua, ni al nitrógeno, y, consecuentemente, como se muestra en la Figura n° 41, las tasas de crecimiento del grano fueron similares para los tratamientos analizados.

Figura 41. Evolución de la tasa de crecimiento del grano para (a) los tres niveles nitrogenados dentro de la programación de riego Prop, y (b), los tres niveles hídricos en el nivel nitrogenado Fi.

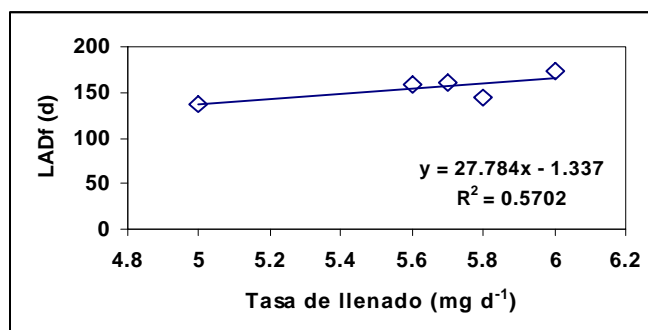


DDFF= días desde la floración femenina; T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T5= Prpc, Fn; T8= Sec, Fn.

4.1.1.10 Relación entre la tasa de llenado de grano y la duración del área foliar

Además de la temperatura, otro factor importante que influye en la duración y la tasa de llenado es la duración de área foliar (LADf) (Fig. 42). Como esta tasa dependerá de la relación fuente/destino (Epígrafe 4.1.6), la capacidad de mantener el sistema fotosintetizador asegurará una tasa de llenado para lograr altos rendimientos. Para este ambiente y los tratamientos estudiados, se alcanza un techo en la relación existente entre el índice LADf y la tasa de llenado del grano (Fig. 42), alcanzándose las mayores tasas, de 6 mg d^{-1} , para duraciones de área foliar postfloración de 170 días. En el cultivo de trigo, la tasa de senescencia de los tejidos fotosintetizadores está relacionada al crecimiento del grano (Wardlaw, 1990).

Figura 42. Modelo lineal que relaciona la duración del área foliar (LADf, días) con la tasa de llenado del grano (mg d^{-1}).



LADf= duración del área foliar posterior a la floración. Los ajustes fueron realizados utilizando la técnica de la regresión lineal, resultando los modelos altamente significativos.

4.1.1.11 Rendimiento y sus componentes

El rendimiento del cultivo de maíz puede ser descompuesto en dos elementos principales: el número de granos por m^2 (NG m^{-2}), y el peso unitario de grano (PUG). La componente de rendimiento NG m^{-2} sintetiza los mecanismos relacionados con la definición del número de órganos reproductores que se realiza en etapas sucesivas: número de plantas, número de espigas por planta y número de granos por espiga. Este último se descompone en número de hileras por espiga y número de granos por hilera (Fleury, 1990). El NG m^{-2} queda determinado en el estado límite de aborto de granos, es decir aproximadamente, 15 a 20 días después de la floración. La componente PUG resulta de la competencia entre el número de granos y la oferta de fotoasimilados (Plénet, 1995). Se ha demostrado que el NG m^{-2} es el principal componente del rendimiento en grano del cultivo de maíz en diferentes ambientes (Tollenaar, 1977; Fischer y Palmer, 1984; Hawkins y Cooper, 1981).

El período crítico para la definición del número de granos comprende desde 1 a 2 semanas, antes de floración femenina hasta 3 semanas posteriores (Tollenaar, 1977; Kiniry y Ritchie, 1985; Tollenaar *et al.*, 1992). La translocación de fotoasimilados a la espiga durante este período, está altamente relacionado con la definición del NG m^{-2} . Una deficiencia de nitrógeno afecta esta translocación, ya que disminuye los valores de índice de área foliar (IAF), la duración del área foliar (Novoa y Loomis, 1981, Sinclair y Horie, 1989) y, en consecuencia, la intercepción de la radiación y la eficiencia en el uso de la misma.

El resultado del análisis estadístico para el rendimiento y sus componentes se presenta en la Tabla n° 11 (Anejo 2), y los valores en la Tabla n° 29. La interacción entre los factores agua y nitrógeno no resultó significativa (Tuckey $\alpha=0.05$) ni para el rendimiento ni para sus componentes. Las diferencias en rendimiento, NG m^{-2} y PUG fueron altamente significativas cuando se analiza el factor agua. La mínima diferencia significativa para el rendimiento tuvo un valor de 1100 kg ha^{-1} . Las diferencias en rendimiento y NG m^{-2} , también fueron altamente significativas debido al factor nitrógeno, pero esta diferencia se observó principalmente para el PUG.

Existe una diferencia en el NG m^{-2} debida a la presencia de un estrés hídrico, ya que los tratamientos de secano (T7, T8, y T9) fueron los que menor NG m^{-2} presentaron. La presencia de un déficit hídrico en prefloración y durante las etapas tempranas del desarrollo del grano disminuye el número de granos por espiga en el cultivo de maíz (Hall *et al.*, 1981). La disminución en el número de granos puede ser debida a una asincronía en la floración, desarrollo anormal del embrión, y fallas en el desarrollo después de la polinización. Westgate y Boyer (1986a,b) sugieren que la inhibición de la fotosíntesis a bajos potenciales xilemáticos, sumado un contenido bajo de reservas durante la polinización, pueden causar la inhibición del desarrollo del grano, debido a la presencia de una fuente limitada. El bajo potencial agua del ovario reduce su capacidad para atraer asimilados, lo que está indicando también, una limitación del destino. La reducción del NG m^{-2} en el presente trabajo debida al estrés hídrico fue de 28 y 17 %, para el nivel Sec con respecto a Prop y Prpc, respectivamente; de la misma magnitud, tanto para Fn como para Fi. Dentro del nivel Fa, la reducción fue mayor, de 31 y 22 % en el tratamiento de secano (T9) con respecto a Prop (T3) y Prpc (T6), respectivamente. Pandey *et al.* (2000, I) encuentran reducciones de entre 20 y 50 % en este parámetro, para tratamientos de riego deficitario con respecto a un testigo. Schussler y Westgate (1991) encuentran reducciones en el número de granos por efecto de la sequía, del 48 %, en un

tratamiento que consideran de “déficit hídrico moderado”, mientras que el “déficit hídrico severo” impidió la formación de grano; el objetivo de ambos tratamientos de sequía fue lograr una intensidad tal, que inhiba la fotosíntesis. La definición del NG m⁻² es afectada con potenciales xilemáticos inferiores a 10 bares durante la polinización (Westgate y Boyer, 1986a). En el día 8 desde floración femenina (DDFF), los tratamientos de secano presentaban potenciales xilemáticos cercanos e inferiores a los 10 bares, a las 5 y 21 h (Epígrafe 4.1.2.5).

Tabla 29. Rendimiento del maíz y sus componentes

<i>Tratamiento</i>	NG m⁻²	PUG (mg)	Rendimiento (kg ha⁻¹)
1	4771	206	9850
2	5729	221	12670
3	5802	220	12770
4	4163	209	8698
5	4968	211	10500
6	5134	218	11210
7	3455	154	5324
8	4116	166	6886
9	4005	169	6771

NG m⁻²= número de granos por metro cuadrado; PUG= peso unitario de grano; T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

Una limitación en la provisión de asimilados durante la etapa de llenado efectivo de grano afecta el tamaño potencial del grano (Reddy y Daynard, 1983; Jones *et al.*, 1985). Las diferencias en los valores de PUG indican que la tasa de llenado de granos no fue de la misma intensidad para todos los tratamientos, y fue afectada, principalmente, por la disponibilidad hídrica, limitada fundamentalmente por la acumulación de reservas en tallo (Epígrafe 4.1.1.8). Numerosos autores sugieren que una limitación en la removilización de fotoasimilados al grano induce a un adelantamiento de la aparición de la capa negra, afectando la duración de la etapa de llenado y el tamaño del grano (Daynard, 1972; Tollenaar y Daynard, 1978). De acuerdo a los datos obtenidos para los tratamientos de secano, fue evidente que el consumo restringido en la etapa 15 DDFF-MF para estos tratamientos, limitó el llenado de grano y, consecuentemente, redujo el PUG para esta situación hídrica.

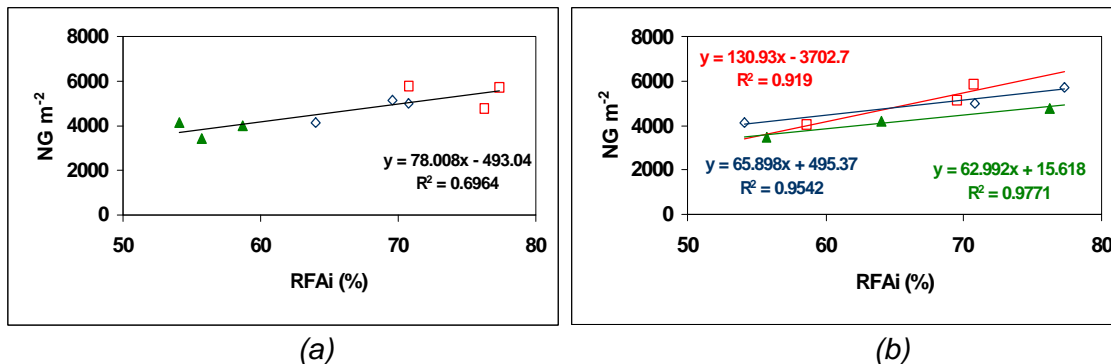
Las diferencias en el rendimiento no fueron significativas entre tratamientos debidas a la interacción agua x nitrógeno (Tabla 11, Anejo 2), pero si lo fueron para el factor agua y para el factor nitrógeno de forma independiente. Las diferencias debidas al nivel nitrogenado separan el nivel Fn (30 kg N ha⁻¹) de los dos niveles superiores (90 y 120 kg N ha⁻¹). Este resultado en el rendimiento, sintetiza los procesos involucrados en la economía del carbono, analizados en este capítulo de la Tesis Doctoral, y el resultado avala una vez mas el hecho de que, para el ambiente argentino de Pergamino, no se encontró respuesta a dosis de N superiores a los 90 kg N ha⁻¹. Las diferencias encontradas en el rendimiento, como resultado de los diferentes niveles hídricos logrados, son significativas entre las tres estrategias de programación del riego planteadas en el diseño experimental. Este resultado no avalaría la hipótesis de que, regando en el momento crítico a la falta de agua para el cultivo de maíz, en este ambiente, se logran altas eficiencias en el uso del agua por parte del cultivo sin disminuir los rendimientos. Sin embargo, para este año y debido a la magnitud del déficit hídrico, y a que la conducción del riego fue realizada en tiempo real, es importante aclarar que, en ocasiones, al realizar la medición de humedad, el nivel hídrico se encontraba por debajo del umbral objetivo (Epígrafe 4.1.2.1), el riego en el período crítico fue deficitario y afectó el rendimiento del cultivo. Resultados previos en este ambiente (Maturano *et al.*, 1997), mostraron que,

con deficiencias hídricas moderadas, la aplicación del riego siguiendo este criterio de programación, con una buena disponibilidad hídrica anterior a floración, combinada con los aportes hídricos a través del riego en el período crítico a la falta de agua del maíz, determinaron que no hubiera diferencias estadísticamente significativas para rendimiento y sus componentes, entre un tratamiento permanentemente regado y un tratamiento regado a partir del inicio del período crítico a la falta de agua. En este mismo trabajo, y para el mismo híbrido en condiciones de riego, se obtuvieron rendimientos comprendidos entre los 14000 y 10000 kg ha⁻¹. La diferencia en rendimiento entre los niveles Prop y Prpc, para este año de ensayo, no se deben al momento de aplicación del riego sino a la magnitud del mismo.

4.1.1.12 Número de granos producidos por unidad de superficie y radiación fotosintéticamente activa interceptada y absorbida

El NG m⁻², también está estrechamente relacionado con la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi). Kiniry y Knievel (1995) definen una relación entre el NG y la RFAi, donde: $NG = 165 + 253 RFAi \text{ pl}^{-1}$ (radiación fotosintéticamente activa interceptada por planta), considerando la RFAi 15 días previos a la floración femenina. En la Figura n° 43, se presentan la relación para los diferentes niveles hídricos y nitrogenados entre el NG m⁻² y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) en floración (73 DDE).

Figura 43. Modelos lineales para los diferentes niveles hídricos y nitrogenados, que relacionan el número de granos por unidad de superficie (NG m⁻²) y el porcentaje de la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi, %) en floración: (a) comparación entre niveles hídricos: Sec Prpc, Prop; (b) entre niveles nitrogenados Fa, Fi, Fn.



Nota= Los ajustes fueron realizados utilizando la técnica de la regresión lineal, resultando los modelos altamente significativos.

Los tratamientos conducidos con la programación de riego Prop (Fig. 43a), son los que mostraron una respuesta a la fertilización mas marcada con respecto a Prpc y Sec. Considerando todos los niveles hídricos en conjunto, para este ambiente por cada 10 % de incremento de la RFAi en floración existe un incremento de 780 g m⁻².

Existe un incremento en el NG m⁻² a medida que aumenta el % RFAi, conjuntamente con el nivel nitrogenado. Los tratamientos conducidos con el nivel Prpc mostraron que, en floración, para los tres niveles nitrogenados, se había alcanzado el IAF crítico, por lo que alcanzan un NG m⁻² de 5400, como valor medio. Para los tratamientos de secano, no se encuentra una respuesta a la fertilización, para esta relación, lo que demuestra nuevamente que el factor hídrico es mas limitante que el factor nitrógeno para la expresión de la potencialidad de rendimiento

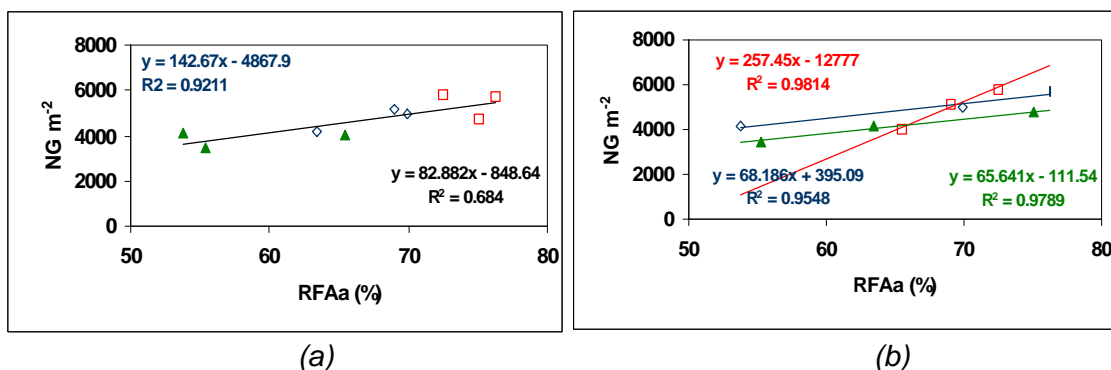
del cultivo de maíz en Pergamino, Argentina. Para este nivel el NG m^{-2} medio es de 3860.

La respuesta a la fertilización nitrogenada, es mayor para el nivel Fa, donde se incrementa en 131 gr m^{-2} por cada unidad porcentual de RFAi, para la situación analizada (Fig. n° 43b). Para Fi y Fn, la diferencia es menos marcada (66 y 63 gr m^{-2} por cada unidad porcentual de RFAi, respectivamente). Para las diferentes situaciones nitrogenadas, la expresión de este componente del rendimiento, está mas limitada por la situación hídrica.

Existe también una relación entre la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAa) alrededor del momento de floración y el NG m^{-2} . Esta relación permite estimar, de forma precoz, el rendimiento en grano. También, existen otros criterios biológicos como son la relación entre la MST o la fotosíntesis a floración, o previa, y el rendimiento en grano (Edmeades y Daynard, 1979b; Hawkins y Cooper, 1981). Fischer y Palmer (1984) encontraron que las mayores reducciones en el rendimiento del maíz ante sombreados de 22 días, se produjeron cuando este tratamiento se aplicaba alrededor de floración.

En ausencia de limitaciones nutricionales, térmicas o hídricas, la radiación solar es la principal limitante del crecimiento del cultivo (Kiniry *et al.*, 1995). En la presente investigación se muestra la relación encontrada entre la RFAa en la floración y el NGm^{-2} en presencia de una deficiencia hídrica y nitrogenada (Fig. 44).

Figura 44. Modelos lineales para los diferentes niveles hídricos y nitrogenados, que relacionan el número de granos por unidad de superficie (NG m^{-2}) y la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAa) en la floración. (a) comparación entre niveles hídricos: Sec Prpc, Prop (b) entre niveles nitrogenados Fa, Fi, Fn.



Nota= Los ajustes fueron realizados utilizando la técnica de la regresión lineal, resultando los modelos altamente significativos.

El tratamiento conducido con el nivel hídrico Prop es el único que muestra un claro incremento en el NG m^{-2} como respuesta al incremento de la RFAa en la floración, a medida que aumenta el nivel de fertilización nitrogenada (Fig. 44a). El incremento en la RFAa explica en un 92 % el incremento en el NG m^{-2} , en el tratamiento Prop. Analizando todos los niveles hídricos y nitrogenados, en su conjunto, esta relación explica en un 68 % ese incremento, siendo el mismo de 82.88 gr m^{-2} , por cada incremento unitario porcentual de la RFAa.

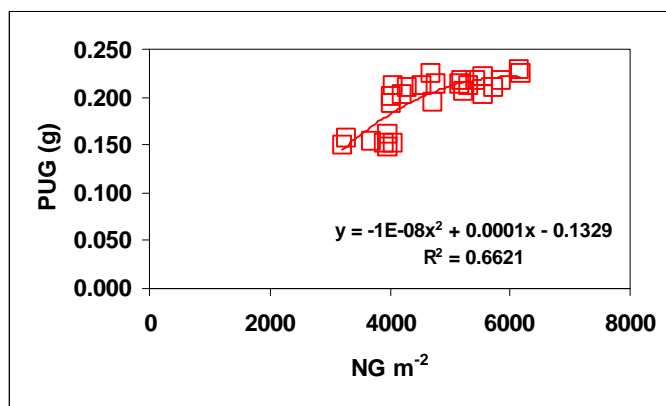
El nivel de N tiene una influencia marcada en la respuesta del NG m^{-2} a la RFAa. Los tres niveles nitrogenados estudiados responden al incremento de la RFAa en la floración, cuando aumenta el nivel hídrico, incrementando el NG m^{-2} (Fig.

44b). La mayor respuesta se midió para el mayor nivel nitrogenado Fa, siguiendo en orden decreciente, Fi y Fn, respectivamente. Para todos los niveles nitrogenados, el incremento en la disponibilidad hídrica produjo un aumento en la absorción de RFA en la floración y consecuentemente en el NG m^{-2} .

4.1.1.13 Relación entre los componentes de rendimiento

En condiciones de riego y para este híbrido, se muestra la plasticidad de incremento en el número de granos (tamaño de la espiga) sin que disminuya el peso unitario de grano, en un rango entre 4700 y 6000 gr m^{-2} , para un PUG medio de 0.216 g (Fig. 45). Por otra parte se observó que la sequía disminuyó el PUG para valores de número de grano similares medidos en condición de irrigación, probablemente debido a una insuficiencia en la fuente, determinada por un el nivel de fotosíntesis total, por una reducción del área foliar verde, por menores valores de IAF máximo, y por una mayor tasa de senescencia.

Figura 45. Peso unitario de grano (PUG,g) en función del número de granos por metro cuadrado (NG m^{-2}) para todos los tratamientos.

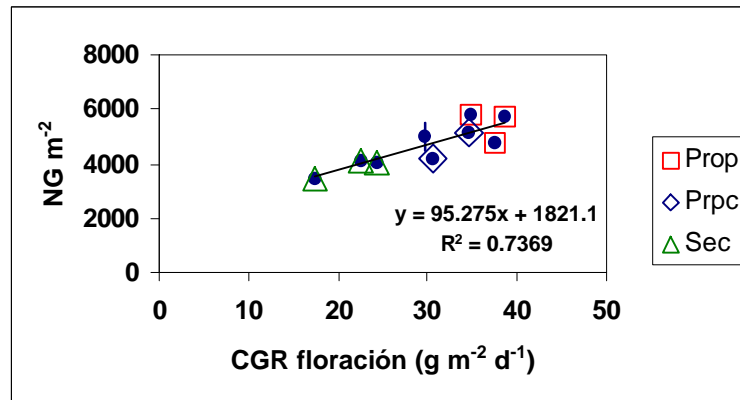


Los tratamientos que se desarrollaron en condiciones hídricas y nitrogenadas limitantes, presentaron un valor menor, tanto para el PUG como para NG m^{-2} , debido a un menor tamaño en la fuente de fotosintatos, previo y alrededor de la floración, que impactó sobre el número de granos potenciales, y en el porcentaje de cuaje de esos granos, con lo cual una disminución del IAF limitó el número de granos, tanto potenciales como reales, afectando el llenado de grano durante el período “lag”, y posteriormente.

El número final de gr m^{-2} es función de la tasa de crecimiento del cultivo a floración (Fig. 46). Esta explica significativamente, en un 74 %, el número de granos logrados. Existe un umbral de crecimiento por debajo del cual no se fijan granos.

La predicción del número final de gr m^{-2} en el modelos CERES-Maize (Jones y Kiniry, 1986) se basa en la tasa de crecimiento del cultivo previa a floración, utilizando un intervalo cuando la determinación del número de granos es sensible a un estrés, determinado para tratamientos de sombreado (Kiniry y Ritchie, 1985), y para tratamientos de sequía (Grant *et al.*, 1989).

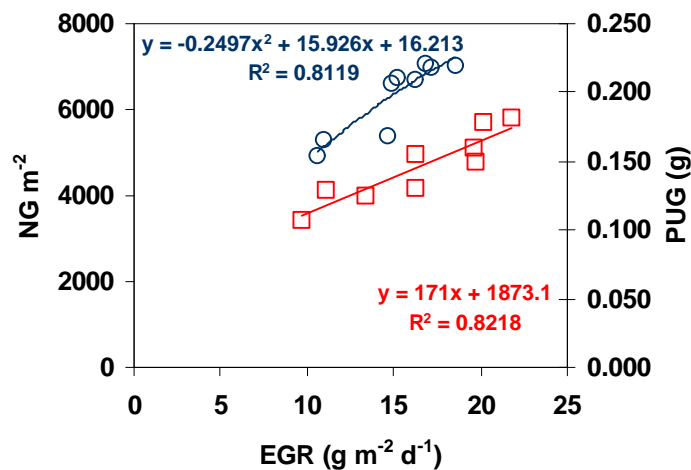
Figura 46. Modelo lineal que relaciona el número de granos por metro cuadrado (NG m^{-2}) con la tasa de crecimiento del cultivo en la floración ($\text{CGR}_{\text{floración}}$, $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$).



Nota: el ajuste fue realizado para todos los niveles hídricos en conjunto (●).
Prop= riego óptimo; Prpc= riego en el período crítico; Sec= secano

El NG por espiga parece ser independiente del grado de diferenciación floral alcanzado en R1, y más relacionado con la tasa de crecimiento de la espiga alrededor de floración (Otegui y Melón, 1997). La partición de asimilados a la espiga durante este período y el valor absoluto de fotosíntesis por planta son críticos para la definición del NG (Edmeades y Daynard, 1979; Otegui *et al.*, 1995b). Para este ambiente, el índice de crecimiento de la espiga en la floración explica significativamente un 82 % de la varianza del NG m^{-2} a través del modelo recogido en el Figura n° 47, mientras que, el índice de crecimiento total de la espiga tiene relación con el PUG, y explica, también significativamente a través de un modelo polinómico de segundo grado, un 81% de la varianza de este componente (Fig. 47).

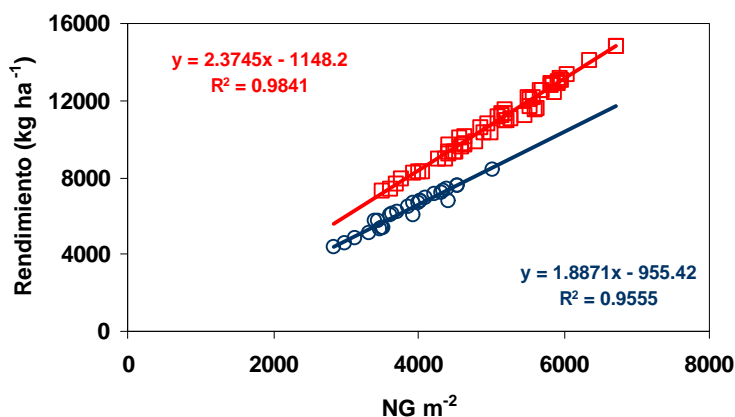
Figura 47. Relaciones existentes entre el índice de crecimiento de la espiga en la floración (EGR a floración $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y el número de granos por unidad de superficie (NG m^{-2}); y el EGR total con el peso unitario del grano (PUG, g). \bar{I} PUG y \bar{I} número de granos.



En la Figura n° 48, se presenta la relación entre el rendimiento y el NG m^{-2} , con las ecuaciones de ajuste diferenciadas para secano y riego. Este gráfico confirma, una vez más, lo citado por numerosos autores con respecto a la fuerte

relación que existe entre el número de granos por metro cuadrado y el rendimiento (Tollenaar, 1977; Hawkins y Cooper, 1981; Fischer y Palmer, 1984). Los resultados diferencian la respuesta del rendimiento en función del número de granos producidos por unidad de superficie para los tratamientos Prop y Prpc con respecto a Sec. El NG explica significativamente el rendimiento en un 98 %, en condiciones de riego, y en un 95 % en condiciones de secano. El efecto del estrés hídrico en el PUG tiene su mayor consecuencia en etapas tardías del período de llenado de grano (Claasen y Shaw, 1970). Los resultados encontrados mostraron un claro efecto del estrés hídrico sobre la tasa de crecimiento de la espiga, y en el PUG, separando los tratamientos de secano de los de regadío.

Figura 48. Rendimiento (kg ha^{-1}) en función del número de granos por metro cuadrado (NG m^{-2}) para todos los tratamientos y parcelas elementales. ○Secano Riego

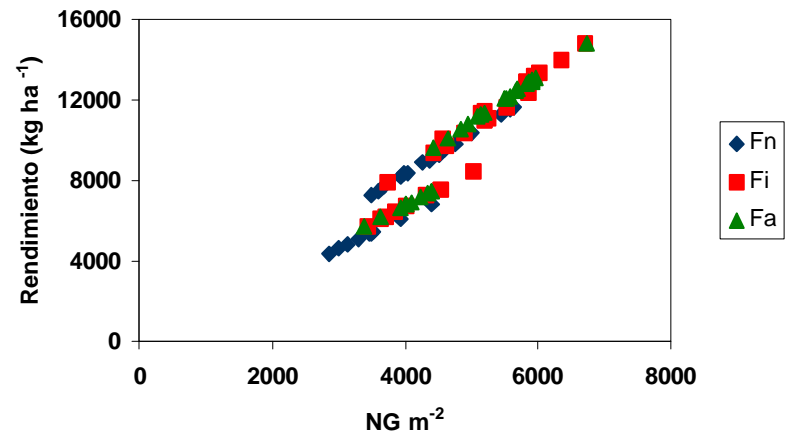


Cada 100 gr m^{-2} , el rendimiento aumenta en 237.45 kg y $188.71 \text{ kg ha}^{-1}$ en los tratamientos de riego y secano, respectivamente, considerando todos los niveles de nitrógeno confundidos. Incrementos de 370 kg ha^{-1} en el rendimiento por cada 100 gr m^{-2} , fueron hallados por Andrade *et al.* (1996), aunque trabajando en condiciones no limitantes con respecto a los factores evaluados en la presente tesis doctoral.

En la Figura n° 49, se muestra la misma relación presentada en la Figura n° 48, pero en función de los niveles nitrogenados. Se puede observar claramente que la respuesta del rendimiento al NG m^{-2} se vio afectada en mayor medida por los niveles hídricos, pero no en forma tan marcada por los niveles nitrogenados. Los niveles Fi y Fa mostraron poca diferencia entre ellos, en cuanto al rango de número de granos, para la situación de secano como de riego. La menor dosis de nitrógeno mostró el mismo comportamiento.

La relación entre el rendimiento y el número de granos producidos en la unidad de superficie, cuando se graficó para los diferentes niveles de nitrógeno aplicados, vuelve a mostrar que el principal factor limitante en este ambiente es el agua, y permite discriminar dos grupos bien definidos frente a disponibilidades hídricas contrastantes.

Figura 49. Rendimiento en función del número de granos por metro cuadrado (NG m^{-2}), representado por nivel nitrogenado.



Fn= nivel de fertilización normal; Fi= nivel de fertilización intermedio; Fa= nivel de fertilización alto

4.1.2 Efecto del agua sobre el funcionamiento del cultivo

4.1.2.1 Programación de riego y precipitaciones

El objetivo de la programación del riego (Epígrafe 3.1.6), fue el de mantener el contenido hídrico edáfico en un 30 a 50 % del agua útil (AU), en los 0.40 m de profundidad del suelo, durante todo el ciclo, en el tratamiento Prop, y durante el período crítico a la falta de agua para el cultivo de maíz, en el tratamiento Prpc. La extensión del período crítico se consideró durante el período de elongación activa de la espiga, -200 y 100°C desde floración femenina (Otegui *et al.*, 1997). Un estrés en este momento puede causar infertilidad y aborto floral y embrional, ya que es el momento de mayor sensibilidad del cultivo de maíz a la falta de agua, y determinante del rendimiento final en grano (Classen y Shaw, 1970; Moss y Downey, 1971; Westgate y Boyer, 1986a,b). En la serie de suelos considerada, se desarrolla a partir de 0.4 m el horizonte B textural (B21t). Este horizonte presenta un contenido de arcilla superior al 40 %. El objetivo de considerar de 0.4m de profundidad para realizar el balance hídrico, fue el no incorporar en el mismo el horizonte B21t. Para esta serie de suelos, se comprobó que existe una disminución del consumo en este horizonte que luego se recupera a mayor profundidad (Guevara, 1991). Por otra parte, el cultivo de maíz en este ambiente, inicia su ciclo con un buen contenido de humedad en la siembra, que para este ciclo agrícola, fue de 120 mm de AU a 1.5 m. El inicio del riego en etapas más tardías de desarrollo del cultivo favorece la profundización radicular y el aprovechamiento del AU disponible.

En la Tabla n° 30, se presentan tres etapas del ciclo del cultivo y los volúmenes de riego aplicados en esas etapas, de acuerdo a la programación de riego. Para el criterio de conducción de riego Prop, el riego se aplicó a partir del 29/11, debido a un problema con la disponibilidad del equipo. Como la disponibilidad hídrica edáfica inicial fue alta, este retraso en el inicio del riego no afectó ni el crecimiento, ni el desarrollo del cultivo. La diferencia de agua aportada entre los dos niveles de riego, de 116 mm, afectó el rendimiento en grano (Epígrafe 4.1.1.11). El efecto del déficit hídrico fue más marcado en la disminución de los rendimientos en los tratamientos de secano, con respecto a Prop y Prpc. El riego en el tratamiento Prop se inició el 17/12/1999, 10 días previos R1, y 188 °C, previos al comienzo de esta etapa. Para el período siembra-V6, la diferencia de consumo entre los niveles de riego, fue de 2 mm, lo que reafirma que la adecuada disponibilidad hídrica en la siembra, permite retrasar el inicio del riego, para, de esta forma, promover la profundización radicular y la utilización del agua y nutrientes del suelo, sobre todo en este ambiente, en el que se verifica consumo hasta los 2 m de profundidad.

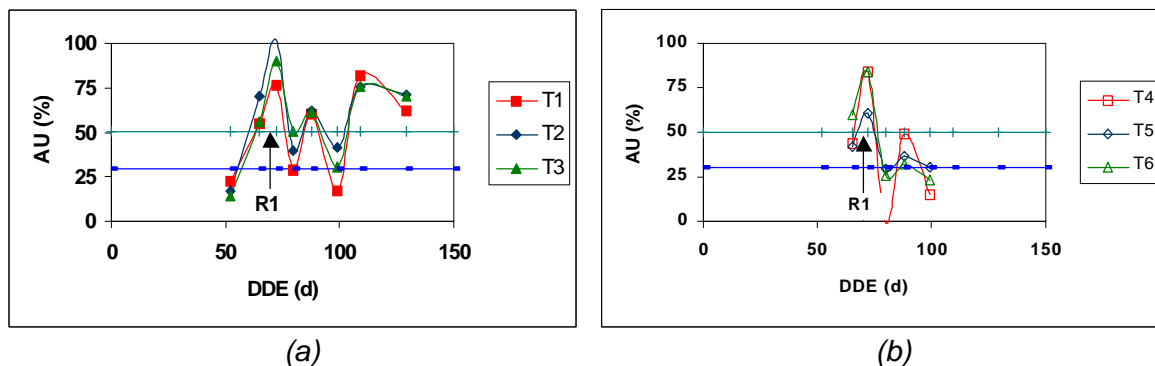
Tabla 30. Lluvias recibidas (mm) y lámina de agua de riego aplicada (mm), en las dos estrategias de programación de riego (Prop y Prpc) y su reparto porcentual en las etapas: siembra-V6 (07/10-18/11); V6-Vt (18/11-28/12); Vt-MF (R6) (29/12-15/02).

	Lluvias	Riegos		Agua total recibida	
		Prop	Prpc	Prop	Prpc
Subtotal Siembra-V6	82.40 (25 %)			82.40 (13%)	82.40 (15%)
Subtotal V6-Vt	68.60 (21 %)	192.16 (56 %)	88.15 (41 %)	260.76 (39 %)	156.76 (29 %)
Subtotal Vt-R6	174.8 (54 %)	148.02 (44%)	126.05 (59 %)	322.82 (48 %)	300.85 (56 %)
Total	325.8	340.18	214.21	655.98	540.01

V6= sexta hoja expandida; Vt= floración masculina; MF= madurez fisiológica; Prop= riego óptimo; Prpc= riego en el período crítico

En la Figura n° 50, se presenta la evolución porcentual del AU para cada programación de riego. Para la programación Prop, se logra el objetivo de mantener el % de AU en el umbral deseado, a excepción del día 52 DE, en que, el contenido hídrico fue inferior al umbral del 30 %; sin embargo, para el tratamiento Prpc, el contenido hídrico después de R1 estuvo por debajo del umbral objetivo.

Figura 50. Evolución del contenido del agua útil (AU, %), en función de los días transcurridos desde la emergencia (DDE, d); en las dos estrategias de programación de riego: (a) Prop, (b) Prpc.

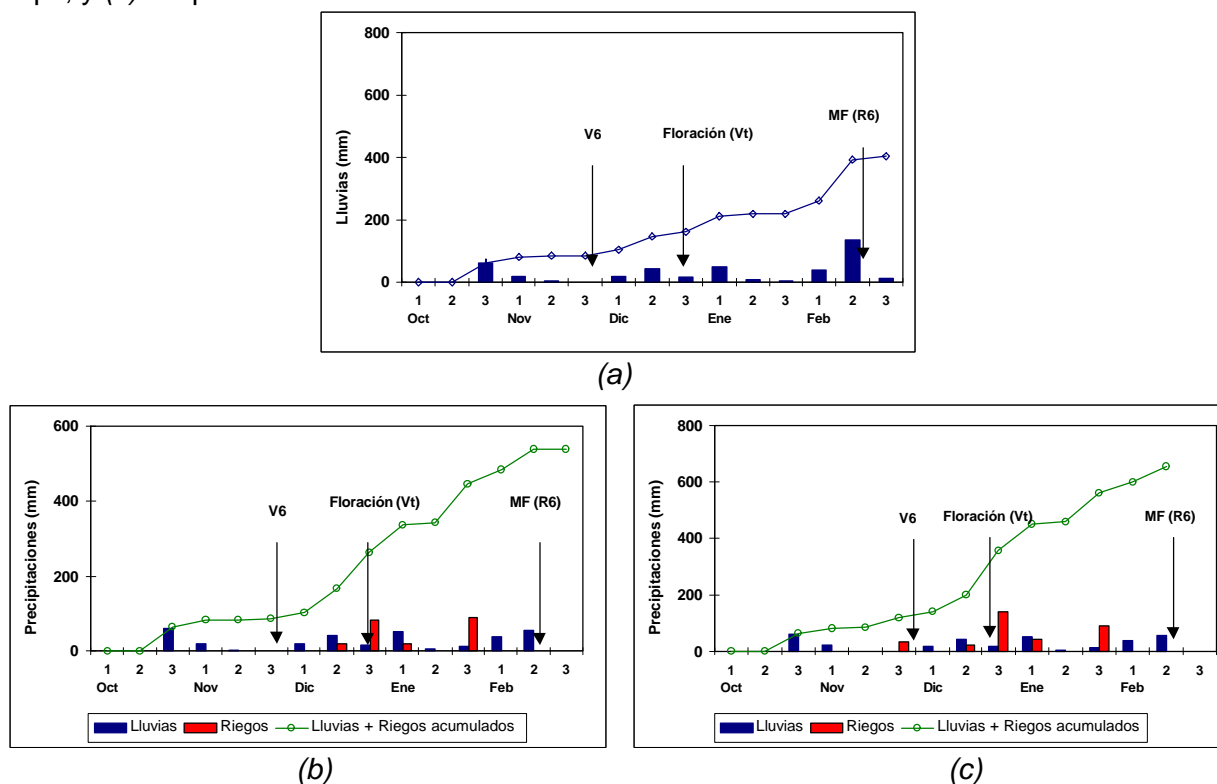


T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa.

El presente ciclo agrícola se caracterizó por la ocurrencia de un déficit hídrico de 119 mm, con respecto al valor medio de precipitaciones de la serie 1967-1999 (524 mm). Esta deficiencia hídrica fue de mayor intensidad previamente a la floración. En la etapa siembra-V6, la deficiencia fue de 75 mm; en la etapa V6- Vt fue de 31 mm; y en la etapa Vt- R6, fue de 13.2 mm. Después de la floración, el 10 de enero de 2000, ocurre una precipitación de 50 mm (Fig. 51), que permite la recuperación del consumo en los tratamientos de secano que fueron fertilizados, y se traduce en una recuperación en la producción de MS y en los índices de crecimiento (Epígrafe 4.1.1.2).

En síntesis, debido a la estacionalidad de las sequías en esta zona (Epígrafe 3.1.2.3), las que normalmente coinciden con la floración en el cultivo de maíz, sumado a la buena disponibilidad hídrica en la siembra, la estrategia programación de riego utilizada en cuanto a los momentos de riego, favorece la profundización del sistema radicular. Las diferencias obtenidas entre los niveles de riego Prop y Prpc, son debidas a las láminas aplicadas, pero no al momento del inicio del riego, hecho que queda evidenciado por la escasa diferencia en los consumos en las etapas previas al inicio del riego para Prpc. Es sumamente importante el realizar un intenso seguimiento y registro de la humedad edáfica, con un método calibrado para este ambiente, que permita, durante este período, mantener el nivel hídrico en los umbrales deseados.

Figura 51. Lluvias ocurridas, riegos aplicados, lluvias + riegos acumulados (mm), durante el ciclo 1999-2000, en las estrategias de programación de riego: (a) Sec, (b) Prpc, y (c) Prop.



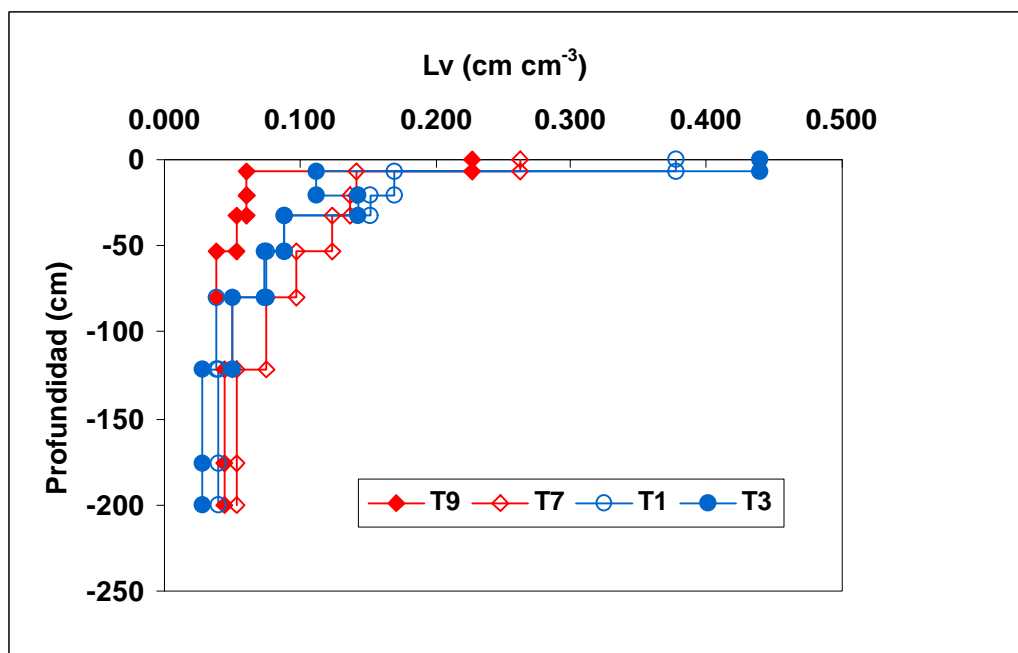
V6= sexta hoja expandida; MF, R6= madurez fisiológica

4.1.2.2. Crecimiento del sistema radicular

En la Figura n° 52, se presentan los perfiles de exploración radicular para los tratamientos más contrastantes en cuanto a disponibilidad hídrica y nitrogenada (T1, T3, T7, y T9). La medición fue realizada después de R1, para estudiar el sistema radicular en un momento de máximo desarrollo, ya que, existen trabajos en los que fue observado crecimiento radical posteriormente a R1, en una situación de disponibilidad hídrica limitada (MacKay y Barber, 1986). En este momento, se puede observar que la mayor concentración radicular en este tipo de suelos, se encuentra hasta los 0.75 m, decreciendo gradualmente a partir del horizonte Ap (Fig. 52).

En condición de riego, la aplicación de N promueve el incremento en la longitud volumétrica radicular (Lv) en la zona de aplicación. Este resultado no se ve en condiciones de secano y para este año. Para los tratamientos de secano, la relación se modifica, fundamentalmente en el horizonte superficial, donde los valores de Lv son menores con respecto a los de riego, pero con valores de peso que estarían indicando la presencia de raíces de mayor diámetro. En estos tratamientos, el peso de raíces decrece con dosis de N mayores. La relación Lv/peso fue menor en los tratamientos de secano. Resultados coincidentes con éstos fueron encontrados por Durieux *et al.* (1994).

Figura 52. Longitud volumétrica radical (L_v , cm cm^{-3}), en función de la profundidad (Prof., cm) para los tratamientos T1, T3, T7, y T9.



T1= Prop, Fn; T3= Prop, Fa; T7= Sec, Fn; T9= Sec, Fa.

Cultivares de maíz con una buena densidad radicular, y rápida capacidad de profundización de la zona superficial del suelo en etapas tempranas de desarrollo, son más tolerantes a la sequía y con mayor capacidad de utilizar el agua disponible (Guevara, 1991). Cuando ocurre una sequía alrededor de floración y durante la etapa de llenado de grano, la presencia de un sistema radicular fino y denso, permitirá al cultivo utilizar las reservas hídricas edáficas localizadas a mayor profundidad, manteniendo un adecuado estado hídrico en la planta y evitando el efecto de un estrés hídrico (Loomis y Connor, 1992). El material utilizado tiene buena capacidad de exploración del perfil del suelo (Fig. 52). En condiciones de estrés hídrico, para el nivel testigo de nitrógeno (30 kg ha^{-1}), se muestra la plasticidad para una mejor exploración del perfil como un mecanismo de tolerancia a sequía. Los tratamientos T7 y T9 muestran una mayor L_v en profundidad con respecto a los tratamientos regados.

En condiciones de riego, se verificó un mejor aprovechamiento de N, que resulta en un mayor crecimiento de la parte aérea y, consecuentemente, una mayor superficie foliar y una mayor producción de fotosintatos, con una buena eficiencia en la partición de materia seca a las raíces, que no resultó limitante para el consumo hídrico ni nitrogenado (Epígrafe 4.1.1.1). El tratamiento T3 fue el que mayor L_v presentó en superficie. La aplicación de nitrógeno, frecuentemente, estimula el aumento de la longitud radicular en la zona de aplicación del fertilizante, sin afectar el largo total de la raíces (Anderson, 1987; Durieux *et al.*, 1994).

Para la situación de secano, el tratamiento con mayor dosis de N (T9), presentó una menor L_v en superficie y hasta los 125 cm de profundidad, con respecto al tratamiento que recibió la menor dosis (T7). Este último también presentó un mayor peso de raíces en todos los horizontes (Tabla 31). La distribución porcentual en las columnas L_v de la Tabla n° 31, fueron calculadas teniendo en cuenta el espesor de cada horizonte, en función de los cm lineales totales de raíz por horizonte. Bajo condiciones de riego, la mayor concentración en la L_v se encuentra en los primeros

0.37 m de suelo, mientras que esta diferencia, comparando niveles nitrogenados, se verifica en los primeros cm de suelo, en el horizonte Ap. Oikeh *et al.* (1999) encuentran que la aplicación de N estimula el crecimiento radicular hasta profundidades mayores a los 0.45 m, en floración, en un suelo limoso. La presencia del horizonte Bt en este suelo impide, posiblemente, el desarrollo diferencial de las raíces en profundidad como respuesta a la aplicación de N. En la situación de secano, se midió mayor distribución porcentual en la longitud radicular en los horizontes B3 y C.

El tratamiento que recibió la mayor dosis de N, y una disponibilidad hídrica no limitante (T3), fue el que mayor Lv y peso de raíces presentó en el horizonte superficial (Tabla 31). Pellerin y Tardieu (1990) encuentran, como respuesta a la modificación de técnicas culturales, un mayor número de raíces adventicias en el cultivo de maíz, con bajas densidades, aporte de N y condiciones estructurales del suelo favorables. El tratamiento T2 (Fi) tuvo menor Lv en el horizonte superficial que el T1 (Fn).

Tabla 31. Valores de peso raíces (g m^{-2} , %) y longitud volumétrica del sistema radicular (Lv , cm cm^{-3}) por horizonte del perfil del suelo explorado por el cultivo de maíz, para los tratamientos T1, T2, T3, T7, y T9.

Horizonte del suelo	T1		T2		T3		T7		T9	
	Lv	Peso	Lv	Peso	Lv	Peso	Lv	Peso	Lv	Peso
1	0.378 (25.26 %)	180.61 (40 %)	0.295 (19.18%)	141.11 (32 %)	0.439 (29.92%)	209.80 (46 %)	0.263 (15.57 %)	207.33 (30 %)	0.227 (22.74%)	178.26 (45 %)
2	0.169 (19.42%)	81.51 (18 %)	0.169 (18.89%)	81.22 (19 %)	0.113 (13.24%)	54.57 (12 %)	0.142 (14.45 %)	109.09 (16 %)	0.060 (10.33%)	42.99 (11 %)
3	0.153 (8.62 %)	73.53 (16 %)	0.140 (7.67 %)	67.54 (15 %)	0.143 (8.22%)	68.95 (15 %)	0.138 (6.89 %)	105.86 (15 %)	0.060 (5.07 %)	42.84 (11 %)
4	0.089 (16.55 %)	43.34 (10 %)	0.097 (17.54 %)	47.26 (11 %)	0.089 (16.87%)	43.30 (10 %)	0.123 (20.25 %)	94.23 (14 %)	0.053 (14.77 %)	37.69 (10 %)
5	0.076 (8.13%)	36.99 (8 %)	0.126 (13.11%)	60.66 (14 %)	0.074 (8.07 %)	35.99 (8 %)	0.098 (9.28 %)	73.67 (11 %)	0.039 (6.25 %)	25.87 (7 %)
6	0.038 (12.80%)	19.29 (4 %)	0.051 (16.71%)	25.30 (6 %)	0.050 (17.17%)	25.00 (6 %)	0.076 (22.67%)	55.85 (8 %)	0.050 (25.24 %)	34.57 (9 %)
7	0.039 (9.22%)	19.69 (4 %)	0.030 (6.90%)	15.47 (4 %)	0.027 (6.51%)	14.01 (3 %)	0.052 (10.89 %)	36.84 (5 %)	0.044 (15.60 %)	30.42 (8 %)

Nota: Los valores porcentuales que figuran en la columna de Lv, corresponden al porcentaje de longitud de raíces en cm por cada horizonte de suelo. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T7= Sec, Fn; T9= Sec, Fa.

Horizontes:

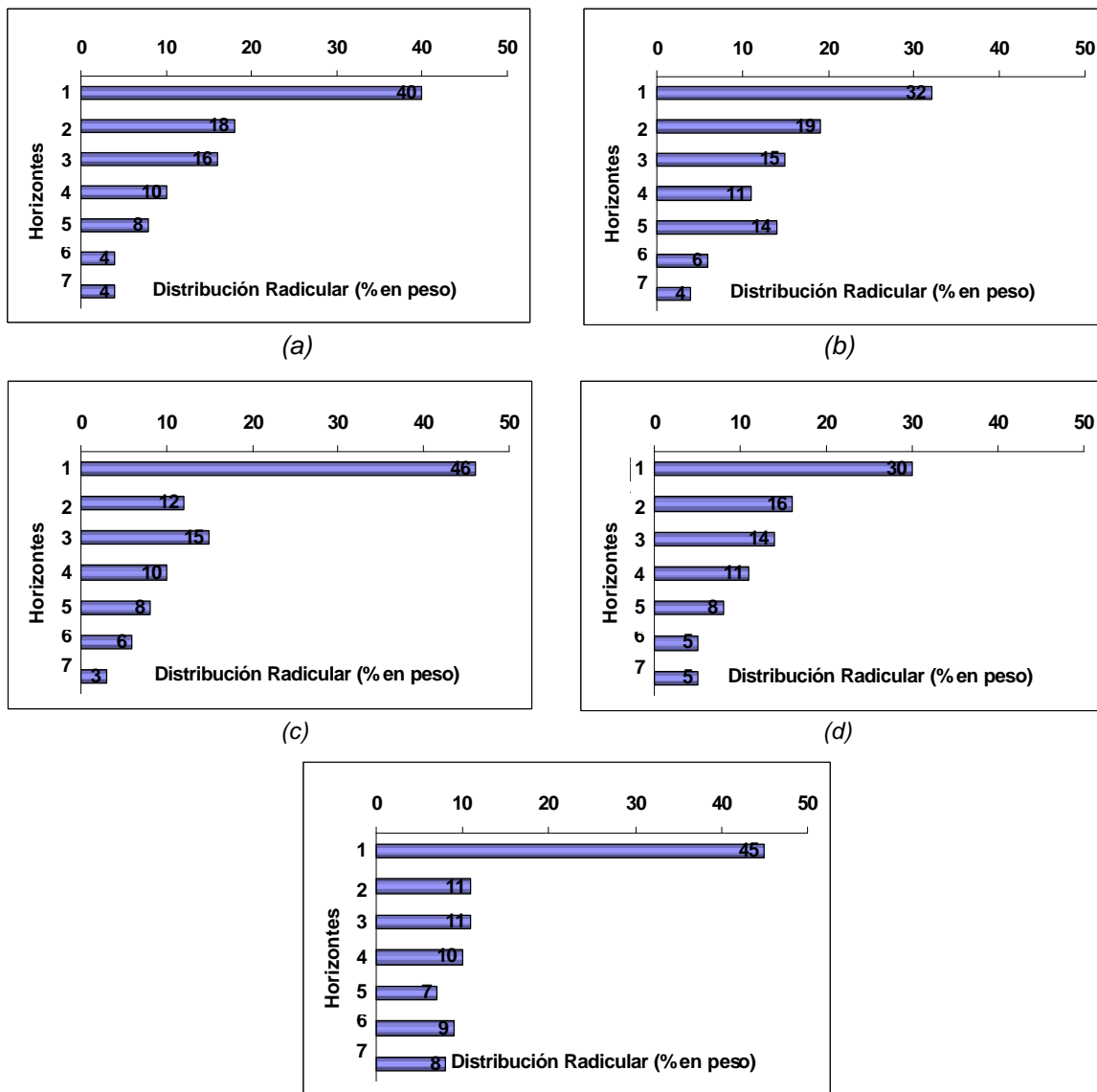
N °	Horizonte	Espesor (cm)
1	Ap	0-13
2	A1	14-26
3	B1	27-38
4	B21t	39-70
5	B22t	71-90
6	B3	91-153
7	C	+ 154

a) Distribución porcentual del sistema radicular

El nivel de fertilización nitrogenada afectó la distribución porcentual de raíces (Fig. 53). En los tratamientos que recibieron las dosis mas elevadas, T3 y T9, se midieron los porcentajes mayores en el horizonte superficial. Estos resultados no son coincidentes con los hallados por Durieux *et al.* (1994), que encontraron que el peso de las raíces decrece con el incremento de N. En este ambiente, alrededor del 30 %

de las raíces se encuentran en los horizontes A1 y B1. Para el tratamiento T9, el 22 % de las raíces se encuentra en estos horizontes. En este tratamiento, se puede observar que la reducción del porcentaje de raíces en profundidad no ocurre en forma gradual, como en el resto de los tratamientos.

Figura 53. Distribución porcentual de raíces (% en peso) por horizonte para los tratamientos: (a) T1, (b) T2, (c) T3, (d) T7, y (e) T9.



(e)

T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T7= Sec, Fn; T9= Sec, Fa.

Horizontes:

N °	Horizonte	Espesor (cm)
1	Ap	0-13
2	A1	14-26
3	B1	27-38
4	B21t	39-70
5	B22t	71-90
6	B3	91-153
7	C	+ 154

En la Tabla n° 32, se presentan los resultados del peso total de raíces y Lv. El factor agua produjo mayores diferencias que el factor N, ya que los tratamientos conducidos bajo riego mostraron una mayor Lv y un menor peso, respecto a los tratamientos de secano. Aina y Fapohunda (1986) también encuentran una disminución en la longitud volumétrica radicular, de un 20 %, para tratamientos conducidos con riego deficitario, en comparación con aquellos que recibieron una dotación hídrica adecuada. El efecto de la aplicación de nitrógeno no es tan claro. Para los tratamientos con riego, los valores de Lv no presentaron diferencias marcadas entre niveles de N. El T3, debido a la relación peso/longitud (L), evidencia la presencia de raíces más finas. Dentro de los tratamientos de secano, el tratamiento que recibió la dosis de 30 kg N ha⁻¹ (T7) tuvo mayor peso y Lv que el tratamiento que recibió 120 kg N ha⁻¹ (T9). La distribución porcentual, en cuanto a peso se refiere, es mayor en superficie, tanto para el tratamiento T3 como para el T9 con respecto a T1, T2, y T7. A pesar de que el T9, en valor absoluto, presentó menor peso y Lv en el horizonte superficial, la distribución porcentual para el peso es muy superior con respecto a T7.

En síntesis, el efecto de la interacción de los diferentes niveles hídricos y nitrogenados produjo una modificación en la distribución porcentual en peso por horizontes, fundamentalmente en los horizontes superficiales. Los valores de Lv total fueron mayores para los tratamientos de riego, contrariamente a resultados hallados en la bibliografía, que encuentran que, plantas de maíz cultivadas en secano, presentan mayores longitudes radiculares que aquellas que fueron cultivadas bajo riego (Eghball y Maranville, 1993). En este mismo trabajo, el peso total de las raíces fue menor para dosis de N crecientes, resultado coincidente con los presentados en la Tabla n° 32. Un estrés severo, tanto hídrico como nitrogenado, causa un daño en el sistema radicular, mientras que un estrés moderado incentiva su crecimiento. Este concepto es importante a nivel de manejo de cultivo, con el objetivo de lograr una provisión de agua y nitrógeno que favorezcan el crecimiento radicular, sin llegar a afectar el rendimiento del cultivo. Para estos suelos y las condiciones estudiadas, la influencia del factor agua es más relevante en el desarrollo radicular que la del factor nitrógeno.

Tabla 32. Peso radicular total (g m⁻²) y longitud volumétrica total (Lv, cm cm⁻³) total, para los tratamientos T1, T2, T3, T7, y T9.

	Peso total (g m ⁻²)	Lv (cm cm ⁻³)
T1	328	0.943
T2	339	0.908
T3	274	0.936
T7	592	0.892
T9	427	0.533

T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T7= Sec, Fn; T9= Sec, Fa.

b) Relación sistema radicular/ sistema aéreo de las plantas de maíz

La relación raíz/órganos aéreos fue menor en los tratamientos regados. Los valores medidos fueron de 21, 18, 51, y 41 % para T1 (Prop, Fn), T3 (Prop Fa), T7 (Sec, Fn) y T9 (Sec, Fa), respectivamente. En cuanto al índice de partición (peso seco de la raíz/materia seca total), los valores fueron de 18, 15, 29 y 34 para los mismos tratamientos y en ese orden. Se midió una diferencia en consumo de agua de 306 mm menor para T9 con respecto a T3. La diferencia de consumo hídrico entre T1 y T7 fue de 311 mm, menor para T7. La diferencia en la absorción de N fue de 40.60 kg menor en T9 con respecto a T3, y de 27.73 kg menor en T7 con respecto a T1 (Epígrafe 4.1.3.1). Un estrés ambiental incrementa el peso relativo de las raíces comparado con

el peso de la parte aérea. Aunque la deficiencia de numerosos nutrientes modifican esta relación, una limitación hídrica o nitrogenada son los factores que más frecuentemente alteran la relación raíz/órganos aéreos (Eghball y Maranvielle, 1993). Cuando una planta es deficiente en N, una mayor proporción de fotosintatos se alojan en las raíces, promoviendo su crecimiento y, consecuentemente, este mayor crecimiento aumenta su capacidad de absorber N. Esta mayor translocación de fotosintatos desde los órganos aéreos a las raíces, desarrolladas en condiciones deficitarias en N, es explicada por una mayor fuerza de las raíces como destinos, en comparación con otros órganos aéreos (Eghball y Maranvielle, 1993).

El balance en la relación raíz/órganos aéreos depende, fundamentalmente, del momento en que la provisión de nutrientes, o factores para el crecimiento, es más limitante. Las raíces tienen como función prioritaria la absorción de nutrientes, principalmente por su cercanía a la provisión de N. Boote (1977) explica la mayor relación raíz/parte aérea en plantas que han crecido en ambientes deficientes en N, por los mayores niveles de azúcares encontrados en las raíces, lo que presumiblemente aumenta su crecimiento. Después de 10 días de reaprovisionamiento de N, la relación raíz/parte aérea se recuperó y volvió a ser similar a aquella de las plantas control. Otra posible explicación es que el crecimiento radicular ocurre a concentraciones menores de N que las necesarias para el crecimiento del sistema aéreo (Lemaire, 1975). En este ambiente, las modificaciones en los niveles tanto hídrico como nitrogenados alteraron esa relación, siendo mayor en todos los casos de situaciones deficitarias.

4.1.2.3 Consumo hídrico

Analizando las diferencias de consumo, ligadas al desarrollo radicular y, consecuentemente, a la profundidad alcanzada para un mismo nivel nitrogenado, como forma de realizar la comparación entre niveles hídricos, se observó que el consumo, en el tratamiento T1 (Prop, Fn), se produjo fundamentalmente en los primeros 0.30 m del perfil del suelo (Fig. 54). En el tratamiento T4 (Prpc, Fn), el consumo se midió hasta los 1.80 m aunque, en mayor porcentaje, se produjo en los primeros 0.80 m. Para este mismo nivel nitrogenado (Fn), pero en seco (T7, Fn), el consumo fue proporcionalmente más importante para la profundidad de 0.40 a 1 m de profundidad, en comparación con los tratamientos regados, aunque también es importante el consumo en superficie y, como en T4, se midió aprovechamiento hídrico hasta el 1.80 m de profundidad.

Dentro del nivel nitrogenado Fi, el tratamiento T8 (Sec) (Fig. 54) mostró consumo agua hasta los 2 m de profundidad, aunque en superficie el consumo fue mayor. Para T5 (Prpc) y T2 (Prop), el consumo fue más importante a los 0.60 m. Para T5 se observó que el consumo entre los 0.80 y 1.20 m de profundidad fue mayor que para T2 (Fig. 54).

Este mismo análisis, realizado para la dosis Fa, mostró que, en el tratamiento T3 (Prop), el consumo por debajo de los 0.35 m es muy pequeño, por lo que se puede asumir que, en este caso, en donde ni el agua ni el N fueron limitantes, el volumen de suelo explorado donde hubo mayor consumo se redujo a los primeros centímetros de suelo, no aprovechando ni los nutrientes ni el agua presentes en este tipo de suelo a mayor profundidad. El tratamiento T6 (Prpc), presentó consumo tanto en superficie como hasta los 1.25 m, la profundización radical fue mayor que en T3. Finalmente, el tratamiento de seco, T9, evidenció consumo en toda la profundidad radicular, hasta el 1.80 m, siendo el consumo importante en toda la profundidad del perfil. Una vez más, los resultados obtenidos avalan el concepto de que la aplicación de riego desde etapas tempranas del cultivo promueve el desarrollo radical en superficie, razón por la

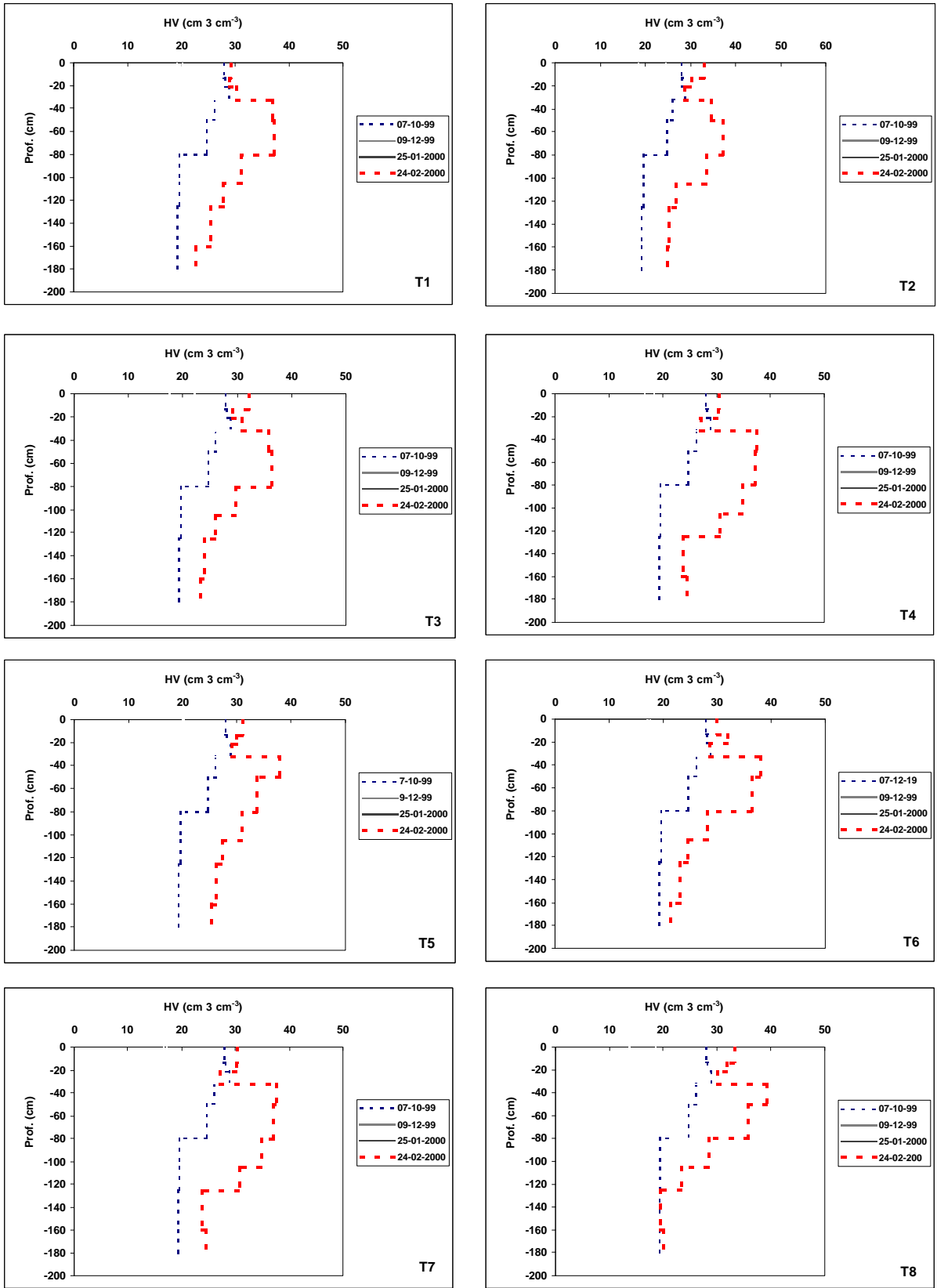
cual el mismo pierde capacidad de exploración en profundidad. Este hecho asociado a la buena capacidad de retención hídrica de estos suelos en profundidad, está promoviendo un uso ineficiente del agua.

La modificación del sistema radicular provocada por la compactación del suelo, o por un bajo potencial hídrico edáfico, afecta el proceso fotosintético y la apertura estomática, aún en condiciones óptimas de iluminación y temperatura (Bethenod y Tardieu, 1990). Este efecto de la modificación del sistema radicular en el presente trabajo, se analiza a través de la evolución del potencial xilemático (Epígrafe 4.1.2.5).

En síntesis, las diferentes estrategias de riego aplicadas promovieron el crecimiento radicular de forma diferencial. En el tratamiento de secano, la exploración radical y el consumo se produjo a mayor profundidad que en los tratamientos de riego. El consumo es importante hasta 1.80 m de profundidad. Para los tratamientos con la programación de riego Prpc, el mayor consumo se da hasta 1.20 m. La aplicación de riego más tardía promovió la profundización radicular, y la absorción de agua a mayor profundidad, con respecto a los tratamientos Prop. En los tratamientos Prop el mayor consumo se observó en los primeros 40 cm de profundidad.

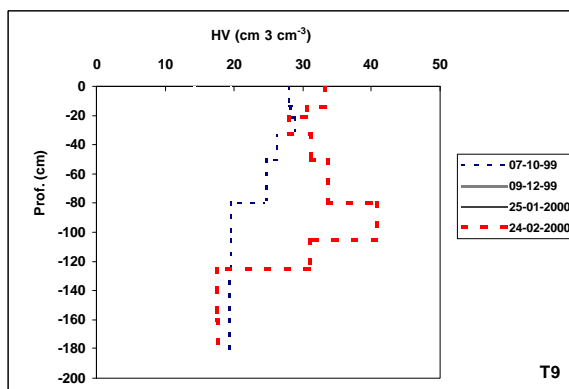
Debido a que no se contó con una medición dinámica de la evolución del sistema radicular para el cálculo de la tasa absorción de agua diaria por unidad de longitud de raíz ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$), se realizó una estimación del consumo específico aparente radicular, calculado como la relación entre el consumo total en centímetros de lámina de agua, y los centímetros de raíz en toda la profundidad del perfil, en el momento de la medición. Los resultados encontrados fueron mayores para los tratamientos de riego con respecto a los de secano. Los valores calculados fueron de 2.52, 2.64, 2.58 cm cm^{-1} , para los tratamientos con la programación de riego Prop: T1 (Fn), T2 (Fi), y T3 (Fa) respectivamente; y para los tratamientos de secano de 1.12, y 1.88 cm cm^{-1} , para T7 (Fn) y T9 (Fa), respectivamente. Como conclusión, a partir de estos valores se pudo ver que la mayor disponibilidad hídrica aumentó el consumo específico en mayor medida que el nitrógeno. En los tratamientos de secano, el N parece haber promovido un mayor consumo específico con respecto a los tratamientos de riego, ya que la L_v para el tratamiento T9 fue menor que para T7, sin embargo, los consumos fueron similares, por lo que parecería existir un estímulo en la actividad radicular en los tratamientos de secano, debido al N. Según los resultados anteriormente discutidos, cuando el agua es limitante (tratamientos de secano), el N incrementa el consumo específico; sin embargo, ante una disponibilidad hídrica no limitante, el N no parece tener efecto alguno en la actividad radicular. Los menores consumos específicos aparentes en los tratamientos de secano, pueden deberse a un incremento de las resistencias de las raíces debida a los tejidos suberizados de la endodermis, que incrementan la resistencia a la entrada de agua a medida que el suelo se deseca y alcanza potenciales menores, como consecuencia de una disminución en la conductividad hidráulica (Hamblin y Tennant, 1987).

Figura 54. Perfiles hídricos para cuatro fechas de muestreo : T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 y T8.



T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi.

Figura 54 (continuación). Perfiles hídricos para cuatro fechas de muestreo en el tratamiento T9.



T9= Sec, Fa. Prof=profundidad (cm)

Los consumos hídricos fueron analizados para las etapas siembra-V6, V6-15 días desde floración femenina (DDFF), y 15 DDFF- MF (R6) (Tabla 33). Los tratamientos conducidos en secano mostraron una distribución porcentual del consumo mayor para la etapa V6-15 DDFF, etapa crítica a la falta de agua (Classen y Shaw, 1970; Moss y Downey, 1971; Westgate y Boyer, 1986a,b), con respecto a los tratamientos conducidos bajo riego. Estos últimos tuvieron un mayor consumo porcentual en la etapa 15 DDFF-MF, con respecto a los de secano. El resultado del análisis de varianza de dos factores para el consumo por etapas (Tabla 12, Anejo 2) mostró para la primer etapa del ciclo analizada, (siembra-V6), diferencias estadísticamente significativas, y para los dos restantes (V6-15DDFF; 15 DDFF-MF), diferencias altamente significativas, debidas al factor agua, pero, en ninguno de los casos las diferencias encontradas en la interacción fueron, estadísticamente, significativas. Para el período siembra-V6, el nivel hídrico de Prop, se diferenció de los tratamientos restantes, pero con una diferencia muy pequeña en el consumo. El efecto del N fue significativo para la etapa V6-15DDFF, debido a que la ocurrencia de lluvias en este momento, determinó que aumente la importancia del factor N, ya que hasta el momento el factor agua había sido el mas limitante en este ambiente. Para el período V6-15 DDFF, se diferenciaron los tres niveles hídricos entre ellos. El valor de consumo en Prop fue 84 mm superior al de Prpc, y 131 mm mayor que el nivel Sec. Para los tratamientos de secano, los valores calculados como consumo para el período 15 DDFF-MF, los diferencian a éstos con respecto a los de riego. Los consumos tan pequeños en esta situación, equivalen, en promedio, a un consumo menor de 1 mm d^{-1} ; se deben a la diferencia entre el contenido hídrico edáfico de las últimas mediciones. El 04/02 se midieron contenidos de humedad muy bajos y, luego, la ocurrencia de lluvias determina esas variaciones negativas de humedad tan altas entre las dos últimas fechas. Sin embargo, los consumos en períodos previos, pero dentro de la misma etapa, 15 DDFF- MF, fueron de 4.06, 4.03, y 3.47 mm d^{-1} , para los tratamientos T7, T8, y T9, respectivamente, y en el período comprendido entre el 14/01 y el 25/01; mientras que, para el período comprendido entre el 25/01 y el 04/02, el consumo fue de 2.88, 2.44, y 3.54 mm d^{-1} , para T7, T8, y T9, respectivamente.

Tabla 33. Consumos hídricos (mm) en las etapas fenológicas siembra-V6; V6-15DDFF; y 15 DDFF-MF, para todos los tratamientos.

	Siembra-V6	V6-15 DDFF	15 DDFF-MF	Total
T1	42.22 (6.88%)	359.83 (58.68 %)	211.20 (34.44%)	613.24
T2	39.94 (6.05%)	394.91 (59.82%)	225.33 (34.13 %)	660.18
T3	40.01 (6.49%)	334.93 (54.35%)	241.28 (39.15 %)	616.22
T4	45.08 (9.14%)	265.00 (53.74 %)	183.07 (37.12 %)	493.15
T5	42.81 (8.39%)	300.73 (58.97%)	166.45 (32.64 %)	509.99
T6	40.67 (7.99%)	272.54 (53.57 %)	195.55 (38.44 %)	508.76
T7	38.67 (12.58%)	232.47 (75.66 %)	36.11 (11.75 %)	307.24
T8	39.10 (11.90 %)	247.59 (75.34 %)	41.94 (12.76%)	328.62
T9	39.54 (12.96 %)	217.55 (71.32 %)	47.94 (15.72 %)	305.02

V6= sexta hoja expandida; DDFF= días desde la floración femenina; MF= madurez fisiológica. T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

La ecuación utilizada para el balance hídrico es la siguiente:

$$\Delta H + \text{lluvias} + \text{riego} = \text{consumo} \quad (1)$$

donde; ΔH es la variación del contenido hídrico edáfico inicial – final

El consumo hídrico para todo el ciclo del cultivo (Tabla 34) mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tres niveles hídricos: Sec, Prop, y Prpc (Tuckey $\alpha= 0.05$) (Tabla 13, Anejo 2). Cuanto mayor fue la disponibilidad hídrica, mayor fue el consumo. El factor nitrógeno no produjo diferencias estadísticamente significativas en el consumo (Tabla 13, Anejo 2). La interacción tampoco fue estadísticamente significativa. La diferencia entre el consumo, para los niveles Prop y Prpc, afectó el rendimiento en grano (Epígrafe 4.1.1.11). Para las condiciones climáticas de este año, no se cumplió la hipótesis de que aprovechando el agua útil inicial, y regando solo durante el período crítico, no disminuyen los rendimientos, pero no por los momentos de riego sino por causa de la magnitud de las láminas aplicadas. Como se analiza en el Epígrafe 4.1.2.1, debido a que no se logró el objetivo de riego durante ese período, se vio limitado el consumo, teniendo este resultado relación directa con la intensidad del estrés hídrico durante el período de riego del tratamiento Prpc. Pandey *et al.* (2000, II) encuentran que el riego deficitario, aplicado al cultivo de maíz durante el período vegetativo, tuvo menor impacto en la producción de MST y absorción de N, que cuando fue aplicado en estados reproductivos.

Tabla 34. Componentes del balance hídrico, en mm.

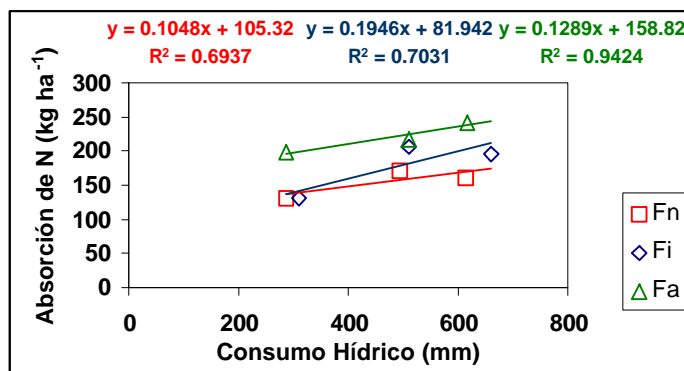
Tratamiento	ΔH	Lluvias	Riego	Consumo
T1	-52.75	325.80	340.18	613.24
T2	-5.81	325.80	340.18	660.18
T3	-49.77	325.80	340.18	616.22
T4	-46.86	325.80	214.21	493.15
T5	-30.02	325.80	214.21	509.99
T6	-31.25	325.80	214.21	508.76
T7	-18.56	325.80		307.24
T8	2.82	325.80		328.62
T9	-20.78	325.80		305.02

ΔH es la variación del contenido hídrico edáfico inicial – final.

T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

En la Figura n° 55, se presenta la relación entre la absorción de N y el consumo hídrico dentro de cada nivel de fertilización nitrogenada. El aumento de la disponibilidad hídrica incrementó la absorción de N, dentro de un mismo nivel nitrogenado. Las relaciones obtenidas por regresión lineal, fueron significativas y mostraron que este efecto fue mayor para la dosis Fi (90 kg N ha⁻¹), en la que, por cada 100 mm de incremento en el consumo hídrico aumenta la absorción de N en 19 kgN ha⁻¹ (R²=0.70). Los coeficientes de determinación para esta relación se incrementaron conjuntamente con la dosis de N. El mayor R² fue de 0.94 para Fa. La mayor absorción de N con el incremento en la disponibilidad hídrica determinó valores mayores de MST, IAF, y rendimiento (Epígrafes 4.1.1.2, 4.1.1.5a, y 4.1.1.11, respectivamente). Pandey *et al.* (2000) encuentran incrementos en la absorción de N entre 2 y 17 kg ha⁻¹ por cada 100 mm de incremento en el consumo hídrico, para niveles nitrogenados de 0 y 160 kg N ha⁻¹, respectivamente.

Figura 55. Absorción de N (kg ha⁻¹) en función del consumo hídrico, para cada nivel de fertilización nitrogenada.



Fn= nivel de fertilización normal; Fi= nivel de fertilización intermedio; Fa= nivel de fertilización alta

4.1.2.4 Eficiencia en el uso del agua

El efecto del estrés hídrico produjo una modificación en los patrones de crecimiento radicular (Epígrafe 4.1.2.2) y en el consumo (Epígrafe 4.1.2.3). Jones (1980) fue el primero en advertir el posible control de la apertura estomática por el estado hídrico del suelo. Experiencias en laboratorio (Tardieu *et al.*, 1992) mostraron que las raíces pueden advertir la disminución del contenido hídrico del suelo a través de la producción de ácido abscísico (ABA). Esta señal se transporta vía xilemática y produce una regulación en la apertura estomática. Este mecanismo de control afectará

directamente la eficiencia en el uso del agua (EUA), a través de la proporcionalidad entre la transpiración y la productividad primaria de los procesos fotosintéticos. En este ambiente, el efecto del estrés hídrico tuvo efecto en la EUA para la producción de grano, mientras que el N tuvo su efecto en la EUA calculada para el período crítico.

La eficiencia en el uso del agua para la producción de MST, durante el período crítico, (EUA Pc; Tabla 35), como la relación entre la MST producida en ese período y el agua consumida en el mismo, con la metodología empleada en el Epígrafe 4.1.2.3. La extensión del período crítico se consideró durante la etapa de elongación activa de la espiga, -200 y 100°C desde floración femenina (Otegui *et al.*, 1997). El resultado del análisis de varianza (Tabla 14, Anejo 2) mostró diferencias estadísticamente, significativas para el factor nitrógeno, pero no para el factor agua ni la interacción de ambos. Las diferencias se observaron entre los niveles Fa y Fi. Para este período, y dentro de cada nivel hídrico, las mayores eficiencias se midieron para la dosis mas altas de nitrógeno (Fa). Para el nivel Prop, las eficiencias fueron crecientes con las dosis de N, mientras que para Prpc y Sec, el menor valor se midió para la dosis intermedia de N (Fi). En las tres situaciones hídricas, las mayores EUA MST durante el período crítico se logran con las mayores dosis de N. La mayor disponibilidad hídrica produjo absorciones mayores de N (Fig. 55).

Tabla 35. Eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca total en el período crítico (EUA MST Pc, kg m⁻³), en todo el ciclo (EUA MST, kg m⁻³), y en la obtención del rendimiento (EUA gr, kg m⁻³).

Tratamiento	EUA MST Pc	EUA MST	EUA gr
T1	2.28	2.95	1.60
T2	3.10	3.01	1.92
T3	4.06	3.60	2.08
T4	3.60	3.93	1.78
T5	2.98	3.69	2.06
T6	4.01	4.14	2.20
T7	4.20	4.39	1.76
T8	2.24	4.27	2.12
T9	4.37	6.17	2.25

T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

La EUA MST mostró valores crecientes conjuntamente con las dosis de N, para la programación de riego Prop, mientras que, para Prpc y Sec, los menores valores se midieron para el nivel intermedio de N (Fi), al igual que la EUA MST Pc. El mayor valor se midió para T9, con una producción de MST de 18823.12 y un consumo de 3050.2 m³. El resultado del análisis de varianza, mostró diferencias estadísticamente significativas para el factor agua, pero no para el factor nitrógeno, ni para la interacción (Tabla 15, Anejo 2).

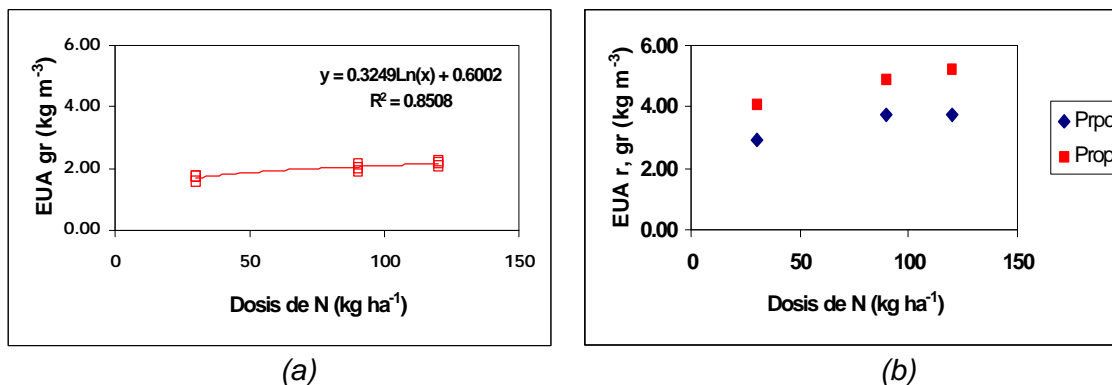
La EUA gr mostró un incremento, dentro de los diferentes niveles hídricos, con el incremento en la dosis de fertilización nitrogenada. El resultado del análisis de varianza presenta diferencias estadísticamente significativas para el factor nitrógeno (Tuckey, $\alpha = 0.05$), (Tabla 16, Anejo 2), pero no para el factor agua ni para la interacción. La aplicación de nitrógeno incrementó la EUA gr para todos los niveles hídricos analizados. Resultados coincidentes con los presentes fueron hallados por Pandey *et al.* (2000), en un trabajo con riego deficitario en maíz cultivado en un ambiente semiárido; encuentran que el incremento en la fertilización nitrogenada produce un aumento en la EUAgr para todos los niveles hídricos, y que el efecto del N es mas dependiente de su disponibilidad, que de la disponibilidad hídrica, aunque la absorción de N decrece con déficits hídricos severos.

En síntesis, el nitrógeno produjo diferencias, estadísticamente significativas en la EUA, entre los niveles Fi y Fa, cuando se analiza la producción de MST durante el período crítico (Tabla 14, Anejo 2). No produjo diferencias significativas cuando se analiza la producción de MST durante todo el ciclo del cultivo. Y, para la producción de grano, las diferencias fueron altamente significativas entre Fn, con respecto a Fi y Fa, pero no entre estos últimos tratamientos de fertilización nitrogenada. La mayor EUA durante el período crítico, para los tratamientos Fa, con respecto a Fi, no se traduce finalmente en una mayor EUA gr. Este último resultado coincide con los hallados por Meira *et al.* (1999), quienes no encontraron respuesta a la aplicación de N en dosis superiores a 90 kg N ha^{-1} , para el ambiente Pergamino. Amir *et al.* (1991) encuentran, para el cultivo de trigo cultivado en un ambiente árido, bajo condiciones de riego y secano, y varios niveles de N combinados con labranzas diferentes, que la disponibilidad de N afecta tanto la EUA MST como la EUA gr, cuando el N pasa a ser limitante en el sistema. El agua sólo produjo diferencias estadísticamente significativas en la EUA MST, separando los tratamientos Sec de los Prop, siendo la EUA en secano mayor en 1.76 kg m^{-3} .

El incremento en la dosis de fertilización nitrogenada produjo un incremento en la EUA gr (Fig. 56a). Aunque fueron sólo tres dosis de N las evaluadas, el nivel de N de 90 kg ha^{-1} , es el que está señalando el comienzo de incrementos decrecientes en la EUA gr. El consumo hídrico, también, presentó diferencias estadísticamente significativas debido al factor nitrógeno, ya que, la aplicación de N produjo un mayor desarrollo radicular en superficie, y, posiblemente, una mayor actividad radicular, sobre todo en los tratamientos de secano. Los valores de EUA riego para la producción de grano (EUAr,gr) (Fig. 56b) muestra valores mayores para el nivel hídrico Prop, con respecto a Prpc. A pesar de que no se ajustaron mediante modelos matemáticos estas relaciones, debido a que sólo existen tres niveles nitrogenados por nivel hídrico, también se evidencia a partir de la dosis de 90 kg N ha^{-1} , un incremento decreciente en las eficiencias en el uso del agua, en el nivel Prop. Para el nivel Prpc, sigue existiendo un incremento lineal como respuesta de la eficiencia en el uso del agua (EUAr, gr) a la aplicación de dosis crecientes de N, mas marcada que en Prop. El riego aplicado en el período crítico a la falta de agua (Prpc) incrementa la EUA gr en mas de 1 kg m^{-3} . Musick y Dusek (1980) midieron EUAr en el cultivo de maíz, de 2.71 y $2.44 \text{ kg de grano m}^{-3}$, para láminas estacionales de agua de riego de 400 mm .

Aunque no se midieron diferencias, estadísticamente significativas, para la EUA MST Pc debido a los diferentes niveles hídricos, la tendencia encontrada fue a un incremento en esta eficiencia a medida que disminuye la disponibilidad hídrica. Tanto para la EUA Pc como para la EUA MST, los tratamientos de secano fueron los que mayores eficiencias tuvieron, comparando los tres niveles de fertilización, a excepción del nivel Fi durante el período crítico, en el que el tratamiento de secano fue el menos eficiente. Para las distintas programaciones de riego, esta falta de diferencias en las EUA, está indicando que realizando un manejo de riego deficitario se pueden alcanzar igualmente altas EUA. Este comportamiento del híbrido utilizado muestra signos de tolerancia al estrés hídrico.

Figura 56. Eficiencia en el uso del agua para la producción de grano (EUAgr) en función de la dosis de nitrógeno aplicadas (kg ha^{-1}). a) EUA consumida durante todo el ciclo para todos los tratamientos y repeticiones (EUA gr, kg m^{-3}), b) EUA de riego (EUAr, gr, kg m^{-3}), aplicada para cada nivel hídrico. Los símbolos representan valores observados y la línea la ecuación de ajuste.



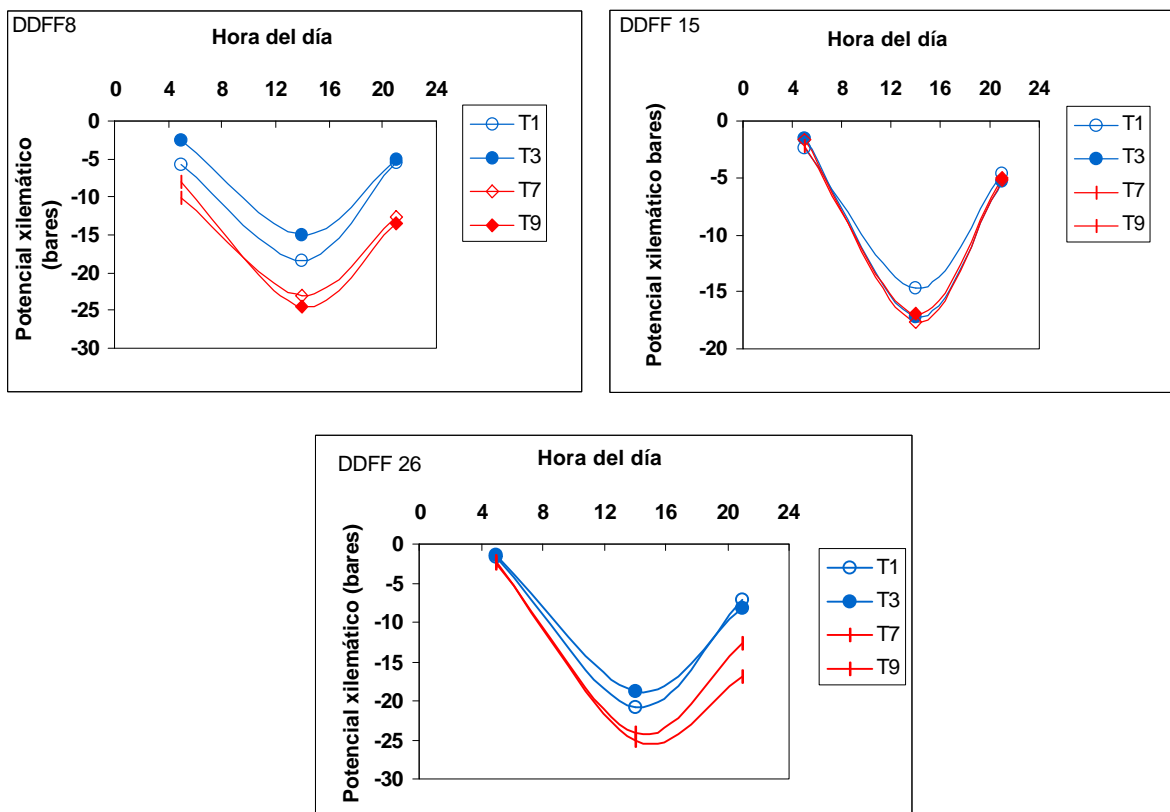
Prpc= riego en el período crítico; Prop= riego óptimo

4.1.2.5 Estado hídrico en planta. Mediciones indirectas

En la Figura n° 57, se presenta la evolución diaria del potencial xilemático para los tratamientos T1 (Prop, Fn), T3 (Prop, Fa), T7 (Sec, Fn) y T9 (Sec, Fa), y los días 8, 15 y 26 después de la floración femenina. El día 8 posterior a la floración femenina existió un estrés hídrico instalado ya que la diferencia entre el potencial xilemático de los tratamientos de riego y secano superó los 3 bares y con esta diferencia, se vio afectado en número de granos por superficie. Bethenod y Tardieu (1990) encontraron, en el cultivo de maíz que, con una disminución en el potencial base (potencial xilemático medido a las 5 h) de -0.1 a -1.4 MPa, tanto la conductancia estomática como la tasa de asimilación neta disminuían. Schulsser y Westgate (1994) encuentran que una diferencia de 13 bares durante la polinización redujo la fotosíntesis en un 80 % (de 15 a $3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), en un tratamiento control (sin limitaciones hídricas), con respecto a uno severamente estresado. En el presente trabajo, la mayor diferencia entre los tratamientos regados y de secano se midió el día 8 DFF, y fue de 9 bares. El día 13 posterior a la floración femenina ocurrió una precipitación de 50.3 mm, cuyo efecto en el estado hídrico del cultivo se puede ver el día 15 DDFF, donde las diferencias de potencial xilemático entre los tratamientos de riego y secano fueron menores a los 3 bares en todos los casos. El día 26 DDFF se puede observar que, para las mediciones de las 14 y 21 h la diferencia de potencial volvió a ser mayor a 3 bares.

Para los tratamientos regados, la deficiencia nitrogenada afectó el estado hídrico del cultivo, ya que, los tratamientos que recibieron la dosis menor (Fn) mostraron potenciales xilemáticos más negativos. Para los tratamientos de secano, este efecto se observó recién el día 26 DFF (Fig. 58). Radin *et al.* (1991) encuentran en el cultivo del algodón, que el efecto de un déficit nitrogenado en condiciones de riego provocó potenciales mayores, comparados con plantas fertilizadas, contrariamente a los resultados del presente trabajo.

Figura 57. Evolución diaria del potencial xilemático para los tratamientos T1, T3, T7, y T9.

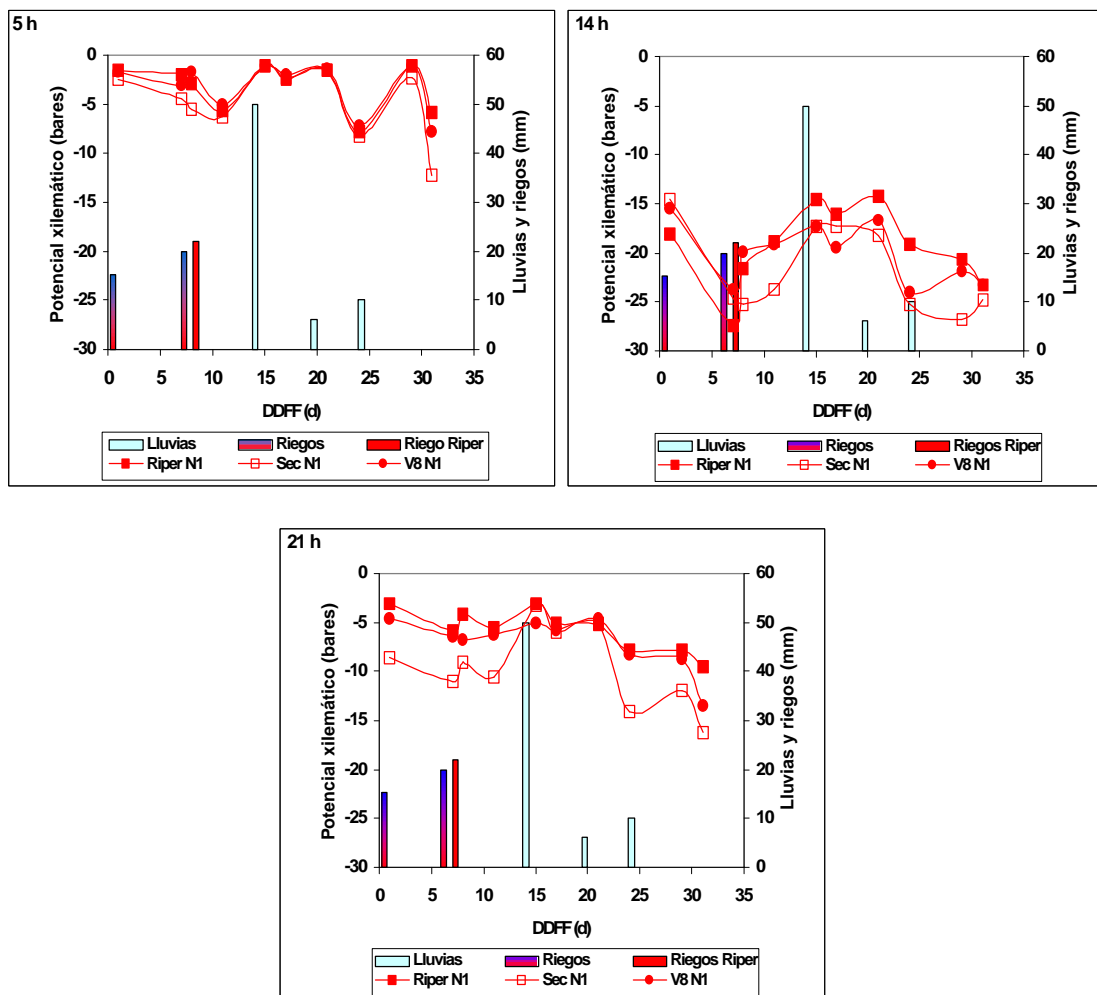


NOTA: la hora del día es UGTM +1; DDFF= días desde la floración femenina. T1= Prop, Fn; T3= Prop, Fa; T7= Sec, Fn; T9= Sec, Fa.

En las mediciones realizadas a las 21 h, fue donde mayores diferencias se apreciaron entre tratamientos. Resultados coincidentes fueron hallados por Hall *et al.* (1980). Como tendencia general, para los tres manejos de fertilización nitrogenada, se observó la disminución del potencial xilemático a medida que avanzó el ciclo del cultivo (Fig. 58). Los tratamientos que fueron regados con la programación Prop y PRpc (riego óptimo y riego en el período crítico) no presentaron diferencias entre si, mientras que la diferencia es marcada con respecto al tratamiento de secano (Sec).

En la medición de las 14 h, es mayor la influencia de la demanda ambiental que la influencia del estado hídrico de la planta (Fig. 58). En las mediciones realizadas a las 5 y a las 21 h, los valores de potencial xilemático están mas estrechamente relacionados con los contenidos de humedad del suelo.

Figura 58. Evolución del potencial xilemático en el nivel nitrogenado Fi y los tres niveles hídricos (T2, T5, y T8), a partir de floración femenina (R1).



NOTA: la hora del día es UGTM +1.

DDFF= días desde la floración femenina; Riegos= riegos aplicados en los niveles hídricos Riper y V8; Riegos Riper= riegos aplicados en los niveles hídricos Riper

En la Figura n° 59, se presenta la evolución del potencial xilemático para todos los tratamientos y momentos de medición. Para las diferentes horas de medición, se observa la recuperación del estado hídrico entre los días 15 y 21 DDFF, después de la ocurrencia de lluvias.

La medición de las 5 h es la que presenta valores mayores de potencial xilemático y menores diferencias entre tratamientos. Este potencial base, medido al finalizar la noche, es un intermediario entre los indicadores de estrés hídrico "suelo" y "planta". Medido después de un período en el que han transcurrido varias horas sin transpiración importante, representa un estado de equilibrio entre el estado hídrico del suelo y de la planta, y puede ser considerado como una medida integradora (Tardieu y Katerji, 1991). Los tratamientos con menores niveles de N (T1, T4 y T7) son los que muestran mayores diferencias en el potencial xilemático para los diferentes niveles hídricos. Los tratamientos con el valor intermedio de fertilización N (T2, T5, y T8) fueron los que menores diferencias

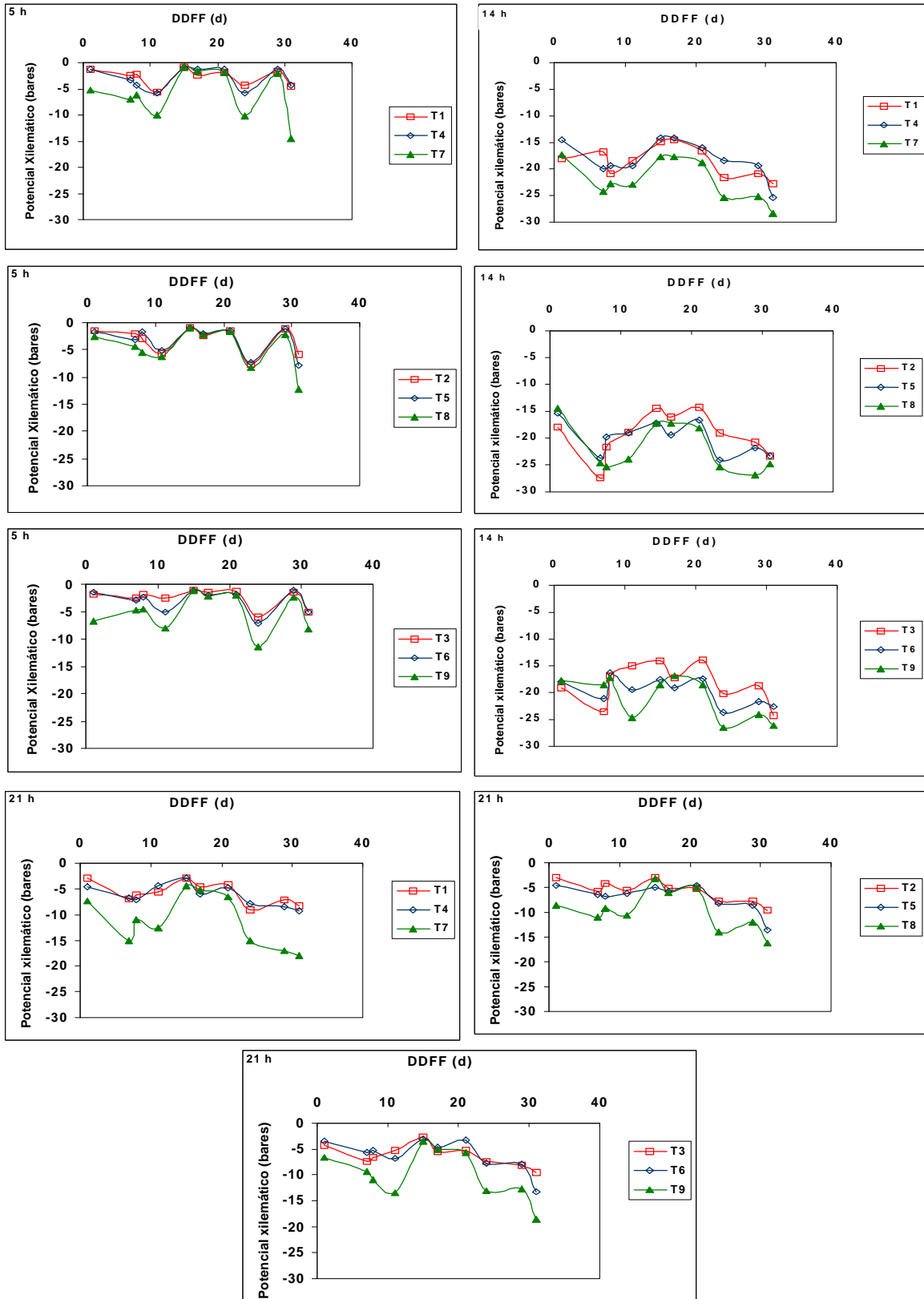
mostraron en el potencial xilemático entre niveles hídricos. En los tratamientos con la mayor dosis de fertilización (Fa), se observa el potencial mas negativo para el

tratamiento de secano. Schussler y Westgate (1991) encuentran diferencias en los valores de potencial xilemático, en mediciones realizadas entre las 8 y 10 h, entre un tratamiento control y uno con estrés hídrico en la floración, de alrededor de 12 bares. Tardieu y Bethenod (1990) comprueban como la medición del potencial xilemático base es muy estable ante variaciones en el estado hídrico del suelo, por lo que, para el presente trabajo, se puede observar que se lograron diferencias importantes entre los niveles hídricos, ya que, aunque las diferencias son mas marcadas para las 14 y 21 h, en la medición de las 5 h, también, se recogieron diferencias marcadas entre los tratamientos Sec y los regados.

Las mediciones de las 14 h son las que mostraron potenciales mas negativos. Para el menor nivel nitrogenado (Fn), se observó claramente la diferencia entre el tratamiento de secano y los dos restantes, diferencia que se mantuvo a lo largo del período de mediciones. La mayor diferencia medida fue de 7 bares, a los 7 DDFF, entre los tratamientos T1 y T7. Para los niveles Fi y Fa, la recuperación del nivel hídrico en planta en los tratamientos de secano después del día 15 DFF es mas marcada que en el nivel Fn, por lo que las diferencias desde ese momento hasta alrededor del día 21 DFF se presentaron, pero de forma más suave. La mayor diferencia medida a esta hora fue de 10 bares, y se estableció entre T3 y T9, el día 7 DFF. La menor recuperación debidas a menor nivel de nitrógeno disponible tuvo relación con un menor crecimiento de las raíces, por consiguiente menor exploración y menor capacidad de absorción del agua disponible en el perfil, en función de un menor crecimiento de la parte aérea y entonces una menor cantidad de fotosintatos disponibles para ser particionados hacia la raíz.

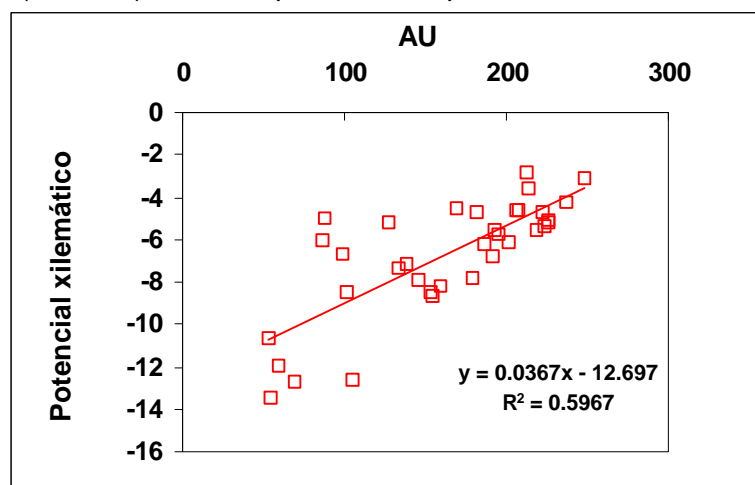
La medición de las 21 h fue la que manifestó las diferencias mas claras entre niveles hídricos, y para los tres niveles nitrogenados, a lo largo de todo el período de medición. Este momento de medición representa la velocidad de recuperación del estado hídrico de la planta, que será más lento en las plantas estresadas, y cuanto más lento, mayor será el impacto del déficit, empezando por una limitación en el alargamiento celular y luego, en los demás procesos que se suceden jerárquicamente. También, a esta hora, los resultados obtenidos son los que mas claramente muestran la recuperación del estado hídrico en planta luego de la ocurrencia de lluvias, para los tratamientos de secano. Las mayores diferencias se observaron para los tratamientos Fn, y son de 10 bares, entre el tratamiento de secano y los regados, mientras que, para Fi, la mayor diferencia entre estos tratamientos fue de 7 bares, y de 8 bares, para Fa.

Figura 59. Evolución del potencial xilemático en función de los días desde la floración femenina (DDFF), durante el periodo de mediciones para todos los tratamientos y momentos de medición. NOTA: la hora del día es UGTM +1.



Grant *et al.* (1989) indican que es más simple medir y predecir el estado hídrico del suelo que el del cultivo, a nivel de campo. Ludlow (1987) sugiere que la relación compleja entre el potencial xilemático y diferentes procesos fisiológicos en la planta conducen a utilizar el estado hídrico del suelo en numerosos modelos de simulación, para predecir el crecimiento de la parte aérea. Existen trabajos que encuentran que la conductancia estomática y la elongación de hojas y tallo se reducen como respuesta a una disminución en el contenido hídrico edáfico, de forma previa a la modificación del estado hídrico en planta (Blackman y Davies, 1985; Davies *et al.*, 1986; Gollan *et al.*, 1986; Schulze, 1986). Aunque existe una alta dispersión, el potencial xilemático medido a las 21 h fue el que mayor relación presentó con el contenido de AU edáfico. Un 53 % del estado hídrico en la planta a las 21 h es explicado por el contenido de AU edáfico (Fig. 60).

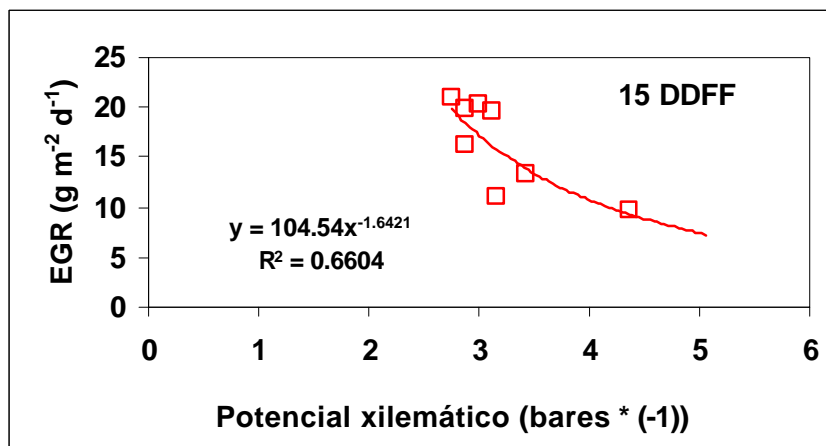
Figura 60. Relación entre el potencial xilemático (bares) a las 21 h y el contenido de agua útil edáfico (AU, mm) a 2 m de profundidad, para todos los tratamientos.



R^2 = coeficiente de determinación

Las relaciones entre los valores de potencial xilemático encontrados y tasas de crecimiento del cultivo, o mediciones de intercambio gaseoso, permiten una interpretación más completa de los resultados. Los bajos potenciales xilemáticos durante el desarrollo reproductivo del cultivo de maíz pueden causar grandes pérdidas de rendimiento en el cultivo. Las pérdidas son mayores cuando los bajos potenciales xilemáticos se producen alrededor del momento de la antesis, ya que el saco embrionario puede abortar y el desarrollo de la espiga y la elongación de los estigmas puede ser inhibida (Herrero y Johnson, 1981). En la Figura n° 61, se muestra la relación entre la tasa de crecimiento de la espiga (EGR) y el potencial xilemático. A medida que disminuye el potencial xilemático, disminuye el EGR. Esto tuvo un efecto directo en la disminución del rendimiento, ya que como se muestra en el Epígrafe 4.1.1.11 (Fig. 47), existe una relación directa y positiva entre el EGR y el NG m^{-2} , principal componente del rendimiento. Valores de EGR de alrededor de $20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, proporcionan valores mayores NG m^{-2} y, consecuentemente, mayores rendimientos. El potencial xilemático que permite esa tasa de crecimiento de la espiga es de un valor de, aproximadamente, -3 bares.

Figura 61. Relación entre la tasa de crecimiento de la espiga (EGR) y el potencial xilemático, medido a las 21 h.



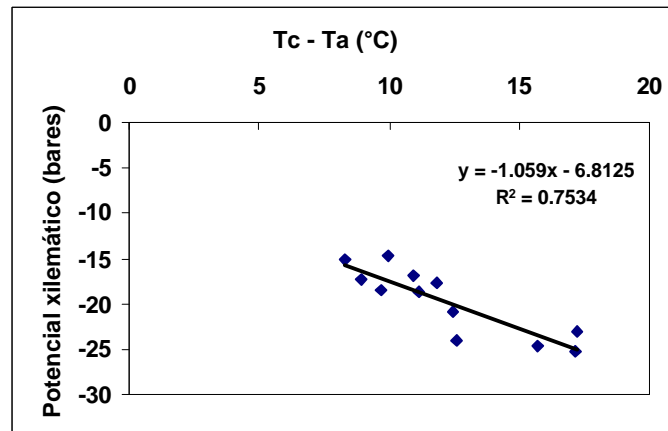
DDFF= días desde la floración femenina; R^2 = coeficiente de determinación

4.1.2.6 Relación entre el potencial xilemático y la temperatura de la cubierta vegetal

Las mediciones del potencial xilemático con la cámara de presión, para cuantificar el grado de estrés hídrico en el cultivo, tienen la ventaja de la invariabilidad con la temperatura (Scholander *et al.*, 1965). Sin embargo, debido a la dinámica del estado hídrico diurno, las limitaciones en el número de mediciones por hora que este método permite, adecuar la metodología a grandes escalas es problemático (O'Toole *et al.*, 1984). La medición de la temperatura foliar es un método indirecto y rápido, que permite cuantificar el grado de estrés hídrico de un cultivo a gran escala.

La temperatura foliar aumenta en respuesta a un estrés hídrico. Este incremento en la temperatura es una respuesta al cierre estomático. En la Figura n° 62, se presenta la relación entre los dos métodos utilizados: la cámara de presión y la termometría infrarroja. La diferencia entre la temperatura del cultivo – la temperatura del aire es el Grado de Estrés Diario (SDD: stress degree day) (Idso *et al.*, 1977 y Jackson *et al.*, 1977). Cuando disminuye el potencial xilemático aumenta la temperatura foliar; como consecuencia de un cierre estomático disminuye la transpiración y, consecuentemente aumenta la temperatura del cultivo (Fig. 62). Para este ambiente, la relación encontrada mediante regresión lineal, mostró una disminución del potencial xilemático de 1.06 bares por cada °C de aumento de la diferencia entre la temperatura foliar y la del aire. La temperatura de la cubierta se relaciona significativamente con el potencial xilemático mediante el modelo lineal, con una explicación de la varianza del potencial por parte del SDD del 75 %. O'Toole *et al.* (1984) encuentran una alta correlación tanto entre estos dos métodos como en la relación entre la temperatura del cultivo – temperatura media del aire ($T_c - T_a$) y el potencial xilemático ($R^2=0.86$ y 0.82 , respectivamente).

Figura 62. Modelo lineal que relaciona el Grado de Estrés Diario (SDD, °C) con el potencial xilemático (bares), medidos a las 14 h, para los tratamientos T1, T3, T7, y T9, y los días 8, 15, y 26 DFF.



DDFF= días desde la floración femenina; R^2 = coeficiente de determinación

Dos consideraciones, fundamentales en la selección de un método de cuantificación del estrés hídrico en campo, serán, su naturaleza no destructiva y su aplicabilidad práctica. La medición de la temperatura foliar reúne estas dos ventajas, y aparece como un buen indicador para cuantificar el estrés hídrico en este ambiente.

A partir de las mediciones de la temperatura foliar, en campo o con el uso de sensores remotos, es factible ajustar la metodología de cálculo del índice de estrés hídrico del cultivo ("Crop Water Stress Index", CWSI) (Idso *et al.*, 1981a) para este ambiente. Aunque el desarrollo del CWSI no fue objeto del presente trabajo, utiliza una metodología no destructiva y no disturba el medio. Para este ambiente, y como objetivo de riego, se puede plantear en las etapas de mayor sensibilidad del cultivo a un estrés hídrico, el mantener una tasa de crecimiento de la espiga de $20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, con potenciales xilemáticos de, aproximadamente, - 3 bares.

4.1.3 Efecto del nitrógeno sobre el funcionamiento del cultivo

Para el estudio de los diferentes componentes del balance de nitrógeno, se utilizó la expresión (9) del Epígrafe 3.1.8.3.

Para este ambiente no se consideraron pérdidas por lixiviación, debido al bajo potencial de lixiviación que poseen los Argiudoles (presencia de un horizonte B textural, con un contenido de arcillas mayor al 40 % que disminuye el drenaje interno del mismo) (Ferrari, *et al.*, 2001), asociado a la capacidad del híbrido utilizado para explorar el perfil del suelo hasta el 1.80 m de profundidad (Epígrafe 4.1.2.2).

Se analizarán, en este epígrafe, los componentes del balance de los que se cuenta con información, sin ser el objetivo el llegar a realizar el balance.

4.1.3.1 Caracterización de los componentes del balance nitrogenado

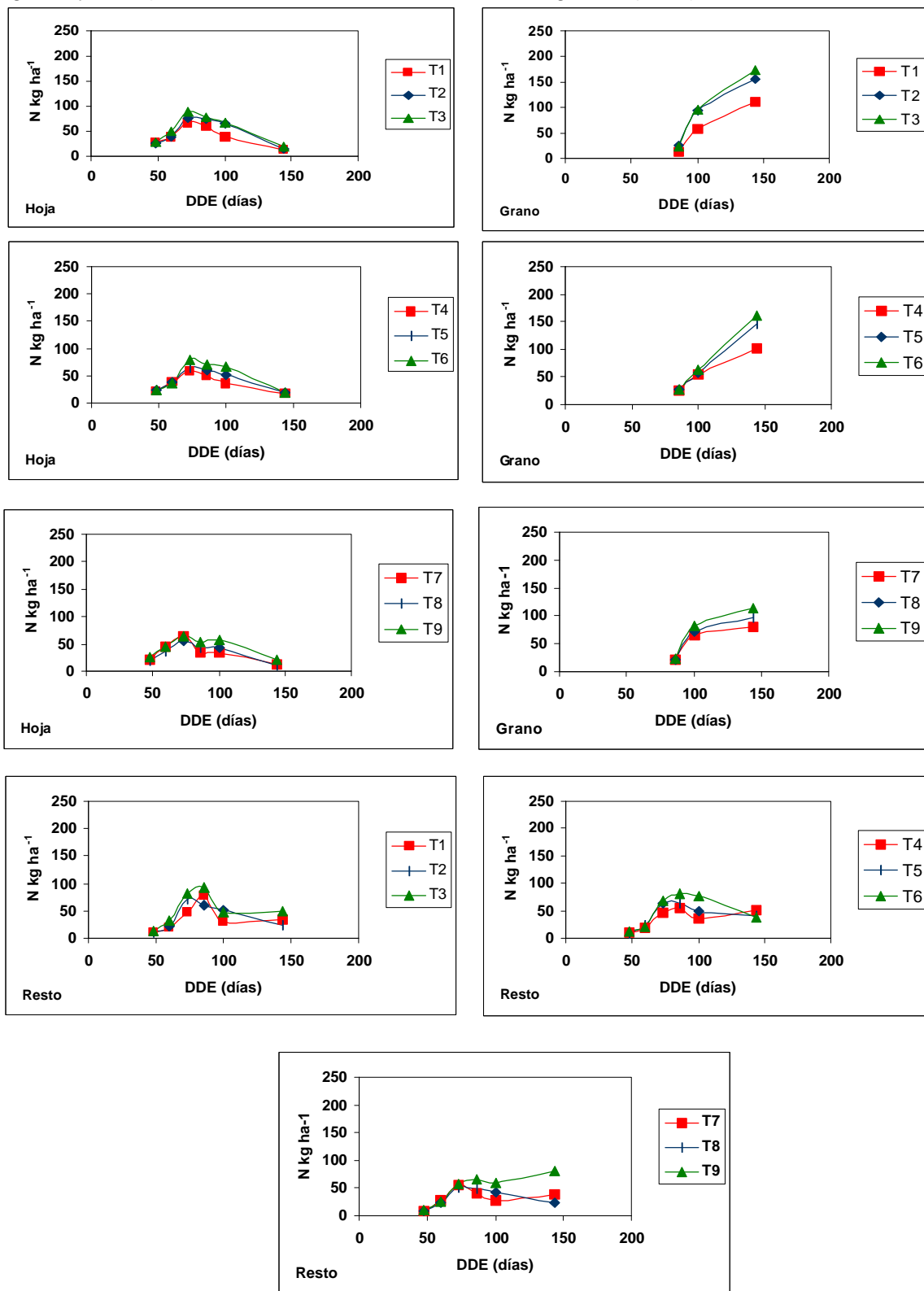
a) N absorbido por el cultivo. Reparto del N entre los diferentes órganos aéreos

Para todos los niveles hídricos, las diferencias en la absorción de N comienzan a manifestarse a partir de la floración (Fig. 63). El nitrógeno es acumulado en partes vegetativas hasta los 10-15 días posteriores a la floración para luego ser removilizado hacia los granos en crecimiento en función de la relación fuente/destino (Andrade *et al.*, 1996).

Las mayores diferencias en la acumulación de N medidas, para los tratamientos regados con la programación Prop, fueron del orden del 40 % mayor para Fa (130 kg N ha⁻¹) en el estado R4, con respecto a Fn (36 kg N ha⁻¹). Entre los tratamientos Fi y Fa, las diferencias fueron menores. En la Figura n° 63, se puede observar que existió una diferencia en el contenido de N en órganos aéreos, entre los niveles nitrogenados Fa y Fi (90 kg N ha⁻¹) con respecto a Fn, en condiciones de riego. Las mayores diferencias se encuentran en el contenido de N en grano. En condiciones de secano, la absorción presenta un gradiente entre los tres niveles N. El análisis se hizo considerando independientemente hoja (lámina foliar), grano, y lo que se ha denominado resto, que incluye tallo+brácteas+panícula+vainas+zuro.

La acumulación de N se observó hasta floración; a partir de este momento, se observaron diferencias entre tratamientos. Los resultados del análisis de varianza se presentan en la Tabla n° 17, Anejo 2. En Vt, las diferencias en la acumulación de N en hojas, fueron altamente significativas debido al factor agua y significativas, para el factor nitrógeno, diferenciándose los niveles extremos tanto de agua como de N, pero no el nivel intermedio con respecto a los dos restantes. En R3 (13/01/2000), las diferencias en la acumulación de N en hojas son altamente significativas, tanto para agua como para N, diferenciándose una vez mas los niveles extremos de los dos factores objeto de estudio. En R4, sólo existen diferencias debido al factor N, diferenciándose el nivel mas bajo (Fn), de los dos restantes; y para la última fecha (03/08/2000), no existen diferencias debidas a ninguno de los factores. La interacción, en ningún caso, fue significativa.

Figura 63. Nitrógeno absorbido (kg ha^{-1}) por los distintos órganos aéreos en (hoja, grano y resto) en función de los días desde la emergencia (DDE).



T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

El efecto del agua y del N siempre fue altamente significativo para la acumulación de N en grano y también, lo fue la interacción en R3 y R4. El efecto de la interacción agua x N separa en R3, dentro del nivel de riego Prop, la dosis Fn de

las dos restantes, mientras que, dentro de los niveles hídricos restantes, no hubo diferencias. En R4, la interacción dentro del nivel Prop, separó los mismos niveles nitrogenados que para R3. Dentro del nivel Prpc, no existieron diferencias entre los niveles nitrogenados, mientras que, dentro de Sec, las diferencias fueron entre el nivel Fn y Fa, no siendo el nivel Fi diferente a los dos restantes. En la última fecha analizada, se diferencia el nivel de secano de los dos restantes y los tres niveles nitrogenados entre sí.

La acumulación de N en resto de órganos aéreos se da hasta floración en los tratamientos de riego y, luego, comienza la removilización. Resultados coincidentes fueron hallados por Below *et al.* (1981). Hanway (1962) observó escasa removilización previa a la antesis. Para los tratamientos de secano, la tendencia es la misma; sin embargo, el tratamiento T9, con la dosis mayor de N, muestra un incremento de N en postfloración. Este hecho se debe, posiblemente, a la ocurrencia de precipitaciones en ese momento, que permitieron al cultivo la absorción tardía de N.

Swank *et al.* (1982) encuentran diferencias en los patrones de removilización de N entre años, para el mismo híbrido, debidas a diferencias en las condiciones hídricas en que se desarrolló el cultivo. La acumulación de N en resto, sólo es significativa debido al factor agua en Vt y R3, diferenciándose los niveles extremos. Las diferencias debidas al factor N son altamente significativas para Vt y R4, diferenciándose los valores extremos; y significativas en R3, diferenciándose el nivel Fa de los restantes. La interacción no fue significativa en ningún caso.

El valor final de N en grano se vio reducido en 53 kg ha^{-1} para Fn con respecto a los niveles de N restantes, en promedio, dentro del nivel hídrico Prop. La disminución fue de 51 kg ha^{-1} para Prpc y de 23 kg ha^{-1} , para los tratamientos de secano. Un déficit hídrico en la planta reduce la disponibilidad de N para el desarrollo de los granos, por la reducción del flujo de N a grano (Schussler y Westgate, 1991).

La partición de N, al igual que la de C, es regulada por la relación fuente/destino durante el llenado de grano. Una mayor concentración de N en hoja y tallo ocurre cuando el destino es limitante, y una mayor removilización cuando la fuente es limitante (Christensen *et al.*, 1981; Reed *et al.*, 1980).

A partir de la floración, se observa una disminución de los contenidos de N acumulados en órganos vegetativos. La removilización calculada a partir de floración es aparente, ya que el estudio no se realizó con N marcado. Este cálculo da como resultados valores menores que el real, ya que, al mismo tiempo, está ocurriendo absorción de N por parte del cultivo (Ta y Weiland, 1992).

La removilización a partir del compartimento hoja representa, en promedio, el 30 % del N total final acumulado, mientras que la removilización a partir del compartimento "resto" es, en promedio, el 20 % del N total final. Los mayores valores de removilización se midieron para los tratamientos T2, T3, y T6 (65 , 70 y 62 kgN ha^{-1} , respectivamente), los tratamientos que recibieron las mayores dosis de N y sin limitaciones hídricas; resultados similares fueron hallados por Ta y Weiland, 1992. Los menores valores fueron para los tratamientos de secano (45 , 42 , y 42 kg N ha^{-1} , respectivamente). Estos valores son entre el 56 y 33 % del N final en grano. Valores importantes de removilización a la espiga ($70 \pm 5\%$) fueron encontrados por Plénet (1995) y Ta y Weiland (1992). Los valores presentados han sido calculados abarcando el período floración-MF, aunque existiría una intensificación de la removilización durante la segunda etapa del llenado de grano (Feller *et al.*, 1977 y

Reed *et al.*, 1980). La removilización a partir del resto osciló entre 24 y 36 kg N ha⁻¹, siendo mas importante en los tratamientos de riego que en los de secano.

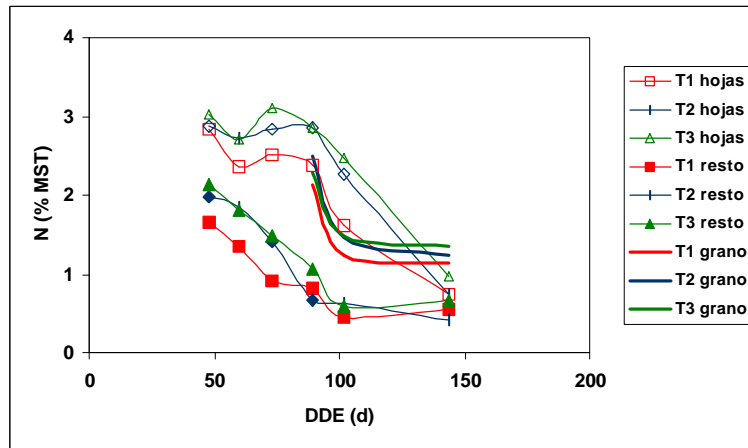
Con respecto al momento de inicio de la removilización, la tendencia general fue un inicio anticipado a partir del compartimento hojas que del resto. Resultados coincidentes fueron hallados por Swank *et al.* (1982).

La evolución del contenido de nitrógeno Kjeldahl a lo largo del ciclo del cultivo, en función de las dosis de fertilización nitrogenada, es presentada en la Figura n° 64. Los análisis estadísticos (Tabla 18, Anejo 2) mostraron que las diferencias en el contenido de nitrógeno tanto en hoja, como en el resto (tallo+panícula+zuro+brácteas) de los órganos aéreos comenzaron a ser significativas a partir de la floración. Este hecho estaría indicando que, debido a la provisión de nitrógeno del suelo, se podría pensar en realizar una fertilización previa a la floración, siempre que ésto sea técnicamente factible; por ejemplo, mediante la fertirrigación.

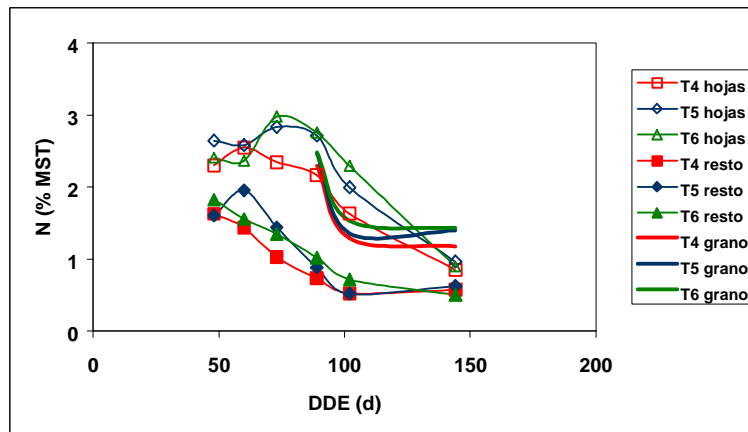
Los porcentajes de N pasan desde valores entre 2.30 y 2.88 % en hoja, en la floración, a valores de entre 1.63 y 2.85 % en R3, dependiendo del tratamiento (Fig. 64). Plénet (1995) encuentra que, el contenido de N en los tallos + hojas pasa de 3.0-4.4 % en el estado de plántula a 0.75-1.75 % en la floración, dependiendo del nivel de nutrición nitrogenada. Después de la floración, la disminución en el contenido de N en el resto, fue mas lenta y de menor intensidad que la disminución a partir de las hojas. Los valores medidos, para este ambiente, son menores que los del ambiente II, en valor absoluto, así como la disminución en el contenido de N desde V6 a Vt. La evolución fue similar para todos los tratamientos, aunque se manifestaron diferencias en valores absolutos. El análisis de varianza (Tabla 18, Anejo 2) mostró que estas diferencias son evidentes a partir de la floración, tanto para hoja como para resto. Para estos órganos, y para todas las fechas, existieron diferencias debido al factor N, lo que demuestra que las dosis de N aplicadas permitieron crear niveles de alimentación nitrogenada diferentes. También, existieron diferencias en todas las fechas, a excepción de la última (03/08/2000) debidas al factor agua.

Para el grano las diferencias en el contenido de N fueron significativas, tanto para el factor agua como para el N, en la dos últimas fechas analizadas (26/01, R4; y 03/08, cosecha). El efecto de la interacción de estos dos factores no fue significativo con respecto al contenido de N de los diferentes órganos, para ninguna de las fechas analizadas. Después de una disminución rápida del contenido de N en los granos, en los 30 días posteriores a la floración, los valores se estabilizan hasta el final de la etapa de llenado de granos. Los diferentes niveles nitrogenados produjeron diferencias mas importantes en los contenidos de N en hoja que en granos. Resultados similares fueron hallados por Plénet (1995).

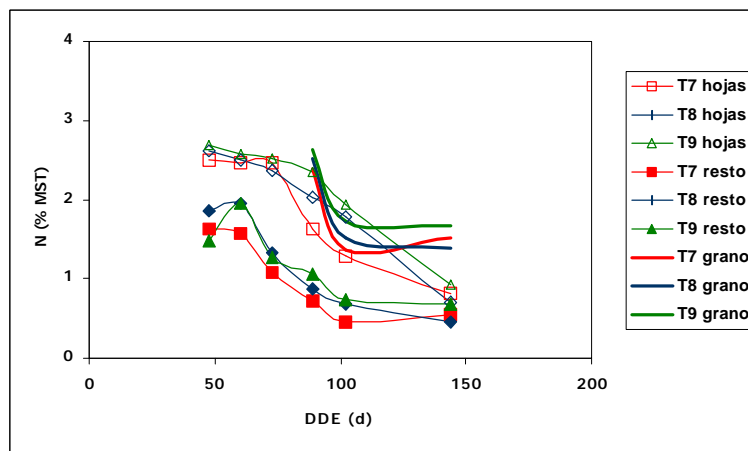
Figura 64. Evolución del contenido de N Kjeldahl en los diferentes órganos aéreos para los niveles nitrogenados, en función de los días desde emergencia. (a) Prop, (b) Prpc, (c) Sec.



(a)



(b)



(c)

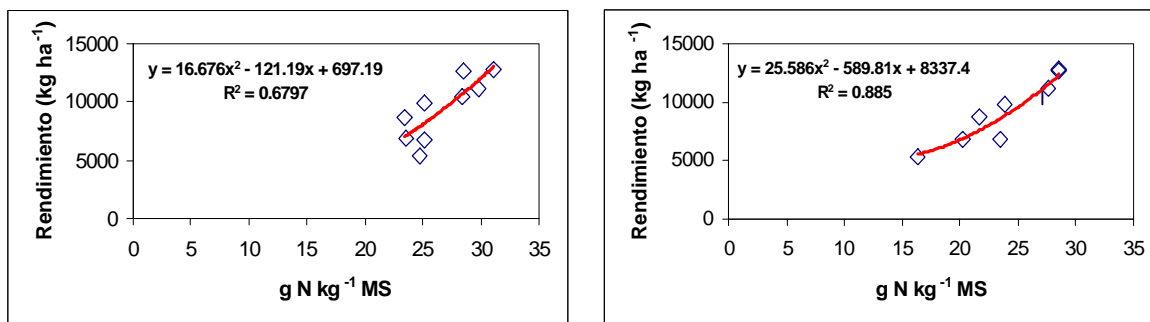
MST= materia seca total, DDE= días desde la emergencia

T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

En este ambiente la concentración de N foliar previa a Vt explica, en un 68 %, el rendimiento (Fig. 65). Para las condiciones de Pergamino, el nivel hídrico es el factor más limitante. Los umbrales hallados para la concentración de N foliar, por

debajo del cual el rendimiento cae, fueron, para Balcarce (Argentina), de 28 y 22 g N kg⁻¹MST, en el estado de V6 y 15 días previos a la floración (Uarth y Andrade, 1995b). Los resultados encontrados en el presente trabajo indican que la disminución de rendimiento se da a partir de valores de 31 y 28 g N kg⁻¹ MST en la concentración de N foliar, en Vt y 13 DDFF, respectivamente.

Figura 65. Relación entre el rendimiento (kg ha⁻¹) y la concentración de N foliar (g N kg⁻¹ MST). (a) en Vt, y (b) 13 días posteriores a Vt, para todos los tratamientos.

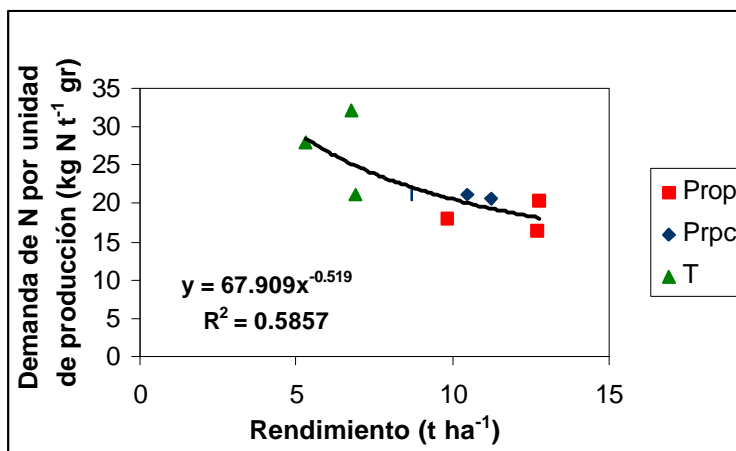


R²= coeficiente de determinación

La cantidad de N necesaria para producir una unidad de producción corresponde a la relación de las cantidades de N absorbidas por la materia seca aérea y el rendimiento en grano. En la Figura n° 66, se presenta la relación entre la demanda de N por unidad de producción y el rendimiento.

Para este ambiente, y debido que los tratamientos consistieron en la interacción entre niveles de agua y nitrógeno, la relación muestra que, a medida que se incrementa la disponibilidad hídrica, disminuye el requerimiento de N para producir una unidad de grano, existiendo mayores diferencias entre los niveles hídricos que entre niveles nitrogenados. Para Pergamino, y bajo condiciones de riego, esta relación muestra una tendencia a alcanzar un techo en el requerimiento de N para la producción de grano, y ese valor se ubica alrededor de los 19.60 kgN t⁻¹ gr. Andrade *et al.* (1996) estudian el requerimiento de N del cultivo de maíz para diferentes rendimientos y encuentran que según la pendiente de la regresión lineal de esta relación, el maíz necesita acumular, en partes aéreas, aproximadamente 2 kg del nutriente por quintal de grano producido. El rango comúnmente encontrado en la literatura varía entre 16 y 23 kg N t⁻¹ gr. Es importante poder controlar el factor agua, mediante el riego o mediante técnicas de manejo de cultivo, para hacer un uso mas eficiente del N en este ambiente. A modo de ejemplo, y debido a la probabilidad de precipitaciones, importantes en cuanto a magnitud e intensidad, después de un año seco, como fue en el que se desarrolló la experimentación, el N residual es elevado (T8 y T9), y susceptible de ser lixiviado fuera de la zona radicular si el cultivo sucesor fuera un cereal de invierno.

Figura 66. Modelo matemático que relaciona la demanda de N por unidad de producción ($\text{kg N t}^{-1} \text{ gr}$) y el rendimiento (t ha^{-1}).



Prop= riego óptimo; Prpc= riego en el período crítico; T= secano

b) Contenido de N-NO_3^- y N-NH_4^+ edáfico en la siembra y la recolección

Los contenidos de N-NO_3^- y N-NH_4^+ en kg ha^{-1} hasta 0.95 m de profundidad, en la siembra y en la recolección, se presentan en la Tabla n°36 y Figura n°67, respectivamente. El contenido inicial es un promedio de toda la parcela experimental, mientras que el contenido final está expresado en función de cada tratamiento.

Tabla 36. Contenido de N-NO_3^- y N-NH_4^+ en kg ha^{-1} hasta 0.95 m de profundidad en la siembra.

Horizonte	Profundidad (cm)	N-NO_3^- (kg ha^{-1})	N-NH_4^+ (kg ha^{-1})	Total y %
Ap	0-13	24.17	19.13	43.30 (47%)
A1	14-25	10.17	7.10	17.26 (19%)
B1	26-34	4.23	2.69	6.92 (7%)
B21t	35-75	15.82	5.88	21.70 (23%)
B22t	75-95	3.60	0.00	3.60 (4%)
Total		57.99	34.80	92.79 (100%)

Para los niveles nitrogenados Fi y Fa, en condiciones de secano, el contenido final, tanto de N-NO_3^- como de N-NH_4^+ fue mayor que bajo condiciones de riego (T8 y T9). La tendencia, a excepción del nivel Fn (T1, T4, y T7), es que el contenido de N mineral en la recolección aumenta a medida que disminuye la disponibilidad hídrica. El movimiento de iones en el suelo hacia la superficie de las raíces, por flujo masal, es un factor importante en el suministro de nutrientes a la planta. El flujo masal ocurre cuando iones y otras sustancias disueltas son transportados en el flujo de agua hacia las raíces como resultado del proceso de transpiración de la planta. El contenido de nutrientes que llegan a las raíces por flujo masal está determinado por el consumo de agua de las plantas y la concentración promedio de nutrientes en el agua del suelo (Tisdale *et al.*, 1993).

Para los niveles hídricos Prpc y Sec, se observó un incremento en el contenido de N residual (Fig. 67) coincidente con el incremento en el nivel de fertilización nitrogenada. En el nivel hídrico Prop, no se observaron diferencias entre los niveles Fn y Fi, siendo el contenido de N residual menor para Fa. Coincidentemente con estos resultados, Wienhold *et al.* (1995) encontraron, en un

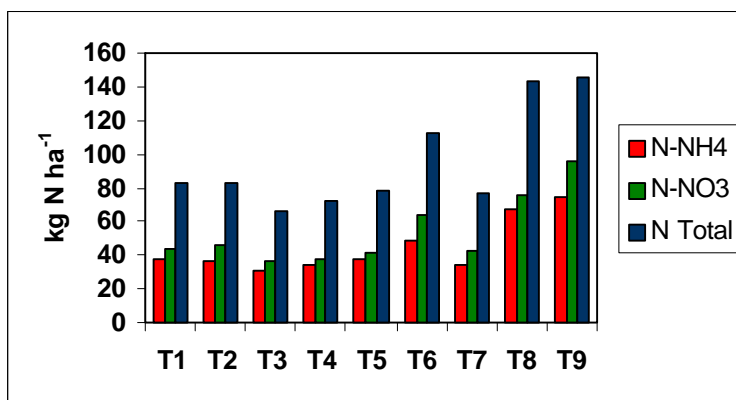
estudio de eficiencia en el uso del N en maíz bajo riego, que, cuando las dosis de N eran mayores, y los niveles de riego menores, existían mayores cantidades de N en el suelo al final del ciclo del cultivo.

Existen estudios que demuestran como la absorción de nitrógeno, en el cultivo de maíz anterior al crecimiento reproductivo, ocurre fundamentalmente en los horizontes superficiales del suelo, mientras que la absorción posterior a la floración femenina queda restringida a los horizontes profundos (Wiesler y Horst, 1993). Las raíces mantienen la capacidad de absorber N en profundidades superiores a los 1.20 m, especialmente después de la floración femenina, cuando ocurre una disminución de las mismas en los 0.60 m superficiales.

Para todos los tratamientos de riego, y T9, alrededor del 50 % de la absorción de N se produjo entre Vt y R6. Para los tratamientos de secano, la absorción postfloración fue del 37 % del total. Debido a la ocurrencia de lluvias posteriores a Vt, y a la alta dosis de N aplicada en T9, se recuperó la absorción después de la floración. En condiciones hídricas no limitantes, el híbrido utilizado es de alta fertilidad, ya que absorbe N por un largo período de tiempo durante su ciclo. Los híbridos de alta fertilidad se caracterizan porque aumentan el contenido de zeína en proporción directa con la dosis de fertilización nitrogenada, lo que resulta en un mayor movimiento de azúcares hacia el grano y mayores rendimientos (Dow Chemical Company, 1989).

El tratamiento T8 tuvo una absorción de 62 y 78 kg N ha⁻¹ menor que T2 y T5 respectivamente, mientras que para T9 la absorción fue menor en 41 y 12 kg N ha⁻¹ con respecto a T3 y T6, respectivamente.

Figura 67. Nitrógeno residual (kg N ha⁻¹) para todos los tratamientos hasta los 0.95 m.



T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

c) Aporte de N con el agua de riego

Para este ambiente, y debido al carácter suplementario del riego aplicado, las cantidades de N incorporadas con el agua de riego fueron de 6.5 ± 1.70 kg N ha⁻¹ y 4.1 ± 1.07 kg N ha⁻¹, para los tratamientos Prop y Prpc, respectivamente.

d) N mineralizado

El N mineralizado fue calculado utilizando la expresión:

$$N_m = N + N_{abs} - N_r \quad (1)$$

donde, N_m = N mineralizado kg ha^{-1} ; $N = N$ residual – N_{inicial} ; N_{abs} = N absorbido kg ha^{-1} en el tratamiento testigo; y N_r = N aportado con el agua de riego kg ha^{-1} .

Para este ambiente, no se consideran las pérdidas por lixiviación, debido a las características de los suelos (Epígrafe 4.1.3), a la capacidad de exploración radicular (Epígrafes 4.1.2.2 y 4.1.2.3), a las características hídricas del ciclo agrícola y a que el riego aplicado fue suplementario.

Debido a que, se optó con un testigo ligeramente fertilizado, de manera de no desfavorecer en gran medida su capacidad de intercepción de N del suelo por parte del cultivo; a la cantidad de N absorbido por el testigo se le restó la cantidad de N aportado multiplicado por el Coeficiente Real de Utilización (CRU). Este último fue calculado en las microparcelas que recibieron ^{15}N (Epígrafe 3.1.5), en condiciones de riego y seco.

En la Tabla N° 37 se presentan los valores de los términos utilizados en el cálculo del N mineralizado.

Tabla 37. Elementos para la determinación del nitrógeno mineralizado.

Tratamiento	CRU (%)	Dosis N * CRU (kg ha^{-1})	N rieg (kg ha^{-1})	N = $N_f - N_i$	N abs (kg ha^{-1})	N min (kg ha^{-1})
T1	60	18	6.50	-10.21	176.41	141.70
T4	60	18	4.10	-19.94	184.7	142.66
T7	24	7.2		-15.33	148.68	126.15

CRU= coeficiente real de utilización; dosis de N * CRU= eficiencia de utilización del fertilizante; N rieg= nitrógeno aportado con el agua de riego; N = diferencia entre el contenido de nitrógeno final e inicial; N abs= nitrógeno absorbido por el cultivo; N min= nitrógeno mineralizado.

T1= Prop; T4= Prpc, Fn; T7= Sec.

4.1.3.2 Eficiencia en el uso del nitrógeno

La eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN), definida en el maíz como el rendimiento en grano por unidad de N presente en el suelo (Moll *et al.*, 1982), depende de la efectividad del sistema radicular (Jackson *et al.*, 1986). En su análisis sobre la EUN, Moll *et al.* (1982), definen dos factores primarios basados en los procesos fisiológicos más importantes: 1) La eficiencia en la absorción de N, que es la cantidad de N en la planta en la madurez fisiológica por unidad de N presente en el suelo; y 2) la eficiencia en el uso del N, la cantidad de grano producido por unidad de N en la planta en la madurez fisiológica. El primer factor equivale a la definición de Pierce y Rice (1988) sobre la EUN, como proceso fisiológico: la eficiencia en la absorción de N. Para poder distinguir entre los procesos en el suelo y en la planta, la expresión de Moll *et al.* (1982) se puede desglosar en: N disponible/ N presente en el suelo (ó N provisto) y N total en la biomasa aérea del cultivo/N disponible.

En la Tabla N° 38 se resumen los factores intervinientes en la EUN (Huggins *et al.*, 1993).

Tabla 38. Resumen de la terminología relativa al uso del nitrógeno.

Abreviatura	Definición
Rend gr	Rendimiento en grano
N disp.	Nitrógeno disponible
N gr	Nitrógeno en grano
N p	Nitrógeno provisto
Nr	Nitrógeno residual inorgánico previo al inicio del crecimiento del cultivo
Nmin	Nitrógeno mineralizado
Nf	Nitrógeno aportado con el fertilizante
Nh	Nitrógeno inorgánico a la cosecha
N t	Nitrógeno en la materia seca aérea
Indices	
1- Rend gr/ Np (kg gr kg N ⁻¹)	Eficiencia en el uso del nitrógeno provisto (Ndisp/Np)* (rend gr/Ndisp) (EUN)
2-N disp./ N p	Eficiencia en la disponibilidad de N provisto
3-Rend gr/Ndisp (kg gr kg N ⁻¹)	Eficiencia en el uso del N disponible (Nt/Ndisp)*(Rend gr/Nt)
4- Nt/Ndisp	Eficiencia en la absorción del N disp
5-Rend gr/Nt (kg gr kg N ⁻¹)	Eficiencia en la utilización del N
6-N gr/Np	Eficiencia en la acumulación de N en grano (Ngr/Ndisp)*(Ndisp/Np)
7-N gr/Ndisp	Eficiencia en la acumulación de N disponible en grano (Nt/Ndisp)*(Ngr/Nt)
8-Ngr/Nt	Índice de cosecha de N (ICN)

Para determinar el nitrógeno presente en el suelo (N provisto; Np), se recurrió a las siguientes expresiones:

$$Np = Nf + (Nr + N \text{ min}) \quad (2)$$

$$Nr + N \text{ min} = Nt + Nh \quad (3)$$

donde: Nf= nitrógeno aportado en el fertilizante; Nr= nitrógeno residual inorgánico previo al inicio del crecimiento del cultivo; Nmin= nitrógeno mineralizado; Nt= nitrógeno contenido en la materia seca total aérea y Nh= nitrógeno inorgánico en la recolección. Todos los términos se calcularon en la parcela testigo y se expresan en kg ha⁻¹.

La aplicación de fertilizante nitrogenado puede incrementar la disponibilidad de N desde otras fuentes de N del suelo y/o estimular el crecimiento radical y la absorción de N (Rao *et al.*, 1991). El uso de parcelas control para estimar la mineralización y el contenido de N mineral en la recolección asume que el hecho antes descrito es mínimo. Si existen pérdidas del Np, entonces, sólo una parte es retenida por el sistema suelo-planta. Esta parte es el denominado N disp, y se calculó con la siguiente aproximación:

$$N \text{ disp} = Nt + Nh \quad (4)$$

En la Tabla n° 39, se presentan los valores de diferentes parámetros intervinientes en el cálculo de las eficiencias en el uso del N.

Tabla 39. Parámetros intervinientes en el cálculo de las eficiencias en el uso del N, para todos los tratamientos.

Tratamiento	Rend gr	N disp	N gr	Np	Nr	Nh	N min	Nf	Nt
T1	9850	243.95	112.17	270.99	92.79	82.58	141.70	30	161.37
T2	12670	278.99	156.82	330.99	92.79	83.18	141.70	90	195.81
T3	12770	309.17	172.76	360.99	92.79	66.85	141.70	120	242.32
T4	8698	242.94	102.00	269.55	92.79	72.85	142.66	30	170.09
T5	10500	285.21	146.67	329.55	92.79	78.40	142.66	90	206.81
T6	11210	330.45	160.12	359.55	92.79	112.15	142.66	120	218.30
T7	5324	208.17	80.78	248.94	92.79	77.46	126.15	30	130.71
T8	6886	274.43	95.88	308.94	92.79	143.19	126.15	90	131.24
T9	6771	384.73	112.65	338.94	92.79	146.14	126.15	120	197.65

Rend gr= rendimiento en grano; N disp= nitrógeno disponible en el suelo (Ec. 4); Ngr= contenido de nitrógeno en el grano; Np= nitrógeno presente en el suelo (Ec. 2); Nr= nitrógeno residual inorgánico previo al inicio del crecimiento del cultivo; Nh= nitrógeno inorgánico en la recolección; N min= nitrógeno mineralizado; Nf= nitrógeno aportado en el fertilizante; Nt= nitrógeno contenido en la materia seca total aérea.

T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa. Las cifras están expresadas en kg ha⁻¹.

Nota: los valores presentados referidos al N presente en el suelo son referidos a la profundidad de 0.90 m.

En la Tabla n° 40 se presentan los cálculos de las distintas EUN, calculadas a partir de los valores presentados en la Tabla n° 39.

Tabla 40. Eficiencias en el uso del N para todos los tratamientos.

Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
Rend gr/Np (kg gr kg ⁻¹ N)	35.96	37.94	35.09	31.87	31.54	30.89	22.35	23.09	20.63
N disp/N p	0.89	0.84	0.85	0.89	0.86	0.91	0.87	0.92	1.00
Rend gr/Ndisp (kg gr kg ⁻¹ N)	40.38	45.41	41.30	35.80	36.81	33.92	25.58	25.09	18.35
Nt/Ndisp	0.66	0.70	0.78	0.70	0.73	0.66	0.63	0.48	0.54
Rend gr/Nt (kg gr kg ⁻¹ N)	61.04	64.71	52.70	51.14	50.77	51.35	40.73	52.47	34.26
N gr/Np	0.41	0.47	0.47	0.37	0.44	0.44	0.34	0.32	0.34
N gr/Ndisp	0.46	0.56	0.56	0.42	0.51	0.48	0.39	0.35	0.31
Ngr/Nt	0.70	0.80	0.71	0.60	0.71	0.73	0.62	0.73	0.57

Rend gr= rendimiento en grano; N disp= nitrógeno disponible en el suelo (Ec. 4); Ngr= contenido de nitrógeno en el grano; Np= nitrógeno presente en el suelo (Ec. 2); Nt= nitrógeno contenido en la materia seca total aérea.

T1= Prop, Fn; T2= Prop, Fi; T3= Prop, Fa; T4= Prpc, Fn; T5= Prpc, Fi; T6= Prpc, Fa; T7= Sec, Fn; T8= Sec, Fi; T9= Sec, Fa.

La relación rend gr/Np, (eficiencia en el uso del nitrógeno presente en el suelo), mostró, para el nivel Prop, la mayor eficiencia con la dosis Fi. Dentro del nivel Prpc, no existieron diferencias. Los valores obtenidos en los tratamientos Sec fueron menores que los de riego, siendo la mayor eficiencia medida para la dosis Fi. Los valores oscilaron entre 38 y 21 kg gr kg⁻¹ N. Estos valores se incrementan para la relación rend gr/Ndisp (eficiencia en el uso del nitrógeno disponible); los valores oscilaron entre 45 y 18 kg gr kg⁻¹ N. Para los tratamientos conducidos bajo riego, las mayores eficiencias se obtuvieron en el nivel Fi. En Sec, fueron en Fn y Fi. Las mayores eficiencias encontradas en los dos índices analizados, para el nivel intermedio de fertilización nitrogenada en condiciones de riego, refuerzan los resultados encontrados en los análisis realizados de desarrollo, crecimiento, rendimiento y efecto del agua en el funcionamiento del cultivo, en los que, no se encuentran respuestas que muestren incrementos en la producción del cultivo con dosis superiores a los 90 kg N ha⁻¹, y están indicando un uso ineficiente para la

formación del rendimiento, del N disponible, cuando la dosis aplicada es mayor a los 90 kg N ha⁻¹

La relación rend gr/Nt (eficiencia en la utilización del N) mostró los mayores valores, con respecto a las eficiencias en el uso del N provisto y disponible. Para los niveles hídricos Prop y Sec, las mayores eficiencias se midieron para el nivel medio de fertilización nitrogenada, mientras que, para Prpc, no existieron diferencias entre los niveles nitrogenados. Los valores encontrados fueron muy homogéneos para los distintos niveles nitrogenados, dentro de Prpc, encontrándose diferencias más marcadas para Prop y Sec. En condiciones de secano, el mayor nivel de fertilización nitrogenada disminuyó, de forma importante, la eficiencia de utilización del N, por la baja disponibilidad del nutriente en condiciones hídricas limitantes.

Los valores de la relación Ndisp/Np (eficiencia en la disponibilidad del N provisto) oscilaron entre 0.84 y 1 (Tabla 40), siendo el valor más alto encontrado para T9, lo que pone de manifiesto que, la limitación ante una restricción hídrica estuvo en la absorción del N por parte de la planta y no en su disponibilidad; el estrés hídrico limitó la absorción del N. Para la situación de riego Prpc, la mayor eficiencia, también, se midió en el tratamiento con mayor dosis de N, mientras que, para Prop, el resultado fue el contrario, la mayor eficiencia en la disponibilidad de N se logró en aquel tratamiento que menor dosis recibió (T1).

La eficiencia en la absorción de N disponible (Nt/Ndisp) tuvo un rango de valores de 0.48-0.78, para T7 y T3, respectivamente (Tabla 40). La relación Nt/Ndisp fue mayor, dentro del nivel hídrico Prop, en el tratamiento que recibió la mayor dosis N (T3); en el nivel Prpc, para los niveles Fi y Fa; y, en Sec, la mayor eficiencia en la absorción se dio para el tratamiento con menor dosis de fertilización N. El análisis de los componentes en la eficiencia en el uso del N es útil para evaluar en cada sistema productivo en particular, que manejo de la fertilización N resulta en una mejora de la eficiencia, y conduce a un mayor rendimiento de grano. En síntesis, del análisis de las distintas eficiencias realizadas hasta el momento, surge, como resultado, que la disponibilidad y posibilidad de absorción de N es fuertemente dependiente de la disponibilidad hídrica y, debido al contenido de N de estos suelos, para este ambiente, una vez más aparece el factor agua como el más limitante.

Los valores de la eficiencia en la acumulación de N provisto en el grano (Ngr/Np), fueron siempre mayores para las mayores dosis de N, en condiciones de riego; mientras que, en secano, los valores para las distintas dosis de N aplicadas fueron similares (Tabla 40).

La eficiencia en la acumulación de N disponible en grano (Ngr/Ndisp) (Tabla 40), fue mayor para Fi, con respecto a Fa, tanto para Prpc como Sec; mientras que en el nivel Prop no existieron diferencias entre estos dos niveles nitrogenados. Para los tratamientos de riego, los tratamientos que recibieron la dosis Fn presentaron la menor eficiencia, mientras que esta situación fue inversa en condiciones de secano.

Los valores del índice de cosecha de N (ICN, Ngr/Nt) (Tabla 40) oscilaron entre 0.57 y 0.80 (T9 y T2, respectivamente). El valor del T9 puede explicarse por la capacidad del híbrido utilizado de absorber un 50 % del N después de Vt. Este hecho, conjuntamente con la ocurrencia de lluvias posteriores a la floración, permitieron recuperar la absorción de N por parte del cultivo. Sin embargo, esta recuperación no sirvió para incrementar el rendimiento, pues ya estaban definidos los destinos reproductivos, hecho que ocurre entre 200 y 100 °C días previos y posteriores a la floración, aunque el mayor porcentaje de N en grano se haya medido para el tratamiento T9. Para los niveles hídricos Prop y Sec, los mayores

ICN se obtuvieron para el nivel Fn; en el nivel hídrico Prpc, el nivel Fa (T6) fue el que mayor valor de ICN mostró.

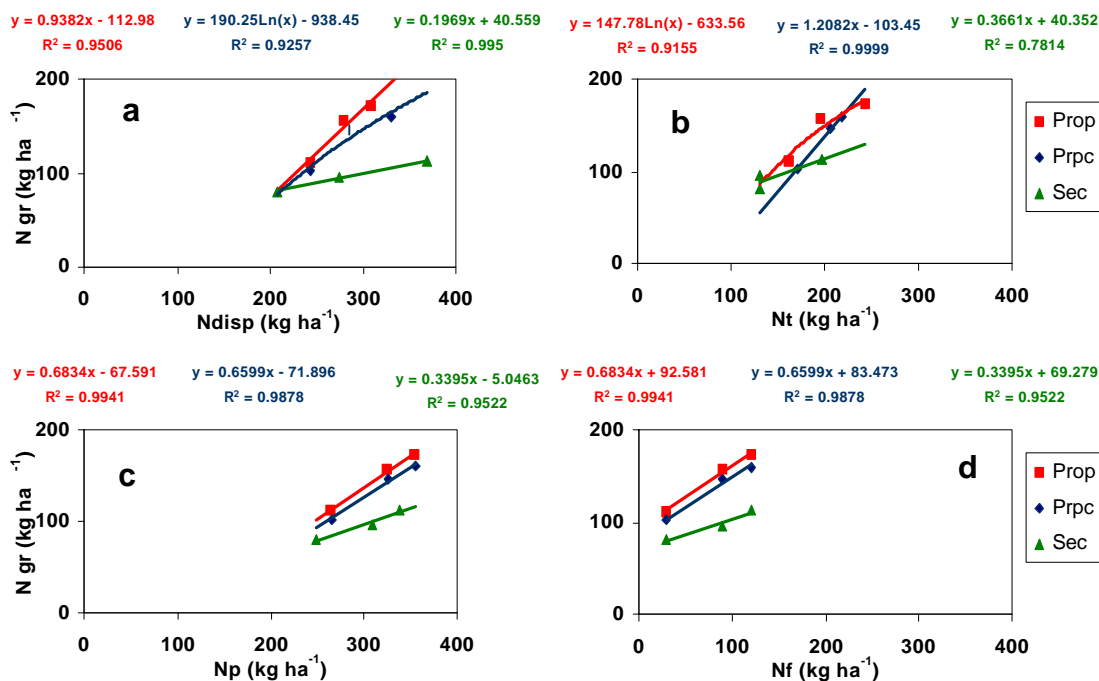
En síntesis, para las tres últimas eficiencias analizadas en la acumulación de N en grano (Tabla 40), se observó que, en condiciones de riego, las eficiencias mas bajas medidas fueron consecuencia de una limitación en el N disponible, ya que fue, en esos tratamientos deficitarios en N, en donde se midieron las eficiencias mas bajas (T1 y T4). En condiciones de secano, la disponibilidad hídrica fue la que limitó la eficiencia, ya que en los tratamientos que recibieron las mayores dosis de N se midieron las menores eficiencias.

Profundizando en el análisis de las diferentes eficiencias, pero considerando cada nivel hídrico como un sistema productivo, se observó que, dentro del nivel Prop, las mayores eficiencias en el uso de N, para el rendimiento y la acumulación de N en el grano, se midieron en el nivel intermedio nitrogenado (Fi), por lo que, pensando como objetivo de producción lograr la mayor eficiencia y la potencialidad del rendimiento, en este nivel hídrico, se logró para la dosis de 90 kg N ha^{-1} . La misma tendencia se encontró para el nivel Prpc, mientras que para secano, la tendencia fue a obtener las mayores eficiencias con la menor dosis nitrogenada (T7). Este tipo de análisis de EUN, permite analizar dentro de cada sistema productivo, no sólo la respuesta del cultivo a la aplicación de fertilizante, como tradicionalmente se realizan los estudios en las EUN, sino que, para cada sistema productivo, permite analizar si existió mayor N mineralizado en uno que en otro y si tuvo mayores pérdidas de N disponible, ya que el Np puede haber sido el mismo en dos sistemas productivos diferentes y, sin embargo, las pérdidas de N pueden haber sido mayores en uno que en otro, con lo que el Ndisp será diferente en ambos sistemas (Huggins y Pan, 1993). Si se analizan los tratamientos que recibieron la dosis mas alta de N en el presente trabajo (T3, T6, y T9), se pudo observar que, para el mismo nivel de Np (130 kg N ha^{-1}), la disponibilidad fue aumentando en forma inversa a la disponibilidad hídrica, es decir que fue mayor para T9, luego para T6 y T3, en orden decreciente (Tabla 40); sin embargo, esta mayor disponibilidad en T9 no se tradujo en una mayor eficiencia de absorción (Tabla 40), que tuvo el comportamiento inverso, fue mayor para T3, y en orden decreciente para T6 y T9, lo que indicó que la disponibilidad hídrica afecta fuertemente la capacidad de absorción del cultivo, mas allá de la disponibilidad de N.

Huggins y Pan (1993), trabajando con labranza convencional y labranza cero en el cultivo de trigo, cultivado con diferentes niveles de nutrición nitrogenada, encontraron que la aplicación de N disminuyó las eficiencias en el uso del N, en la disponibilidad del N provisto, en la utilización de N y en la acumulación en grano; sin embargo, incrementó las eficiencias en el uso del N disponible, en la absorción del N disponible, y en la acumulación de N disponible en grano. Los resultados encontrados en el presente trabajo no presentaron una tendencia tan clara, dependiendo del sistema productivo analizado.

El uso de las relaciones de eficiencia del N (Tabla 40) es particularmente útil para evaluar los cambios en la EUN ante la adición de fertilizante N dentro de un mismo sistema productivo; sin embargo, no lo es para diferentes sistemas, como son los diferentes niveles hídricos. Como se observa en la Figura n° 68, la respuesta del cultivo al N disp, Np, o Nt, se encuentra en diferentes curvas de respuesta, según el nivel hídrico analizado. La comparación podría ser realizada si los niveles de Np, Ndisp, y Nt, fueran iguales en cada sistema.

Figura 68. Relación entre el contenido de nitrógeno en el grano (N_{gr} , $kg\ ha^{-1}$) y: (a) N disponible (N_{disp} , $kg\ ha^{-1}$), (b) N total en materia seca aérea (N_t , $kg\ ha^{-1}$), (c) N provisto (N_p , $kg\ ha^{-1}$), y (d) N aplicado (N_f , $kg\ ha^{-1}$).



R^2 = coeficiente de determinación; N_{gr} = contenido de nitrógeno en el grano; N_{disp} = nitrógeno disponible en el suelo (Ec. 4); N_t = nitrógeno contenido en la materia seca total aérea; N_p = nitrógeno presente en el suelo (Ec. 2); N_f = nitrógeno aportado con el fertilizante.

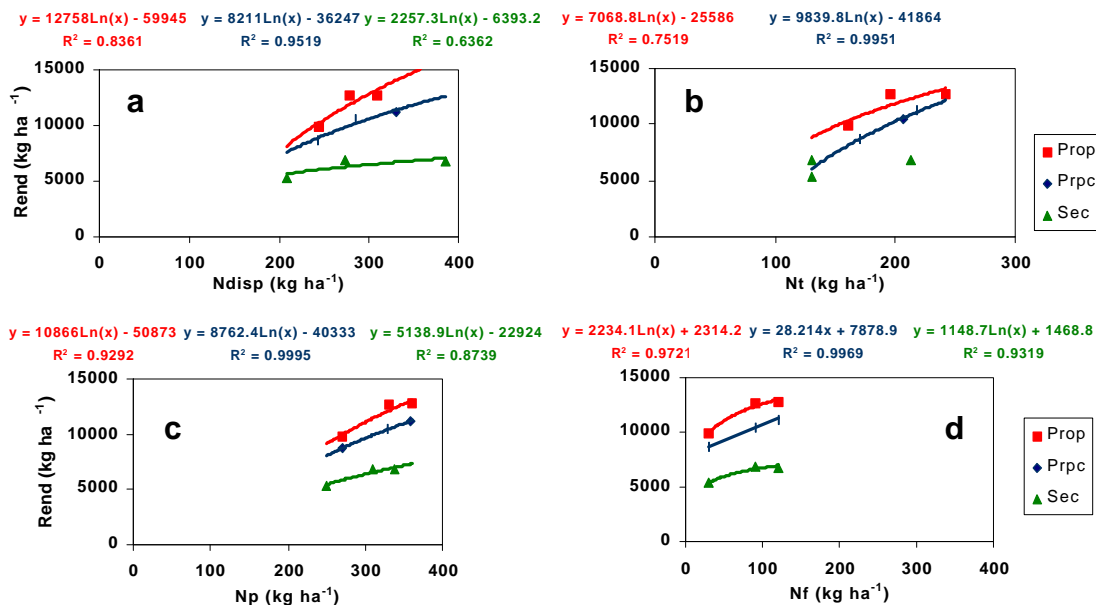
Con una disponibilidad de N superior a los $280\ kg\ ha^{-1}$, los incrementos en la concentración de N en grano son decrecientes, en condiciones de riego. Aunque, para el nivel hídrico Prop, el ajuste de esta relación fue realizado por regresión lineal, se observó una tendencia a encontrar una “meseta” con valores superiores a los $280\ kg\ ha^{-1}$ de N disponible (Fig. 68a). La relación entre N_{gr} y N_t , también muestra una tendencia a ser decreciente para valores de N_t cercanos a los $200\ kg\ N\ ha^{-1}$, en el nivel hídrico Prop; en este nivel, sólo, en el tratamiento T3 se midieron valores superiores a los $200\ kg\ N\ ha^{-1}$. Dentro del nivel hídrico Prpc, la tendencia es, siempre, a mostrar incrementos crecientes. Para esta relación, los tratamientos de secano, también, muestran incrementos crecientes, siendo, en este caso, una limitación de la eficiencia en la absorción (Fig. 68b). Las relaciones entre el contenido de N en grano en función del N provisto y el N aportado por el fertilizante, para los tres niveles hídricos, fueron similares y siempre crecientes (Fig. 68c,d).

La relación entre el rendimiento y la disponibilidad de N también muestra un umbral de $280\ kg\ ha^{-1}$ de N disponible, valor por encima del cual los incrementos en el rendimiento en grano son decrecientes, en condiciones de riego (Fig. 69a). Para la situación de secano la tendencia observada es la misma que para riego, pero con una sensibilidad mucho menor en la respuesta en el incremento del rendimiento con incrementos en el N disponible. Con contenidos de N_t superiores a los $200\ kg\ ha^{-1}$, los incrementos en los rendimientos en los tratamientos de riego son decrecientes. En condiciones de secano, esta relación muestra muy baja sensibilidad, probablemente debido a la capacidad de absorción de N del T9 luego de la floración pero con una cantidad de destinos ya definidos limitada (Fig. 69b).

El rendimiento en grano muestra incrementos decrecientes con valores de N_p superiores a $330\ kg\ ha^{-1}$, para condiciones de riego, y $308\ kg\ ha^{-1}$ para

condiciones de secano (Fig. 69c). El incremento en la respuesta del rendimiento, también, es decreciente con dosis de Nf superiores a 90 kg ha⁻¹, tanto para condiciones de riego como de secano (Fig. 69d).

Figura 69. Relación entre el rendimiento en grano (Rend gr, kg ha⁻¹) y: (a) N disponible (Ndisp, kg ha⁻¹), (b) N total en materia seca aérea (Nt, kg ha⁻¹), (c) N provisto (Np, kg ha⁻¹), y (d) N aplicado (Nf, kg ha⁻¹).



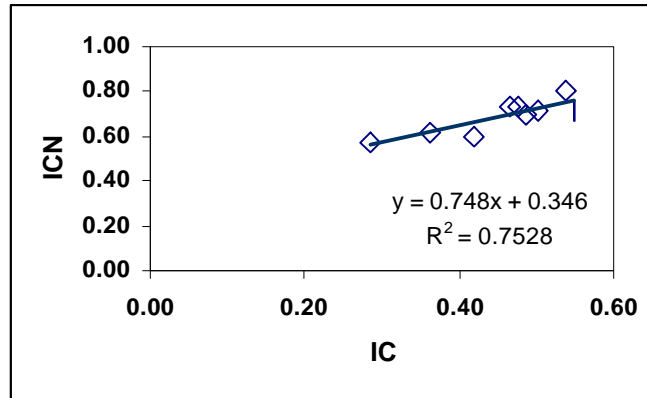
R^2 = coeficiente de determinación; Rend = rendimiento en; N disp = nitrógeno disponible en el suelo (Ec. 4); Nt = nitrógeno contenido en la materia seca total aérea; Np = nitrógeno presente en el suelo (Ec. 2); Nf = nitrógeno aportado con el fertilizante.

Tanto cuando se analiza la relación entre el Ngr como el rendimiento en función de Ndisp, Nt, Np, y Nf, se puede observar (Fig. 68 y 69) que la diferencia entre sistemas productivos es marcada entre el nivel de secano con respecto a los conducidos bajo riego.

El alto contenido de C del grano de maíz (aproximadamente 80 % vs. 1.5 % de N) indica un papel predominante de la fotosíntesis en el logro de altos rendimientos. Sin embargo, el metabolismo del N y el C están fuertemente ligados, por lo que deben ser estudiados en forma conjunta para identificar limitantes del rendimiento, a pesar de la alta relación C/N del cultivo de maíz. En la Figura n° 70, se presenta la estrecha relación que existe entre el metabolismo del C y el del N, a través de la dependencia que existe entre el Índice de cosecha (IC: rendimiento gr/MST, 0 % de humedad), y el índice de cosecha de N (ICN: Ngr/Nt).

Cuando el objetivo es identificar una limitante del rendimiento para incrementar el mismo, es fundamental hacer un análisis global de todos los factores intervinientes en su definición, no solo nutricionales, sino también hídricos, radiativos y térmicos. Para este ambiente, el principal factor limitante de los estudiados y controlados fue el hídrico, y con respecto al ambiente II, la menor amplitud térmica durante el ciclo del cultivo de maíz determina menores rendimientos en Argentina.

Figura 70. Relación entre el índice de cosecha (IC) y el índice de cosecha de nitrógeno (ICN) para todos los tratamientos.



R^2 = coeficiente de determinación

De aquí, surge la importancia de utilizar híbridos capaces de mantener un ritmo de absorción de N importante postfloración, disminuyendo de esta forma la removilización, que, generalmente, es más importante desde las hojas, y de esta forma mantener la capacidad fotosintética del cultivo, logrando altos valores de IC así como de ICN. Otra característica importante será que el híbrido utilizado inicie la translocación en forma temprana desde el tallo, conservando, de esta forma, la capacidad fotosintética.

4.2.1 Desarrollo, crecimiento y rendimiento: ambiente II

4.2.1.1 Desarrollo del cultivo de maíz en el ambiente II

En la Tabla n° 41, se presenta la duración en días y Tiempo Térmico, con valores medios para todos los tratamientos, de las distintas etapas del cultivo y los dos ciclos agrícolas. Ni en el año 1999 ni en el 2000, la deficiencia nitrogenada produjo retrasos significativos en la duración de las diferentes etapas del tratamiento T con respecto a Nop y NC. Por esta razón, no se presenta la duración de las diferentes etapas diferenciadas por tratamiento. Para el segundo ciclo agrícola, la única diferencia medida fue en el momento de ocurrencia de la floración femenina, un día más tarde para T con respecto a Nop y NC, y, un adelantamiento en la madurez fisiológica de 2 días, también para T, con respecto a los tratamientos fertilizados.

El híbrido utilizado presenta una alta sincronía entre la ocurrencia de la floración masculina y femenina, la que no fue afectada por la deficiencia nitrogenada.

Para el ciclo 2000, la fecha de siembra se retrasó debido a la ocurrencia de lluvias que dificultaron la siembra. Se puede observar que, la floración femenina, en este año ocurrió seis días antes con respecto a 1999, y que, la sumatoria térmica fue similar, con una diferencia de tan solo 4 °C. La duración de la etapa de llenado de granos fue similar para ambos ciclos agrícolas. Tampoco se midieron diferencias en la duración de esta etapa entre los diferentes tratamientos. La duración total del ciclo fue similar para los dos años, con una acumulación térmica de 56 °C menor para el ciclo 2000 (2234°C, en 1999, frente a 2242 °C, del año 2000).

La duración total del ciclo del material utilizado en Albacete es mayor, para los dos años que la duración en Pergamino, (372 y 316 °C, para 1999 y 2000, respectivamente). Cuanto mayor es el número de hojas a desplegar, mayor es el requerimiento térmico del cultivo para cambiar el estado del ápice de vegetativo a reproductivo. La duración de este período depende del número de hojas a desplegar y de la velocidad de aparición de las mismas o filocrono (Kiniry y Bonhomme, 1991). El material utilizado en España tiene un mayor número de hojas que el utilizado en Argentina (datos no presentados).

La fase lineal de la etapa de llenado de granos está altamente controlada por la temperatura (Jones *et al.*, 1981; Tollenar y Bruulsema, 1988). Para el ciclo 1999, el tiempo térmico de la etapa efectiva de llenado de granos fue de 680 °C, en promedio para todos los tratamientos. Para el ciclo 2000, la duración de esta etapa fue mayor en días, pero no así en los grados día acumulados, que fue de 675, para Nop y NC, y 690 °C, para T. Para este ambiente, la mayor diferencia en el Tiempo Térmico entre años, se dio para la etapa V6-floración femenina, hecho que puede ser explicado por el retraso en la fecha de siembra en el ciclo 2000. Al igual que para el ambiente I (Pergamino, Argentina), se puede considerar estable al Tiempo Térmico y útil para predecir la fenología del cultivo en este ambiente.

Tabla 41. Duración en días y Tiempo Térmico de las diferentes etapas fenológicas para los dos ciclos agrícolas (Año 1999 y 2000).

a) Ciclo 1999					
Etapas del ciclo	Fecha	Duración etapa (días)	Duración acumulada (días)	Tiempo Térmico (° C)	Tiempo Térmico acumulado (° C)
Siembra – emergencia.	05/05–12/05	7	7	97	97
Emergencia – V6	12/05–15/06	33	40	433	530
V6 – Floración femenina	15/06-24/07	39	79	718	1248
Floración femenina – MF	24/07-18/09	56	135	986	2234
b) Ciclo 2000					
Etapas del ciclo	Fecha	Duración etapa (días)	Duración acumulada (días)	Tiempo Térmico (° C)	Tiempo Térmico acumulado (° C)
Siembra – emergencia	19/05-28/05	9	9	107	107
Emergencia – V6	28/05-30/06	33	42	557	664
V6 – Floración femenina	30/06-31/07	31	73	588	1252
Floración femenina – MF	31/07- 28/09	58	131	990	2242

V6= sexta hoja desplegada; MF= maduración fisiológica del grano

4.2.1.2 Producción de biomasa aérea y velocidad de crecimiento

Muchow y Davis (1988) encuentran producciones de MST en la recolección de 650, 1200, 1500, y 1600 g m⁻², correspondientes a los niveles de N de 0, 60, 120, y 240 kg N ha⁻¹, respectivamente. Muchow (1988b) atribuye las mayores producciones de MST con altos niveles de N, al mayor desarrollo del área foliar durante el período vegetativo y a una mayor duración de la misma durante el período de llenado de grano. El mantenimiento de área foliar funcional durante la etapa de llenado de grano está asociada a los mayores niveles de N foliar, debido a la menor removilización de N foliar hacia los granos en desarrollo.

Los altos valores de MST encontrados en los dos años de ensayo, son comparables a los máximos hallados en la bibliografía. Flannery (1986), obtuvo valores de MST de 3170 g m⁻². Overman *et al.* (1994) encontraron valores de 2960 g m⁻². El ciclo del cultivo, en 1999, tuvo una duración total de 144 días, correspondientes a una sumatoria térmica de 2307 °C. Esto representa una tasa de producción de MST media de 16 a 17 g m⁻² d⁻¹, superando las tasas medidas para sorgo (Fisher y Wilson, 1975), y para maíz (Overman *et al.*, 1994; Uarth y Andrade, 1995).

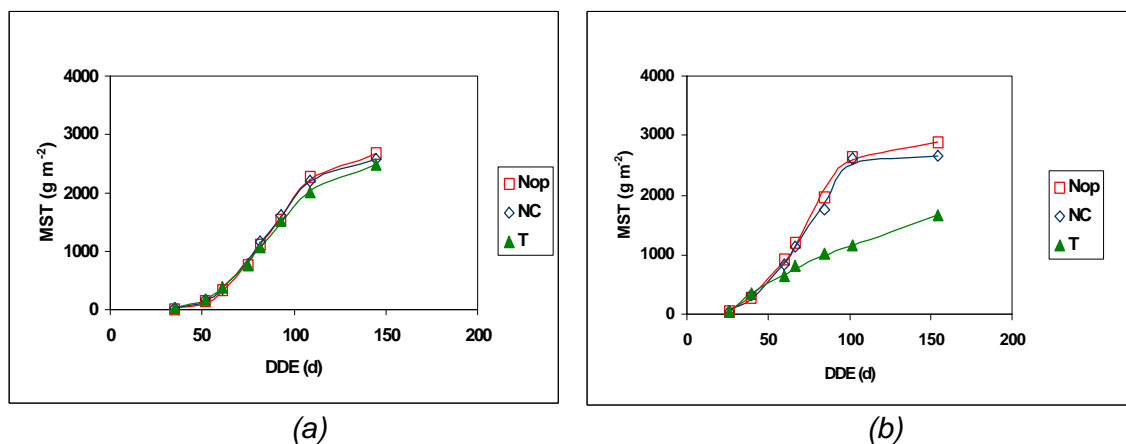
En el año 1999, la producción de MST no fue afectada por los niveles de N (Fig. 71a). El tratamiento T rindió 8 % y 3 % menos que el Nop y NC, respectivamente. A la vez, el valor medido para NC fue un 4 % menor, comparado con el Nop, si bien no existieron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para las diferentes fechas de muestreo (Tuckey, $\alpha= 0.05$) (Tabla 19, Anejo 2).

Para el año 2000 (Fig. 71b), el efecto de la deficiencia nitrogenada mostró una disminución clara en la producción de MST para el tratamiento T, en relación a NC y Nop. Aunque para las dos primera fechas de muestreo, tampoco existieron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (Tuckey, $\alpha= 0.05$). Es

a partir de V7 (40 DDE), cuando se midieron diferencias (Tabla 19, Anejo 2). La MST en T fue 41 % (12 t ha^{-1}) y 36 % (10 t ha^{-1}) menor que la MST en Nop y NC, respectivamente. Cox *et al.* (1993) también encuentran, una reducción en la acumulación de MST en el tratamiento que no recibió N, debido a una disminución en el área foliar y en la eficiencia fotosintética de la misma. Uhart *et al.* (1995) encuentran, en un ensayo de maíz bajo riego, disminuciones de 59 y 68 %, en la MST, 15 días después de la floración y en R6, respectivamente, como respuesta a una deficiencia nitrogenada en el cultivo de maíz. La producción de MST para el tratamiento NC fue un 8 % menor, comparada con Nop. En ninguno de los dos años de ensayo, la diferencia en la fertilización entre los tratamientos Nop y NC generaron diferencias significativas en la producción de MST, es decir, que no se midió respuesta a la fertilización con dosis superiores a los 150 kg N ha^{-1} . Jokela y Randall (1989) encontraron incrementos en el rendimiento del cultivo con dosis crecientes de N, desde 0 a 225 kg ha^{-1} . Cerrato y Blackmer (1990), encontraron un incremento lineal en el rendimiento en grano con dosis de N desde 0 a 100 kg ha^{-1} ; sin embargo, las dosis medias económicamente óptimas, calculadas por diferentes modelos abarcan valores desde 128 a 379 kg N ha^{-1} . El patrón de crecimiento encontrado en el presente trabajo es consistente con los descriptos por numerosos autores (Duncan, 1975; Barloy, 1984; Andrade *et al.*, 1996).

En el año 2000, la diferencia en la producción de MST entre T, y Nop y NC, se midió a partir de V7 (60 DDE). La mayor diferencia (15 t ha^{-1}), se midió en el estado R5 (111 DDE). Una disminución en el IAF durante el período vegetativo causa una disminución en la producción de MST, posiblemente asociada al menor tamaño y actividad del sistema fotosintético (Prioul *et al.*, 1990). Cox *et al.* (1993) no encuentran diferencias en la acumulación de MST en R1 entre los tratamientos que recibieron 56 kg N ha^{-1} , aplicados en V4, 140 aplicadas en V4(70) y V8 (70); y 225, aplicadas en el estado V4 (75), V8 (75) y R1 (75).

Figura 71. Evolución de la materia seca aérea total (MST) para cada nivel de fertilización nitrogenada, a lo largo del ciclo agronómico del maíz hasta la cosecha. (a) 1999 y (b) 2000. Los símbolos representan los valores observados y las líneas, las ecuaciones de ajuste.



DDE, días desde emergencia; MST= materia seca total. Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

De acuerdo a la acumulación de MST medida en todos los tratamientos en el año 1999, y en los tratamientos fertilizados en el 2000, se puede argumentar que la actividad fotosintética no fue limitante durante le etapa de llenado de grano, pero con

un aporte variable, según el tratamiento. Resultados coincidentes fueron hallados por Swank *et al.* (1982).

En la Tabla n° 42, se presentan los modelos de ajuste que recogen la evolución de la materia seca total para los dos años de ensayo. En la selección de los modelos, el criterio fue elegir, dentro de las funciones con mayores valores de R^2 , aquellas de mayor significado agronómico y más sencillas en su formulación matemática.

Tabla 42. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R^2) de los modelos matemáticos (polinomios de tercer grado) que representan la evolución, a lo largo del ciclo agronómico del maíz, de la materia seca aérea total.

Año 1999					
Tratamiento	a (x) ³	b (x) ²	c (x)	d	R ²
Nop	-0.006516	1.726284	-108.646561	2001.073191	0.99
NC	-0.006258	1.634160	-100.034524	1796.367432	0.99
T	-0.004981	1.305746	-76.472684	1308.057071	0.99
Año 2000					
Tratamiento	a (x) ³	b (x) ²	c (x)	d	R ²
Nop	-0.004659	1.083129	-40.601136	462.682303	0.99
NC	-0.004833	1.133278	-46.525857	608.748500	0.99
T	0.000580	-0.203313	32.846738	-689.609858	0.99

*: p 0.05 **; p 0.01; R²= coeficiente de determinación; a,b,c,d= coeficientes de los modelos de ajuste.

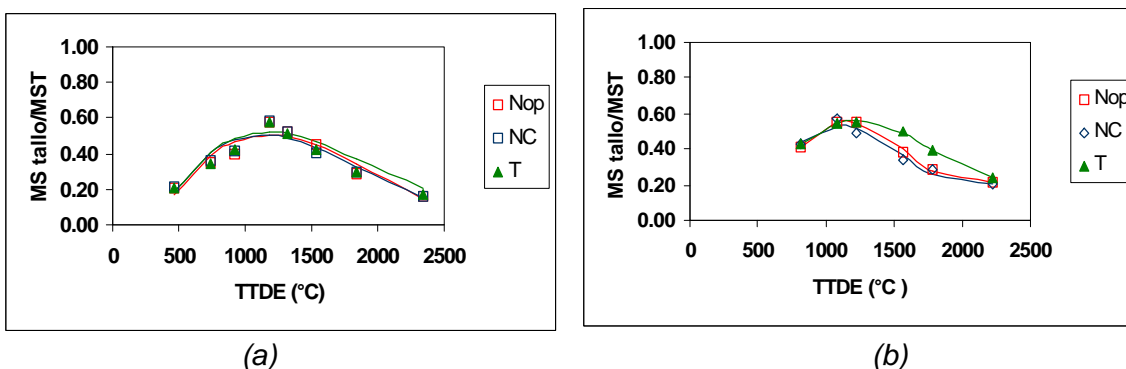
Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

4.2.1.3 Participación porcentual de los distintos órganos aéreos en la materia seca total

En el año 1999, la relación MShoja/MST y MStallo/MST (Fig. 72 y 73a), durante el ciclo del cultivo, no presentó diferencias entre niveles nitrogenados (Tuckey, $\alpha = 0.05$). Para este año, y a partir de la floración, la relación MStallo/MST aumentó entre un 12 y 36 % para T, con respecto a Nop y NC (Fig. 72b). Esta relación disminuyó un 20 % en el tratamiento T en el año 2000, con respecto a 1999. El déficit nitrogenado disminuyó en un 14 % la relación hoja/MST para T, comparado con Nop y NC en el año 2000 (Fig. 73b).

La acumulación de MS en tallo ocurre hasta alrededor de 20 días posteriores a la floración. A partir de este momento comienza la removilización (Epígrafe 4.2.1.8). El inicio de la transferencia de asimilados del tallo a grano, a partir de carbohidratos solubles, depende de la duración y tamaño del sistema fotosintético, y coincide con el período de mayor acumulación de MS en la espiga. La intensidad de esta removilización estará regulada por la fuerza o tamaño de los destinos reproductivos (Swank *et al.*, 1982).

Figura 72. Evolución de la relación MS tallo/ MST en función de los grados días desde la emergencia: (a) 1999, y (b) 2000. Los símbolos abiertos representan los valores calculados y la líneas las ecuaciones de ajuste.



MStallo= materia seca tallo; MST= materia seca total; TTDE= Tiempo Térmico desde la emergencia. Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

En la Tabla nº 43, se presentan los modelos de ajuste (ecuaciones polinómicas de tercer grado) que recogen la evolución de la relación MS tallo/MST, su significación estadística y coeficiente de determinación (R²), para los dos ciclos agrícolas (años 1999 y 2000).

Tabla 43. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R²) de los modelos matemáticos (polinomios de tercer grado) que representan la evolución de la participación porcentual de la materia seca del tallo en la total.

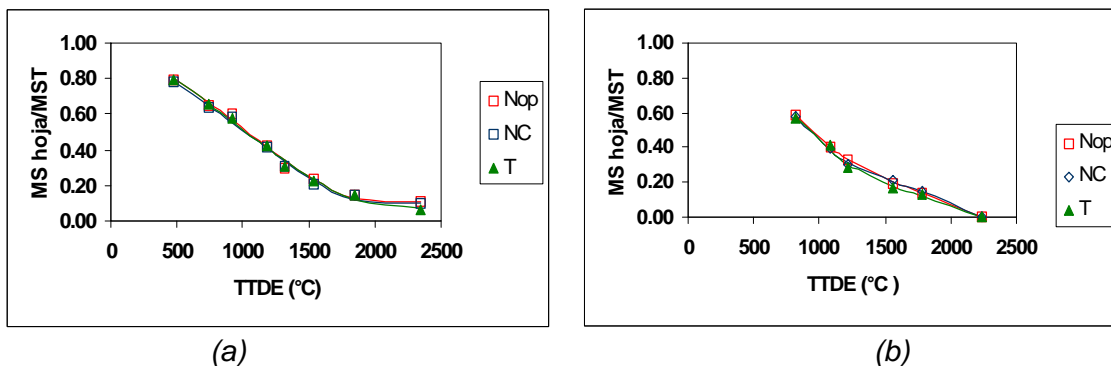
Tratamiento	a (x) ³	b (x) ²	c (x)	d	Nivel de significación	R ²
Ciclo 1999						
Nop	2.028946E-10	-1.223658 E-06	0.002044	-0.537610	**	0.82
NC	2.535805E-10	-1.412077 E-06	0.002229	-0.576853	**	0.82
T	2.357747E-10	-1.341675 E-06	0.002158	-0.564912	**	0.84
Ciclo 2000						
Nop	8.233620E-10	-3.972939 E-06	0.005821	-2.138581	*	0.99
NC	7.165353E-10	-3.404227E -06	0.004864	-1.654551	*	0.89
T	3.971803E-10	-2.147050 E -06	0.003441	-1.164079	*	0.99

*: p 0.05, **: p 0.01; a,b,c,d= coeficientes de los modelos de ajuste. Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

El hecho de que, la deficiencia nitrogenada haya afectado la participación porcentual del tallo y no de las hojas fotosintetizadoras en la MST en el año 2000, está indicando que la provisión de asimilados al grano en el tratamiento testigo, se hace a expensas de la MS acumulada en el tallo, ya que, existe una menor proporción de hojas fotosintetizadoras que mantengan el sistema fotosintético y aseguran un flujo adecuado de asimilados al grano.

Los primeros estudios sobre la contribución de los carbohidratos solubles en el rendimiento en grano del cultivo de maíz (Daynard *et al.*, 1969) hablan de la creciente importancia de la contribución del tallo al llenado del grano cuando el área fotosintética por planta es reducida, o sombreada, durante el período de llenado efectivo. Este hecho se pone en evidencia en el segundo año de experimentación (año 2000).

Figura 73. Evolución del peso de las hojas fotosintetizantes en relación a la MST (MS hoja/ MST) en función de los grados días desde la emergencia. (a) 1999, y (b) 2000.



MS hoja= materia seca hoja fotosintetizadora; MST= materia seca total; TTDE= Tiempo Térmico desde emergencia. Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

En la Tabla n°44, se presentan los modelos de ajuste (ecuaciones polinómicas de tercer grado) para la evolución de la relación MS hoja fotosintetizadora/MST y su significación estadística y coeficiente de determinación (R^2), para los dos ciclos agrícolas (años 1999 y 2000).

Tabla 44. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R^2) de los modelos matemáticos (polinomios de tercer grado) que representan la evolución de la participación porcentual de la materia seca de las hojas fotosintetizadoras en la total.

Tratamiento	a (x) ³	b (x) ²	c (x)	d	Nivel de significación	R ²
Ciclo 1999						
Nop	1.48578E-10	-4.435010E-07	- 0.000131	0.942839	**	0.98
NC	1.39702E-10	-4.115580E-07	-0.000161	0.939824	**	0.99
T	1.10416E-10	-3.062260E-06	-0.000280	0.986102	**	0.99
Ciclo 2000						
Nop	-1.6904E-10	9.373590E-07	-0.002011	1.697692	**	0.99
NC	-2.89715E-10	1.470280E -06	-0.002725	1.977268	*	0.99
T	-1.89945E-10	1.072810E -06	-0.002257	1.806661	*	0.98

*: p 0.05, **: p 0.01; a,b,c,d= coeficientes de los modelos de ajuste. Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

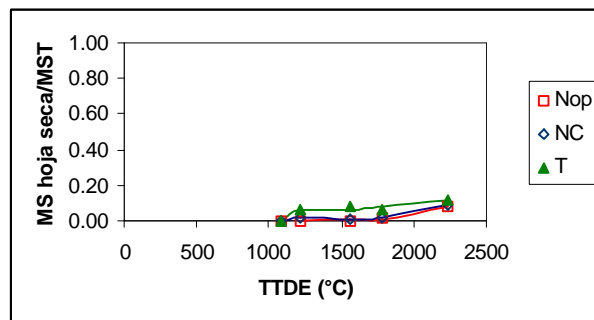
Para el ciclo 1999, sólo en el último muestreo realizado se midieron valores de hoja seca, y, en porcentajes muy pequeños, sin diferencias entre tratamientos, comparado con el ciclo 2000 (datos no presentados). Para la relación MS hoja seca/MST y en el año 2000 (Fig. 74), sí se observaron diferencias entre el tratamiento T con respecto a Nop y NC. El inicio de la senescencia fue mas temprana en este tratamiento, a partir del día 67 DE, y la evolución posterior, siempre alcanzó valores mas altos con respecto a los tratamientos fertilizados. Estos valores fueron un 7, 6, y 4 % mayores, para los días 85, 102, y 154 DE, con respecto a Nop; y, 7, 5, y 3 % mayores, con respecto a NC. El tratamiento NC tuvo valores mayores de hoja seca con respecto a Nop, probablemente por los mayores valores de IAF, (Epígrafe 4.2.1.4), ya antes de la floración, había superado los valores de IAF crítico para este ambiente, hecho que determina un mayor porcentaje de sombreado en las hojas inferiores (Epígrafe 4.2.1.5). Durante el período de máxima área foliar, el índice de área foliar (IAF), no debería exceder el requerido para lograr la máxima intercepción de la radiación fotosintéticamente activa (RFA), o el cultivo

deberá usar fotoasimilados para la producción de nuevas hojas no económicas en el balance de C, que podría haber utilizado en la producción de granos (Gifford y Thorne, 1984).

La diferencia en los valores de hoja seca, está relacionada con la menor duración del área foliar en el tratamiento T, y un comienzo mas temprano de la senescencia, es decir un amarillamiento mas precoz por pérdida de clorofila (Thimann, 1980), lo que determinó una menor duración del aparato fotosintético en este tratamiento, y una removilización de asimilados mas temprana con respecto al resto. La senescencia foliar está también caracterizada por un incremento en la actividad proteolítica (Feller *et al.*, 1977) y una disminución de los contenidos de proteína y nitrógeno (Martin y Thimann, 1972). Los síntomas típicos de una deficiencia nitrogenada son la clorosis y una disminución del contenido de clorofila. Los síntomas de una deficiencia nitrogenada y el inicio de la senescencia son similares; sin embargo, la presencia de una deficiencia determina el comienzo anticipado de la senescencia foliar (Christensen *et al.*, 1981).

Girardin *et al.* (1985) encuentran un inicio anticipado de la senescencia cuando la deficiencia nitrogenada se produce en forma previa a la floración, no encontrando diferencias entre tratamientos cuando la deficiencia es posterior. Si el N es provisto nuevamente, después de este período de estrés, se retrasa la senescencia. Una explicación posible a este efecto, es una compensación de las plantas estresadas, caracterizada por una mayor asimilación de $N-NO_3$ por parte de las raíces. Esta compensación, debida a la absorción de N postfloración, suministra el N requerido por la espiga, sin necesidad de removilizar a partir de las hojas (Girardin *et al.*, 1985). Sin embargo, ha sido referido por varios autores (Christensen *et al.*, 1981; Girardin *et al.*, 1985) que la translocación de N hacia órganos reproductivos no es el único factor causante de la senescencia. Debido a que la translocación de N es un proceso reversible, posiblemente, exista información codificada genéticamente para reactivar los cloroplastos y otros compartimentos celulares hasta estados avanzados de senescencia foliar (Thomas y Stoddart, 1980).

Figura 74. Evolución del peso de las hojas secas en relación a la MST (MS hojas secas/ MST) en función de los grados días desde la emergencia para todos los tratamientos y el ciclo 2000.



MS hoja seca= materia seca hoja seca; MST= materia seca total; TTDE= Tiempo Térmico desde emergencia. Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

En la Tabla n° 45 se presentan los modelos no lineales (ecuaciones polinómicas de segundo grado) que expresan, para el año 2000, y cada uno de los tratamientos nitrogenados, a lo largo del ciclo del cultivo, la relación entre la materia seca de las hojas secas y la aérea total (MS hoja seca/MST), en función de los grados días acumulados desde la emergencia (TTDE, °C).

Tabla 45. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R^2) de los modelos matemáticos (polinomios de segundo grado) que representan la evolución de la participación porcentual de la materia seca de las hojas secas en la total.

Tratamiento	b (x) ²	c (x)	d	Nivel de significación	R ²
Ciclo 2000					
Nop	1.28657569 E-07	-0.000365	0.255970	*	0.92
NC	1.46569521 E-07	- 0.000440	0.338889	*	0.98
T	7.22342212 E-08	- 0.000197	0.198914	*	0.62

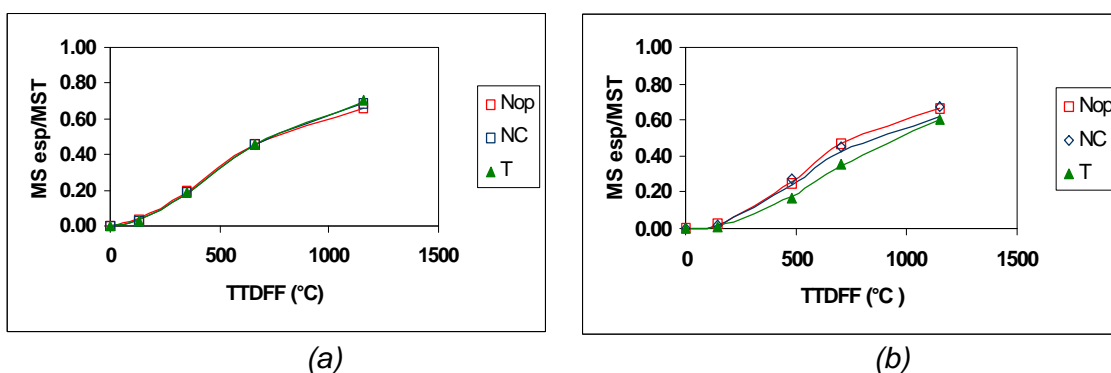
*: p 0.05, **: p 0.01; b,c,d= coeficientes de los modelos de ajuste.

Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

La relación entre la materia seca espiga y la materia seca total (MSesp/MST) en madurez, fue de 69, 69 y 72 %, para 1999; y de 67, 67 y 60 %, en el año 2000 para Nop, NC y T, respectivamente (Fig. 75a,b). La tasa de crecimiento de la espiga fue de 157.7, 303.3, y 25.2 kg ha⁻¹ d⁻¹ (85, 102, y 154 DDE, respectivamente) menor en T con respecto a Nop, en el año 2000. Este resultado pone de manifiesto que el efecto de una deficiencia nitrogenada, expresada en el segundo año de ensayo, afectó a la tasa de crecimiento de la espiga en el tratamiento T, y consecuentemente, al peso final de la espiga y el rendimiento.

La relación MSesp/MST en madurez está relacionada con el número y actividad de destinos reproductivos, y la definición de esos destinos está asociada al CGR en floración, que, a su vez, está afectado por la disponibilidad de N (Uhart y Andrade, 1995). El menor valor medido en esta relación para el tratamiento T, indica que una reducción en número de destinos, (Epígrafe 4.2.1.9), fue limitante del rendimiento.

Figura 75. Evolución de la materia seca de la espiga en relación a la materia seca total aérea (MS esp/MST) en función de los grados-día acumulados desde la floración femenina (TTDFF, °C). (a) 1999, y (b) 2000.



Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

En la Tabla n° 46, se presentan los modelos no lineales (ecuaciones polinómicas de tercer grado) que expresan, para cada uno de los tratamientos nitrogenados, la evolución, a lo largo del ciclo del cultivo, de la relación entre la materia seca de la espiga y la materia seca total (MS espiga/MST), en función de los grados-día acumulados desde la floración femenina.

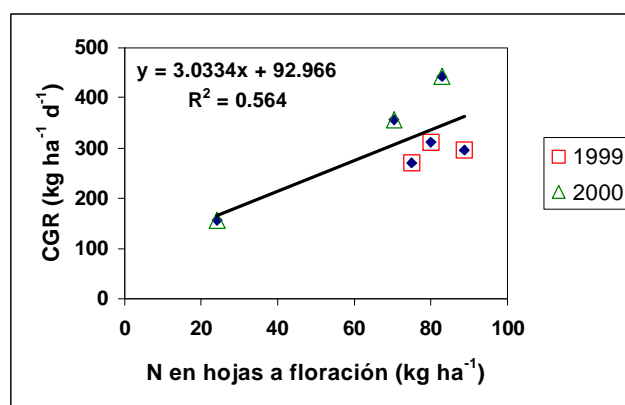
Tabla 46. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R^2) de los modelos matemáticos (polinomios de tercer grado) que representan la evolución de la participación porcentual de la materia seca de la espiga en la total (MS esp/MST), a lo largo del ciclo del cultivo, en relación a los grados-día acumulados desde la floración femenina.

Tratamiento	a (x) ³	b (x) ²	c (x)	d	Nivel de significación	R ²
Ciclo 1999						
Nop	-8.74764E-10	1.34804 E-06	0.000189	-0.004693	*	0.99
NC	-9.40811E-10	1.50983 E-06	0.000111	-0.004998	*	0.99
T	-9.31102E-10	1.52026 E-06	9.547E-05	-0.002730	*	0.99
Ciclo 2000						
Nop	-1.15517E-09	1.95412 E-07	-0.000142	0.002591	*	0.99
NC	-9.14392E-10	1.54220 E -06	2.168E-05	-0.004445	*	0.99
T	-7.49565E-10	1.45819 E -06	-0.000166	0.003172	*	0.99

*: p 0.05, **: p 0.01; a,b,c,d = coeficientes de los modelos de ajuste. Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

Dwyer *et al.* (1995) encuentran umbrales en la concentración de N foliar, para la fotosíntesis. Estos umbrales son de 18.5, 10, y 5.8 g N kg⁻¹ hoja seca, para el período preantesis, antesis, y llenado de grano, respectivamente. Además de nivel de nutrición nitrogenada en hoja, existe un factor ontogénico que afecta la relación concentración N foliar-fotosíntesis. Mc Cullough *et al.* (1994) encuentran que, aunque el mantenimiento del área foliar fotosintéticamente activa contribuye a mantener la tasa de fotosíntesis, la concentración de N foliar no es el único factor que afecta a la fotosíntesis durante la etapa de llenado de grano, y el comienzo de la senescencia reduce la respuesta fotosintetizadora al N, a medida que aumenta la edad de la planta.

Figura 76. Modelo lineal que recoge la relación existente entre el crecimiento absoluto del cultivo a floración (CGR, kg ha⁻¹ d⁻¹) y el contenido foliar de nitrógeno en la floración (N en hojas, kg ha⁻¹).



Nota: el ajuste fue realizado para los dos ciclos agrícolas en su conjunto ().

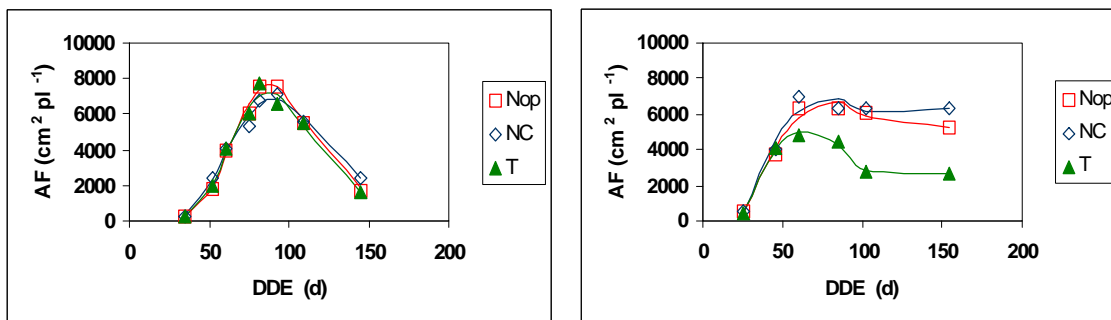
A diferencia de los resultados obtenidos para Pergamino, Argentina (Ambiente I), en el ensayo de Albacete, se ha verificado que existe una relación lineal entre el valor inferior que corresponde a los valores de nitrógeno foliar y CGR del tratamiento T de año 2000, con el resto de valores obtenidos con los otros tratamientos (Fig. 76). En los valores medidos para el año 1999 para los tres tratamientos, y para Nop y NC, en el 2000, el incremento de CGR en la floración no es proporcional al incremento en la concentración de N foliar, posiblemente, porque se haya alcanzado el techo o nivel máximo para este parámetro, por encima del cual no se incrementa el CGR.

4.2.1.4 Area foliar

La evolución del área foliar (AF) fue similar en los tres tratamientos nitrogenados en el año 1999, con valores crecientes hacia la floración, presentando el máximo, de 7750 $\text{cm}^2 \text{pl}^{-1}$ para el tratamiento T, y valores de 7565 y 6797 $\text{cm}^2 \text{pl}^{-1}$, para Nop y NC, respectivamente (Fig. 77a). Para esta campaña agrícola, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. El inicio de la senescencia se observó a partir de R3, para todos los tratamientos. Para el año 2000 (Fig. 77b), las diferencias encontradas a partir de R1 (día 60 DE) entre el tratamiento T y los dos restantes, fueron estadísticamente significativas (Tabla 20, Anejo 2). En este año, la deficiencia de fertilización nitrogenada produjo una disminución importante en el área foliar, que comenzó a manifestarse a partir de la floración. Los valores máximos en este año fueron de 6375, 6920, y 4827 $\text{cm}^2 \text{pl}^{-1}$ para Nop, NC, y T, respectivamente.

El comienzo de la senescencia se da, para los tres tratamientos, también, a partir de R3, pero con mayor intensidad en el tratamiento T. No existió respuesta a la fertilización en el AF con dosis superiores a los 150 kg N ha^{-1} , ya que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos Nop y NC, para área foliar.

Figura 77. Evolución del área foliar (AF, $\text{cm}^2 \text{pl}^{-1}$), en función de los días transcurridos desde emergencia (DDE, d); (a) 1999; (b) 2000. Los símbolos representan los valores observados, las líneas las ecuaciones de ajuste.



Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

En la Tabla n° 47 se presentan las ecuaciones matemáticas (polinomios de cuarto grado) que relacionan el área foliar con los días desde emergencia.

Tabla 47. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R^2) de los modelos matemáticos (polinomios de cuarto grado), que representan la evolución del área foliar (AF, $\text{cm}^2 \text{pl}^{-1}$) durante el ciclo de cultivo del maíz en relación a los días transcurridos desde la emergencia (DDE).

Tratamiento	a (x^4)	b (x^3)	c (x^2)	d (x)	e	Nivel de significación	R^2
Ciclo 1999							
Nop	0.00112	-0.39649	46.9323	-2096.00	31498.01	*	0.99
NC	0.00060	-0.21393	24.6677	-1002.24	13440.60	**	0.97
T	0.00098	-0.34484	40.1948	-1743.31	25329.70	*	0.99
Ciclo 2000							
Nop	0.00020	-0.054477	3.10806	134.30	-4272.285	**	0.98
NC	0.00011	-0.01943	-1.31072	355.33	-7628.711	*	0.96
T	0.00009	-0.00965	-2.9654	408.30	-7991.915	*	0.99

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$; a,b,c,d,e = coeficientes de los modelos de ajuste.

Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

4.2.1.5 Análisis de crecimiento

a) Índice de área foliar (IAF)

En las etapas tempranas del ciclo del cultivo, la relación entre la superficie fotosintéticamente activa y la superficie del suelo (IAF), es muy pequeña, y, también, lo es la interceptación de la RFA en este momento, siendo alta la proporción de radiación transmitida. A medida que avanza el ciclo del cultivo, se incrementa el IAF y la RFA interceptada, alcanzándose las máximas tasas de crecimiento del cultivo con porcentajes de interceptaciones de RFA de 95 (Arguisain, 1990). El IAF que posibilita alcanzar las máximas tasas de crecimiento del cultivo se denomina IAF crítico. Posteriormente de haberse alcanzado este valor, a medida que se incrementa el IAF, aumenta la proporción de hojas sombreadas en la porción inferior del tallo, y cambia la relación entre la fotosíntesis y la respiración en esas hojas, dejando de ser productoras netas de MS, y afectando la evolución de los índices de crecimiento. Las hojas superiores son las responsables en mayor medida, de la interceptación de RFA y las principales contribuyentes durante el período de llenado de granos, aunque las hojas situadas por debajo de la espiga, en función de la RFA que reciben, aportan al llenado, manteniendo el criterio de “fuente cercana” (Simmons y Jones, 1985). La evolución del IAF está altamente influenciada por la provisión de N al cultivo.

La fertilización nitrogenada en maíz influye sobre la producción de MS a través del desarrollo y crecimiento del área foliar, la duración de la misma y su eficiencia fotosintética (Cox *et al.*, 1993). Muchow (1988a) estudia el desarrollo del área foliar bajo diferentes niveles de N, y encuentra valores de IAF en R1 de 2.3, 3.4, 3.7 y 3.5, bajo niveles de N de 0, 60, 120, y 240 kg N ha⁻¹, respectivamente.

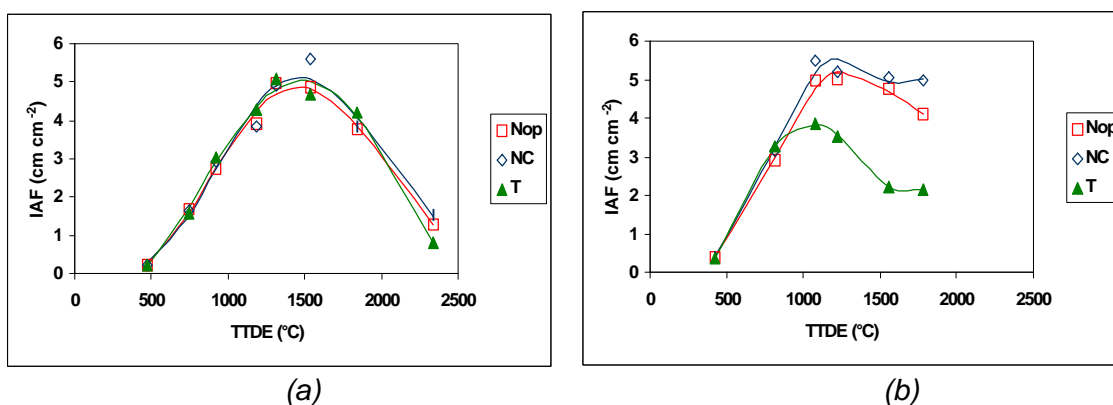
Para el ciclo agrícola 1999, la evolución del IAF no presentó diferencias estadísticamente significativas (Tuckey, $\alpha= 0.05$) entre tratamientos, alcanzándose para todos ellos valores de IAF críticos (Fig. 78a) (Tabla 21, Anejo2). En el año 2000, a partir de los 1079 °C, (día 60 DE), las diferencias entre los valores de IAF medidos fueron estadísticamente significativas (Tuckey, $\alpha= 0.05$) entre el tratamiento T y Nop y Nc (Tabla 21, Anejo2) (Fig. 78b). El valor de IAF máximo se alcanzó en floración, para todos los tratamientos. La reducción del IAF en floración fue del orden de 23 y 30 % en el tratamiento T, con respecto a Nop y NC. Las mayores diferencias se midieron a partir de los 1560 °C, señalando diferencias en el momento del inicio de la senescencia entre tratamientos. Los incrementos en el IAF como respuesta a dosis crecientes de N, confirman los resultados de estudios anteriores realizados por Evans (1972) y Duncan (1975).

Novoa y Loomis (1981), Lemcoff y Loomis (1986), Girardin *et al.* (1987), y Cox *et al.* (1993) encuentran que el período más sensible para la expansión foliar, ante una deficiencia de N, se ubica entre V12 – V18, y el IAF no es afectado si se instala un estrés nitrogenado en períodos anteriores. Contrariamente, Uarth y Andrade (1995) observaron diferencias significativas entre tratamientos a partir de V6-V7. Muchow y Sinclair (1995) mostraron que los valores de IAF aumentaron de 2.1 a 3.8, 3.9 y 3.8 a medida que la dosis de N se incrementaba de 0 a 60, 120 y 240 kg N ha⁻¹. Barragán *et al.* (1988) encontraron valores máximos de IAF de 4.3 para tratamientos no fertilizados, y de 4.6 para dosis entre 150 a 450 kg N ha⁻¹. Otros valores de IAF máximo fueron referidos por Piovarcy y Vidobic (1973), de 4.7 a 5; Karlen *et al.* (1988), 4.1; Tollenaar y Bruuselma (1988), 4.8; Coscolluela y Faci (1992), 4.2 a 4.9; y Aguilar (1994), 4.3 a 5.

Al igual que para MST, los valores de IAF mostraron diferencias entre el tratamiento T, y los tratamientos Nop y NC en el segundo año de ensayo.

El IAF máximo se alcanzó para el tratamiento NC (5.61), en el ciclo 1999, a los 1537 °C (93 DDE), mientras que para Nop y T, tuvo valores de 4.96 y 5.09 con una acumulación de 1318 °C (82 DDE) en ambos casos. Durante el ciclo 2000, todos los tratamientos alcanzaron el IAF máximo con una acumulación de 1079 °C (60 DDE), alcanzando valores de 5.15, 5.48 y 3.92 para Nop, Nc, y T, respectivamente. La diferencia en alcanzar el IAF máximo entre los años 1999 y 2000, fue de 458°C. Valores de entre 4.62 y 5.40 de IAF máximos fueron hallados por Aguilar (1994) para el Valle Medio del Guadalquivir, con un rápido establecimiento de la superficie foliar (80-85 días desde la siembra).

Figura 78. Evolución del Índice de Area Foliar (IAF) en función del los grados-días acumulados desde la emergencia (TTDE, °C). (a) 1999, (b) 2000. Los símbolos representan los valores observados, y las líneas las ecuaciones de ajuste.



Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

En la Tabla N° 48 se muestran los modelos no lineales de ajuste (ecuaciones polinómicas de cuarto grado) que expresan para todos los tratamientos nitrogenados, la evolución, a lo largo del ciclo del cultivo, del índice de área foliar (IAF) en función del Tiempo Térmico acumulado desde la emergencia.

Tabla 48. Coeficientes, nivel de significación estadística y coeficiente de determinación (R²) de los modelos matemáticos (polinomios de cuarto grado), que representan la evolución del índice de área foliar (IAF, cm² cm⁻²) durante el ciclo de cultivo del maíz en relación al Tiempo Térmico desde la emergencia (DDE).

Tratamiento	a (x) ⁴	b (x) ³	c (x) ²	d (x)	e	R ²
Ciclo 1999						
Nop	3.63391E-12	2.08831 E-08	0.000037155	-0.02008700	3.46528019	0.99
NC	4.24064 E-12	-2.45272 -E08	0.000044674	-0.02606095	4.99548583	0.97
T	2.43587 E-12	-1.46733E -08	0.000025754	-0.01129014	1.19411344	0.99
Ciclo 2000						
Nop	1.06343E-11	-4.97178-E 08	0.00007630	-0.03991721	7.05416617	0.99
NC	1.46955 E-11	-6.55061 -E08	0.000097201	-0.05051396	8.85931147	0.99
T	7.86014E-12	-2.94300E-08	0.000030827	-0.00389172	-1.5505387	0.99

*: p 0.05, **: p 0.01; a,b,c,d,e = coeficientes de los modelos de ajuste. Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

b) Duración del área foliar (LAD)

El área encerrada por la curva del IAF en función del tiempo es la duración del área foliar (LADt) (Watson, 1956). Otros investigadores ponen, también, de

manifiesto la importancia de otro índice llamado LADf, que es la duración del área foliar fotosintéticamente activa después de la floración (Aguilar, 1994). En el presente trabajo, tanto el LADt como el LADf se vieron reducidos en el ciclo 2000 a causa de la deficiencia nitrogenada.

En 1999, la duración total del área foliar (LADt) fue de 315, 332, y 314 días desde emergencia hasta 20 días posteriores a la floración, para los tratamientos Nop, NC, y T, respectivamente. El LADf fue de 237, 253, y 231 días para Nop, NC, y T, respectivamente. Para el ciclo 2000, también se midieron diferencias en el LADt entre los tratamientos, pero de mayor magnitud. Los valores fueron de 293, 318, y 204 días para los tratamientos Nop, NC, y T, respectivamente; es decir que, la deficiencia nitrogenada produjo una reducción de 89 y 114 días en el tratamiento T, con respecto a Nop y NC. El valor de LADf, hasta el día 102 DDE, mostró una reducción de 84 y 100 días en el tratamiento T, con respecto a Nop y NC, respectivamente. Estos valores multiplicados por la EUR media, y considerando un valor medio de RFA diaria, explican la diferencia en la cantidad de MS producida. Los mayores valores de LADt y LADf en 1999 fueron coincidentes con los mayores rendimientos obtenidos. Estos resultados coinciden con los de Uhart y Andrade (1995), quienes encuentran valores de IAF máximos menores y una aceleración de la senescencia, en presencia de un déficit nitrogenado.

c) Tasa de crecimiento absoluto del cultivo (“Crop Growth Rate”, CGR)

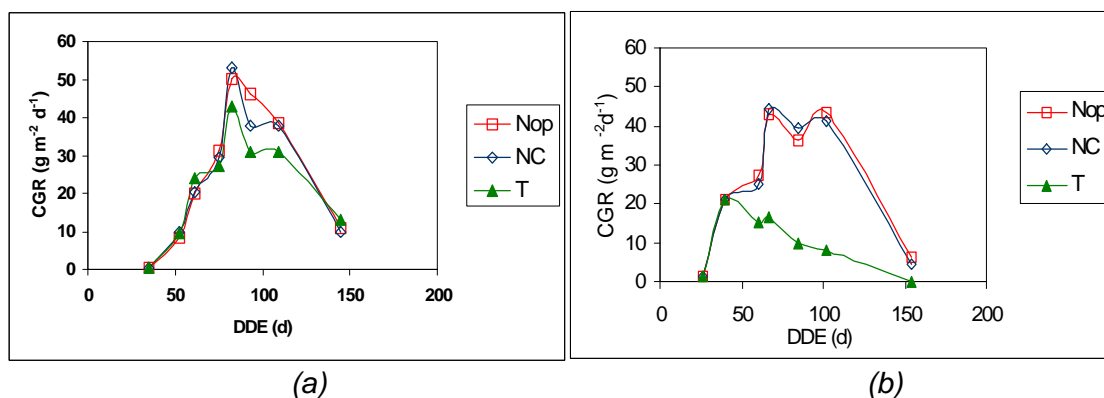
Las diferencias en los valores de CGR se manifestaron a partir de floración en 1999, y de forma más temprana (día 60 DE), en el segundo año de ensayo (Fig. 79a,b). Las diferencias encontradas entre tratamientos en 1999 no fueron estadísticamente significativas (Tuckey $\alpha=0.05$) (Tabla 22, Anejo 2). Los valores de CGR son bajos al comienzo del desarrollo del cultivo, para los dos años de ensayo, alcanzando un máximo alrededor de R1 en 1999, y, posteriormente, una disminución progresiva hasta la madurez fisiológica. Una tendencia similar para la evolución de este índice fue descrita por Karlen *et al.* (1988) y Aguilar (1994), quienes observaron dos máximos en la evolución del CGR: el primero previo y el segundo 20-30 días posteriores a la floración, con un mínimo coincidente con Vt. Esta tendencia se observó en el año 2000, para los tratamientos Nop y NC, pero con diferencias en los momentos de ocurrencia de los máximos: el primer máximo se midió para la etapa comprendida entre los días 60 y 67 DE, y el segundo, entre los días 85 y 102 DE. El segundo máximo fue de mayor magnitud que el primero, con valores de 43.5 y 53.8 g m⁻² d⁻¹. Posteriormente a la etapa de máximo crecimiento del tallo, disminuye el crecimiento de la planta, y la acumulación de MST. El CGR se incrementa nuevamente, a medida que aumenta el peso de los granos durante la etapa de llenado, y es cuando se alcanza el segundo máximo. Finalmente comienza el decrecimiento del CGR con una gran pendiente, alcanzando valores cercanos a cero alrededor de la madurez fisiológica de los granos (R6). El tratamiento T mostró un máximo entre el día 26 y el 40 DE, a partir del cual comienza una disminución del CGR sostenida en el tiempo, hasta R6.

En este año (2000), se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre el tratamiento T, y los otros dos (Nop y NC), mostrando el efecto de la deficiencia nitrogenada en el CGR. Las diferencias entre Nop y NC no fueron estadísticamente significativas. Estas diferencias entre niveles nitrogenados se deben a las diferencias en los valores de IAF entre tratamientos (Hunt, 1982) y, consecuentemente, a la magnitud de la radiación fotosintéticamente activa interceptada, y la materia seca producida (Epígrafe 4.2.1.6). Las plantas estresadas mostraron menor acumulación de MST y mayor removilización desde hojas y tallos. Reducciones similares fueron descritas por Girardin *et al.* (1987) y Uhart y Andrade

(1995), quienes encontraron que una deficiencia nitrogenada disminuye el IAF y el porcentaje de la radiación interceptada. Esta disminución de la fuente productora de fotosintatos tiene como consecuencia una disminución del CGR durante todo el ciclo de crecimiento del cultivo, el número de granos producidos por unidad de superficie, la materia seca de la espiga y la tasa de crecimiento de la misma.

Un alto valor de CGR, como resultado de valores altos de IAF o NAR, o su combinación, tiende a la obtención de altos rendimientos. Un aumento en el CGR es más frecuentemente debido a un incremento en el IAF que a un incremento en NAR (Clawson *et al.*, 1986). En el año 2000, los mayores valores de CGR en los tratamientos fertilizados se deben fundamentalmente a mayores valores de IAF.

Figura 79. Evolución de la tasa de crecimiento absoluta del cultivo (CGR, $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) determinada como diferencia entre dos fechas, en función de los días transcurridos desde la emergencia (DDE, d). (a) 1999, (b) 2000.



Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

d) Velocidad relativa de crecimiento (“Relative Growth Rate”, RGR)

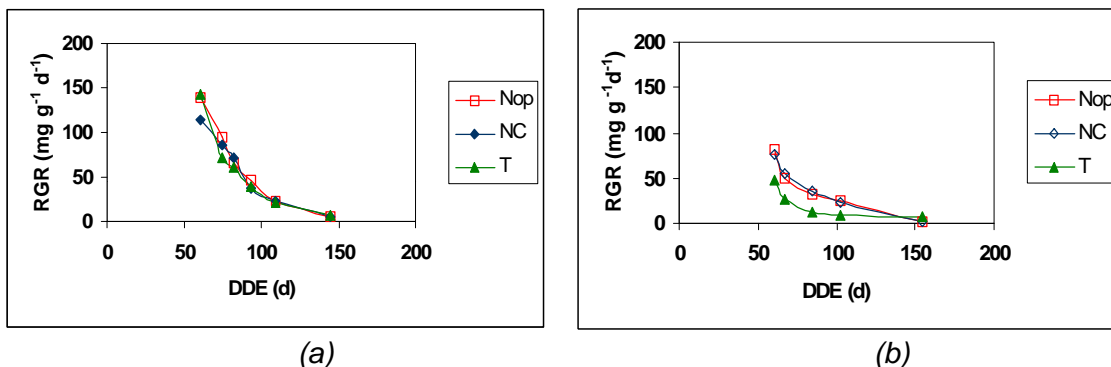
Los valores de RGR, para ambos ciclos agrícolas (Fig. 80a,b), son altos al comienzo de la estación de crecimiento y decrecen a medida que avanza el ciclo del cultivo, conjuntamente con una disminución del índice NAR como del LAR, ambos componentes del RGR. Estos resultados son coincidentes con los hallados por Evans (1972) quien encontró una disminución similar tanto en NAR como en RGR a lo largo del ciclo del cultivo. Este comportamiento en el RGR fue descrito para cultivares de soja (Buttery, 1969; Buttery y Buzzell, 1974), girasol (Evans, 1972; Botella *et al.*, 1997), patata (Harris, 1978), mijo (Coaldrake y Pearson, 1985; Maman, 1999) y pimiento (Srinivas y Hedge, 1984).

Independientemente del nivel de fertilización nitrogenada, tanto en 1999 como en el año 2000, la evolución del RGR fue la misma, encontrándose diferencias entre tratamientos para el segundo año de ensayo, entre T y los tratamientos restantes (Fig. 80b). Para el año 1999 (Fig. 80a), la magnitud de los valores de RGR fue similar para todos los niveles nitrogenados. Para ninguno de los dos ciclos agrícolas se encontraron diferencias estadísticamente significativas (Tabla 23, Anejo 2), entre tratamientos (Tuckey $\alpha= 0.05$).

En el año 2000, la reducción del RGR por causa de la deficiencia nitrogenada fue del orden de 38, 49, 61, y 61 % para los períodos comprendidos entre los días 40-60, 60-67, 67-85, y 85-102 DDE, respectivamente, en el tratamiento T, en promedio, con respecto a los tratamientos fertilizados. Girardin *et al.* (1987)

encuentran reducciones en los valores de RGR del 49, 22, 16, 12, y 16 % en los días 25, 38, 49, 58, y 69 desde la siembra, como consecuencia de una deficiencia nitrogenada, con respecto a un tratamiento sin limitaciones. Las disminuciones en la etapa reproductiva fueron de un orden mayor con respecto a la etapa vegetativa. En el presente ensayo, el efecto de la deficiencia nitrogenada en el crecimiento comienza a manifestarse alrededor de una semana antes de la floración.

Figura 80. Evolución del Índice crecimiento relativo del cultivo (RGR, $\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$) determinado como diferencia entre dos fechas, en función de los días desde la emergencia (DDE, d). (a) 1999, (b) 2000.



Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

e) Velocidad de asimilación neta (“Net Assimilation Rate”, NAR)

La evolución del NAR es decreciente a lo largo del ciclo del cultivo (Scott y Batchelon, 1979; Srinivas y Hedge, 1984; Perumal y Sahota, 1986; Botella *et al.*, 1997; Yusurf *et al.*, 1999). Resultados similares fueron hallados en el presente trabajo. La disminución en el NAR es debida al sombreado que las hojas superiores del canopeo ejercen sobre las inferiores, disminuyendo la eficiencia fotosintética a medida que avanza la ontogenia de la hoja. Un aumento del IAF determina la disminución del NAR, en parte a que la extinción de la luz se va haciendo mas completa a medida que se incrementa el valor del IAF (de Juan *et al.*, 1992).

En el año 1999, aunque existieron diferencias entre tratamientos estas fueron pequeñas (Fig. 81a) y, estadísticamente, no significativas (Tabla 24, Anejo 2), decreciendo el valor de NAR a lo largo del ciclo. Para los tres tratamientos hubo un pico en los valores de NAR el período 75-82 DDE (R3). Este mismo comportamiento se observó en el año 2000, mostrando el tratamiento Nop un incremento final en NAR, que puede ser interpretado como una respuesta del sistema fotosintético a un incremento en la demanda de asimilados para responder al rápido crecimiento de los granos en esta etapa.

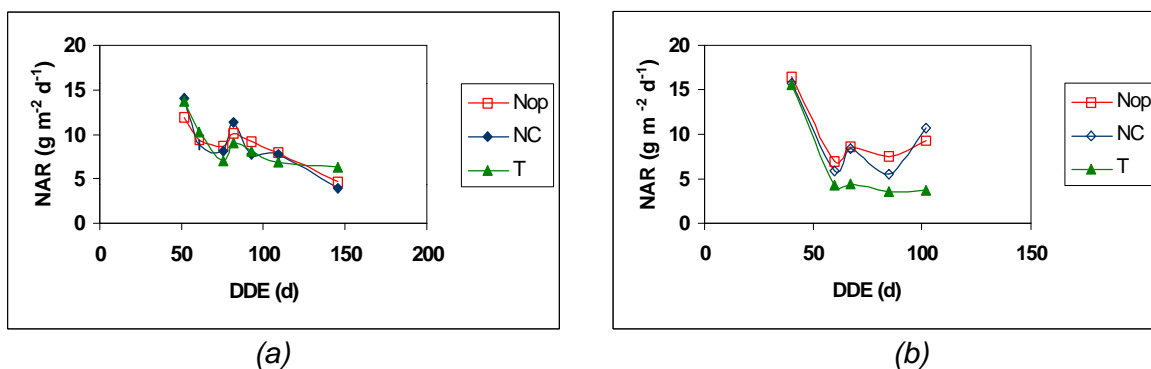
Gregory (1926) encuentra los valores de NAR independientes de la nutrición nitrogenada. Watson (1963) sugiere que NAR se incrementa con bajas tasas de nutrición nitrogenada, lo que indica comportamientos inconsistentes de NAR. En el presente trabajo, y para el año 2000, se observaron diferencias entre el tratamiento T y los tratamientos Nop y NC, aunque no entre estos últimos (Fig. 81b). Estas diferencias se hacen visibles a partir del período 40-60 DDE, variando su magnitud hasta R6.

Para ninguno de los años de experimentación, se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (Tabla 24, Anejo 2), aunque las

diferencias fueron mas marcadas para el año 2000 (Fig. 81b). Para este año, la magnitud de la diferencia en el NAR entre T y el tratamiento Nop se fue incrementando a medida que se desarrolló el ciclo del cultivo, siendo un 38 % menor para T, en el período 40-60 DDE, y un 59 % menor en el período 85-102 DDE. Los valores de NAR para NC fueron menores con respecto a Nop, debido a que el tratamiento NC tuvo los mayores valores de IAF, superando el valor del IAF crítico para este ambiente, 7 días previos a la floración.

En este ambiente (Albacete, España), se obtuvieron valores de NAR superiores a los del ambiente I (Pergamino, Argentina), ya que las altas temperaturas diurnas, y las bajas temperaturas nocturnas de este ambiente provocan mayores velocidades de asimilación neta. La amplitud térmica en el ambiente I, alrededor de la floración, fue, comparando con el promedio de la amplitud térmica para los dos años de ensayo en el ambiente II, 2.3 °C menor. Existen trabajos que ponen de manifiesto como la variación de la temperatura nocturna puede afectar la duración de una etapa fenológica, a través de la tasa de desarrollo del cultivo, el desarrollo del canopeo y la persistencia foliar, y la eficiencia en el uso de la radiación, lo que será una consecuencia de la modificación de las tasas de asimilación del cultivo (Cantarero *et al.*, 1999). En el presente trabajo la diferencia entra ambientes en los valores de NAR fue fundamentalmente debida a la diferencia en la amplitud térmica, pero no a los valores absolutos en la temperatura nocturna, que no mostró diferencias entre ambientes, sobre todo durante el período crítico del cultivo (200 °C y 100 °C, previos y posteriores a la floración (Otegui *et al.*, 1997).

Figura 81. Velocidad de asimilación neta (NAR, $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) determinados como diferencia entre dos fechas, en función de los días desde la emergencia (DDE, d). (a) 1999, y (b) 2000.



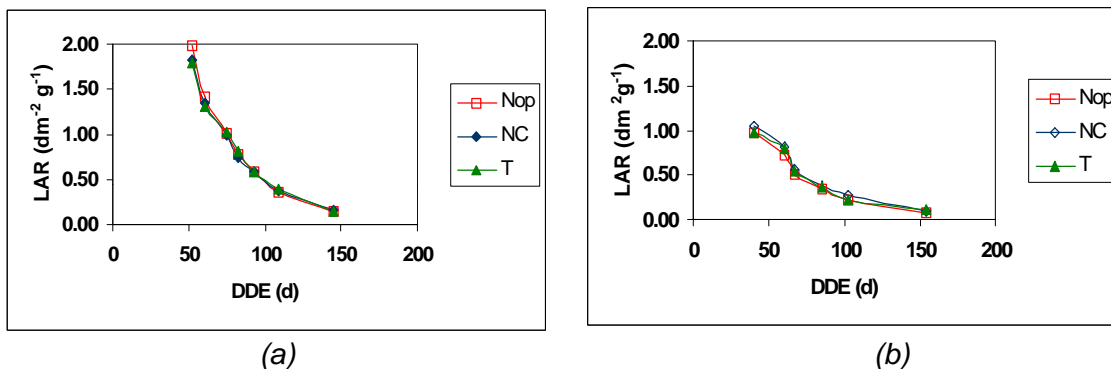
Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

f) Relación de área foliar (“Leaf Area Ratio”, LAR)

La evolución del LAR en el ciclo 1999 (Fig. 82a) no presentó diferencias entre tratamientos, como tampoco lo hizo en el año 2000 (Fig. 82b). Para ambos años, la tendencia fue mostrar un decrecimiento a lo largo del ciclo del cultivo, indicando que cantidades menores de asimilados son destinados a la producción de área foliar a medida que avanza el ciclo del cultivo.

Los mayores valores de LAR para el año 1999 son debidos a una rápida translocación de asimilados a hojas jóvenes, y una rápida conversión de éstos en área foliar, y al mayor período de tiempo durante el cual los asimilados fueron destinados a la producción de área foliar. El índice LAR no es influenciado de manera importante por la aplicación diferencial de N (de Juan *et al.*, 1992).

Figura 82. Evolución de la relación de área foliar (LAR, $\text{dm}^{-2} \text{g}^{-1}$) determinados como diferencia entre dos fechas, en función de los días desde la emergencia (DDE, d). (a) 1999, y (b) 2000.



Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

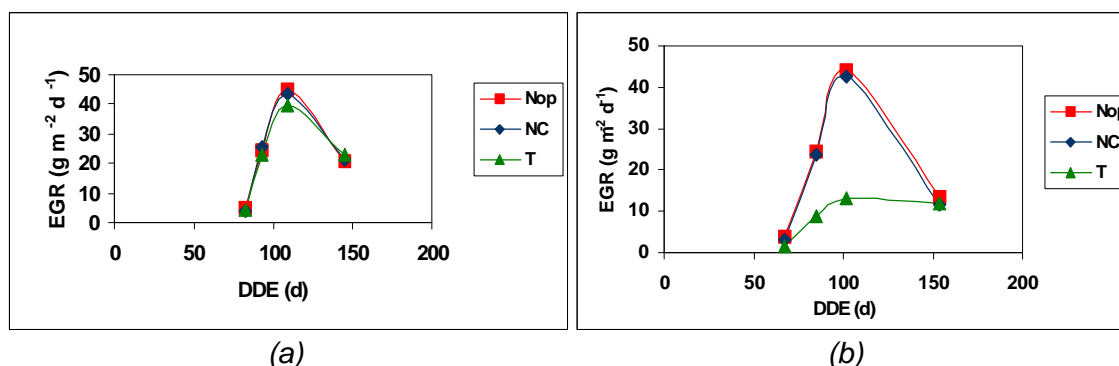
g) Índice de crecimiento de la espiga (EGR)

Existe una relación significativa entre la tasa de crecimiento de la espiga y la MST acumulada en floración, con respecto al rendimiento en grano (Fisher y Palmer, 1984). También, existe una fuerte relación entre la tasa de crecimiento de la espiga en la floración y el número final de granos, que es el principal componente del rendimiento (Uhart *et al.*, 1995).

El índice de crecimiento absoluto de la espiga, determinado como diferencia entre dos fechas de muestreo, siguió la misma evolución entre tratamientos, sin presentar diferencias en valores absolutos, en el año 1999 (Fig. 83a), aunque el tratamiento T presentó un valor ligeramente menor en R4. Esta diferencia no fue estadísticamente significativa (Tuckey, $\alpha= 0.05$) (Tabla 25, Anejo 2).

En el año 2000 (Fig. 83b), las diferencias son claras a partir de R3, siendo para este estadio, el valor para T $15 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ menor, con respecto a Nop y NC. En R4, el valor del EGR fue $30 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ menor para T con respecto a Nop y NC. Estas diferencias fueron estadísticamente significativas (Tuckey, $\alpha= 0.05$). Estos resultados indican que la deficiencia de N en este año afectó la tasa de crecimiento de la espiga y, consecuentemente, su peso final y el rendimiento.

Figura 83. Evolución del índice de crecimiento absoluto de la espiga (EGR, $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), determinados como diferencia entre dos fechas, en función de los días desde la emergencia (DDE, d). (a) 1999, (b) 2000.



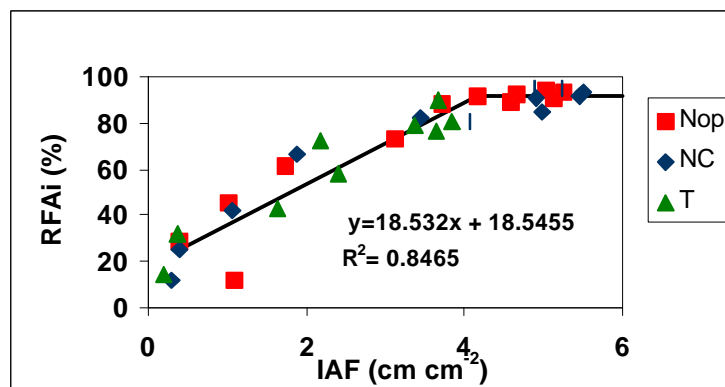
Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

4.2.1.6 Radiación fotosintéticamente activa interceptada por la cubierta vegetal (RFAi)

En el año 1999, debido a que las mediciones de RFA se iniciaron a partir de la floración no se cuenta con la evolución de el % de RFA interceptada a lo largo del ciclo para poder determinar el valor del IAF crítica, es decir, aquella que posibilita la máxima tasa de crecimiento.

Se considera que, con valores de IAF que posibilitan interceptar el 95 % de la RFA, se logra la máxima tasa de crecimiento (Arguissain, 1990). En el presente trabajo, se logró ese % de intercepción con valores de IAF de 4.16 (Fig. 84). Este valor de IAF se alcanza para los tratamientos Nop y NC, pero no para T. Para ambos tratamientos, este valor se logra alrededor del día 59 DE, es decir, 5 días previos a Vt, que corresponden a una sumatoria térmica, en base 6 °C, de 100°C. Este hecho pone de manifiesto que se logra la máxima intercepción de la RFA dentro del período crítico. Este valor es también altamente dependiente del híbrido utilizado. Otros autores encuentran valores de IAF crítico entre 4 y 5 (Andrade *et al.*, 1996). Una vez alcanzado el IAF crítico, se mantuvo aproximadamente, 60 días, en los tratamientos Nop y NC.

Figura 84. Evolución del porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi, %) en función del índice de área foliar (IAF, cm cm^{-2}) en el año 2000.



Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

4.2.1.7 Absorción de radiación solar y conversión en materia seca

En la Fig. n° 85a,b; se presenta la evolución de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAa) para los ciclos 1999 y 2000. Para el primer ciclo agrícola, la eficiencia en el uso de la radiación (EUR, g MJ^{-1}) se calculó para todos los tratamientos en conjunto, ya que no presentaron diferencias estadísticamente significativas (Tuckey, $\alpha=0.05$), ni para la producción de materia seca ni para la radiación fotosintéticamente activa absorbida. Los valores de EUR presentados han sido calculados si considerar la MS radicular. En este año, las mediciones se realizaron a partir del día 75 DE (Vt), debido a no poder haber utilizado el instrumental para la medición. Los ajustes de las relaciones entre la materia seca acumulada en función de las RFAa (modelos lineales) resultaron ser altamente significativos, dando valores de EUR de 3.11, g MJ^{-1} en 1999. Este valor resulta ser superior a algunos valores hallados en la bibliografía, pero que han sido calculados a partir de la RFAi (2.27 g MJ^{-1} ; Andrade *et al.*, 1996); e inferior a otros

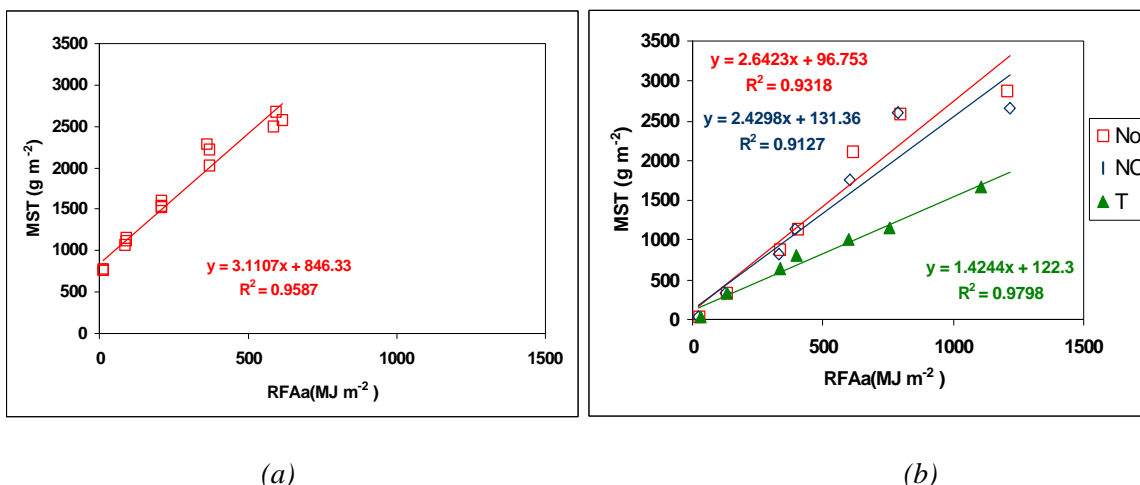
(4.40 g MJ⁻¹; Plénet, 1995). Es también superior a los hallados en el año 2000, debido a que la EUR es muy fluctuante a través del tiempo, incluso entre dos medidas sucesivas. Una parte de esta fluctuación se debe a errores de medición. Varlet-Grancher (1982) estima que la precisión en la EUR varía entre 30-50 %. Gallo *et al.* (1993) encontraron variaciones importantes en la EUR variando únicamente la forma de medición de PARa. Plénet (1995) presenta valores de EUR absorbida durante todo el ciclo, en una síntesis bibliográfica, que oscilan entre 3.22 (Gallo *et al.*, 1993) y 4.26 g MJ⁻¹ (Daughtry *et al.*, 1992). En los valores de EUR, presentados en esta recopilación, existen grandes variaciones dependiendo del ambiente, si se ha utilizado la RFA absorbida o interceptada en el cálculo de EUR, del período considerado para el cálculo, y de si es una estimación o una medición.

En el segundo año de ensayo, las mediciones se realizaron a partir del día 26 DE (V6). En este año, sí existieron diferencias entre el tratamiento T y los tratamientos Nop y NC. La instalación de la deficiencia nitrogenada en este ciclo produjo una disminución en el IAF, y consecuentemente, en la RFAa, en las tasas de crecimiento, tanto del cultivo como de la espiga, en la producción de MST, y finalmente, en el rendimiento. La EUR disminuye cuando las plantas están expuestas a condiciones inferiores a las óptimas (Tollenaar *et al.*, 1992). La deficiencia nitrogenada redujo tanto el porcentaje de radiación interceptada como la EUR en el tratamiento T.

Para el ciclo 2000, los valores de EUR fueron de 2.64, 2.43 y 1.42 g MJ, para Nop, NC, y T, respectivamente. Los valores hallados en los dos ciclos agrícolas fueron menores para este ambiente (Albacete) que para el ambiente I (Pergamino).

Las variaciones entre los valores de EUR entre ambientes, y a través del ciclo del cultivo, pueden ser explicados por un efecto del aumento de la temperatura media, que permite aumentar la eficiencia en el uso de la radiación, o la eficiencia de conversión (Ec). Autores como Andrade *et al.* (1993a) y Kiniry *et al.* (1989) encuentran aumentos lineales de EUR con incrementos en la temperatura media. Sin embargo, Ruget *et al.* (1990) muestran que la temperatura, como única causa, no permite explicar completamente los desvíos observados entre sitios diferentes.

Figura 85. Relación entre la materia seca acumulada y la radiación fotosintéticamente activa absorbida. (a) Ciclo 1999 (b) Ciclo 2000.



MST= materia seca total (g m⁻²); RFAa=radiación fotosintéticamente activa absorbida(MJm⁻²).
Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

Las mayores EUR para el ambiente I (Pergamino, Argentina), se deben a las menores proporciones de RFAa con respecto al ambiente II (un 60 % menor), comparando el segundo año de medición, y el menor incremento proporcional en la producción de MS para el ambiente II con respecto al I (23% mayor, en condiciones no limitantes hídricas ni nutricionales).

Una segunda causa que puede explicar estas diferencias, la constituye el patrón de distribución de la materia seca entre los órganos aéreos y la raíz. La partición de MS a raíz en la etapa siembra-V15 representa el 50 % de la materia seca producida por unidad energética, mientras que durante el período V15-floración, este porcentaje representa un 16 % (Plenét, 1995). Después de la floración este porcentaje es despreciable; entonces la EUR para la producción de MS aérea, aumenta un 120 % del período siembra-V15 a V15-floración, mientras que la EUR para la producción de MST tanto aérea como radical aumenta sólo un 32 %.

A medida que avanza el ciclo del cultivo, aumenta la proporción de hojas senescentes y, consecuentemente, disminuye la eficiencia fotosintética (Tollenaar y Migus, 1984; Dywer *et al.*, 1989). Este hecho, sumado al aumento de la respiración de mantenimiento y de la biomasa, explica el menor valor del coeficiente de conversión, o EUR, para el período postfloración (Ruget *et al.*, 1990).

Sin embargo, para el ambiente I (Pergamino, Argentina), tanto las relaciones raíz/parte aérea, como el índice de partición a raíz, son mayores que en el ambiente II (Albacete, España) (Epígrafe 4.1.2.2), en la floración. Entonces, los mayores valores de la EUR pueden ser explicados por la menor RFAa y una disminución proporcionalmente menor en la producción de MST que la medida en la RFAa. Contrariamente a los resultados hallados en el presente trabajo, Wiegand *et al.* (1991) encuentran que la EUR es conservativa dentro de un ambiente, e invariable ante diferentes tratamientos agronómicos, ya que, los condicionantes de la reducción de la RFAa son los mismos que reducen la fotosíntesis y, consecuentemente, el crecimiento. Sin embargo, para los dos ambientes estudiados, existieron diferencias en la EUR, tanto por deficiencias hídricas como nitrogenadas.

Las diferencias encontradas entre ambientes muestran el carácter específico para cada sitio de las relaciones encontradas, la imposibilidad de extrapolar las mismas a diferentes ambientes, y la necesidad de validación y calibración al utilizar modelos desarrollados en ambientes diferentes. Es importante conocer, en el ambiente en estudio, cuáles son los factores más relevantes en la producción para elegir el modelo que tenga mayor precisión en esos aspectos. Cómo puntualizan Sinclair y Seligman (1996), no existen modelos universales.

4.2.1.8 Acumulación y partición de fotoasimilados

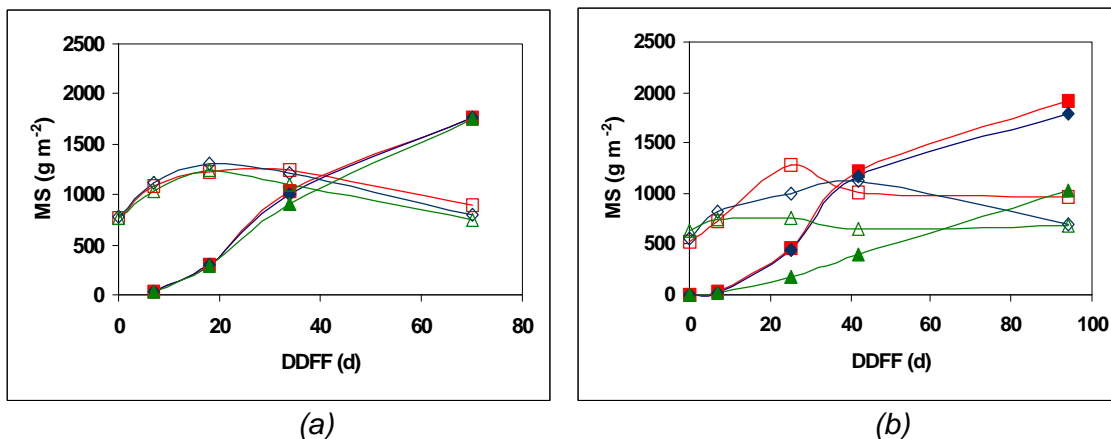
La base de la fotosíntesis para incrementar el rendimiento en grano involucra la cantidad de luz interceptada por el canopeo, la eficiencia de conversión de la radiación interceptada en fotoasimilados y la partición de estos asimilados a órganos que representen destinos económicos, como es el grano en el cultivo de maíz (Gifforf *et al.*, 1984). En el presente trabajo, se obtuvieron en los tratamientos fertilizados los porcentajes de intercepción de la radiación que permiten alcanzar los máximos índices de crecimiento, con valores de EUR que permitieron lograr altos valores de MST.

En la Figura n° 86, se presenta la acumulación de MS en la espiga (MSe) y la acumulación y removilización en las partes no espiga (MSne), en relación con los días transcurridos desde la floración femenina (DDFF).

Para el ciclo 1999 (Fig. 86a), se puede observar que existe una acumulación de MSne hasta el día 18 DFF, para todos los tratamientos. A partir de este momento comienza la removilización. No se encontraron diferencias ni en los valores de acumulación ni en la removilización de la MS. Los valores de removilización, obtenidos por ajuste lineal, fueron de 7, 10 y 10 g m⁻² d⁻¹, para Nop, NC, y T, respectivamente. Esto representa en R6, un 24, 34 y 34 % de la MSe. Estos porcentajes fueron calculados sin tener en cuenta las pérdidas por respiración, tal como se explicó para el ambiente I (Epígrafe 4.1.1.8). Para este ambiente, y en este año, los valores de removilización son más homogéneos entre tratamientos, ya que no se manifiesta aún la deficiencia nitrogenada y la relación fuente-destino fue similar entre tratamientos. El valor de acumulación de MSe fue de 28 g m⁻² d⁻¹ para todos los tratamientos.

En el año 2000 (Fig. 86b), se observan diferencias para este parámetro entre tratamientos. Para los tratamientos Nop y T, la acumulación se da hasta el día 18 DFF, y para NC, hasta el 35 DFF. A partir de esos momentos, comienza la removilización. Los valores de removilización en este año fueron de 4, 8 y 1 g m⁻² d⁻¹ para Nop, NC, y T respectivamente, lo que representó un 14, 23, y 7 % del peso final de la espiga para Nop, NC, y T, respectivamente. En valor absoluto, la variación de la removilización fue de 69 y 419 g m⁻², lo que evidencia una variación en la relación fuente/destino entre los distintos tratamientos. La acumulación de MSe fue de 22, 20, y 12 g m⁻² d⁻¹ para Nop, NC, y T, respectivamente. Una deficiencia nitrogenada justo antes, o posteriormente, a R1 no afecta el rendimiento en grano, debido al efecto “buffer” del tallo y las hojas, capaces de translocar asimilados durante la etapa de llenado de granos (Girardin *et al.*, 1987). En el presente año, se puede inferir que, debido a las diferencias en los valores de removilización entre el tratamiento T y los fertilizados, la deficiencia nitrogenada se instaló en forma previa a la floración. La capacidad de síntesis de sacarosa foliar, medida por la actividad de la enzima sacarosa-P sintetasa, se ajusta a la variación de la demanda proveniente de la espiga, tanto en condiciones normales de llenado de grano como en condiciones restrictivas. La actividad de dicha enzima es un excelente indicador de la capacidad exportadora de las hojas (fuente) hacia los granos (Prioul *et al.*, 1990). En el presente trabajo, la duración de acumulación de MSne postfloración en el tratamiento NC, está indicando que la acumulación de fotosintatos excedió la demanda de los destinos reproductivos, hasta el momento en que comenzó la removilización. El mantenimiento del área foliar hasta etapas avanzadas de la etapa de llenado de grano sugiere que hubo una acumulación de fotoasimilados como reserva, ya que el agua no fue tampoco limitante. Estos datos son coincidentes con los hallados por otros autores (Christensen *et al.*, 1981; Westgate y Boyer, 1985).

Figura 86. Evolución de la acumulación de materia seca de la espiga (MS_{esp}) y evolución de la acumulación de materia seca en el resto (MS_{ne}) para los diferentes niveles hídricos dentro de cada nivel nitrogenado: (a) 1999 y (b) 2000. Nop MS_{ne}, NC MS_{ne}, Sec MS_{ne}; Nop MS_e, NC MS_e, Sec MS_e.



MS= materia seca; DDFF= días desde la floración femenina

El rendimiento en grano es más afectado por una alteración en la provisión de asimilados durante la etapa de llenado de grano que durante la floración, y la principal limitante del rendimiento, considerando la relación fuente/destino, es la capacidad de la fuente (Tollenaar y Daynard, 1978). Otros autores (Early *et al.*, 1966, 1967) encuentran que el rendimiento en grano del cultivo de maíz fue más deprimido por una reducción de luz en la floración que durante el período de llenado de grano, concluyendo que el rendimiento está limitado por la capacidad de los destinos reproductivos.

4.2.1.9 Análisis de crecimiento del grano

a) Tasa de llenado del grano

En el cultivo de maíz, la tasa y la duración del período de llenado determina, junto a otros factores, el rendimiento del mismo (Tollenaar, 1991). La acumulación de MS en el grano tiene un período de latencia de 10-20 días (etapa "lag"), seguida por la etapa de acumulación lineal de 20 a 50 días, hasta alcanzar una meseta alrededor de los 70 días (Prioul *et al.*, 1990). El porcentaje de MS del grano crece en forma exponencial después de la etapa "lag". El tiempo requerido para alcanzar la máxima acumulación de MS en grano depende del híbrido utilizado. La relación entre la MS y el C es pequeña al comienzo del período de llenado de grano, crece progresivamente durante la etapa de llenado de grano, y se mantiene constante próxima a R6. Esto concuerda con el concepto de que, en etapas tempranas, los granos contienen altas proporciones de N (proteínas, enzimas, etc.), para satisfacer la demanda de la división y el alargamiento celular. La acumulación de N en grano ocurre en etapas más tempranas que la acumulación de C (Ma *et al.*, 2001). En condiciones de estrés, el grano de maíz madura con niveles más altos de proteína cruda (N) (Jurgens *et al.*, 1978), lo que puede ser asociado con una acumulación de MS restrictiva en el grano.

En la Tabla n° 49, se presentan las tasas de acumulación de MS en grano durante el período efectivo de llenado de granos (etapa lineal de acumulación de peso del grano) para los tratamientos y la duración del mismo.

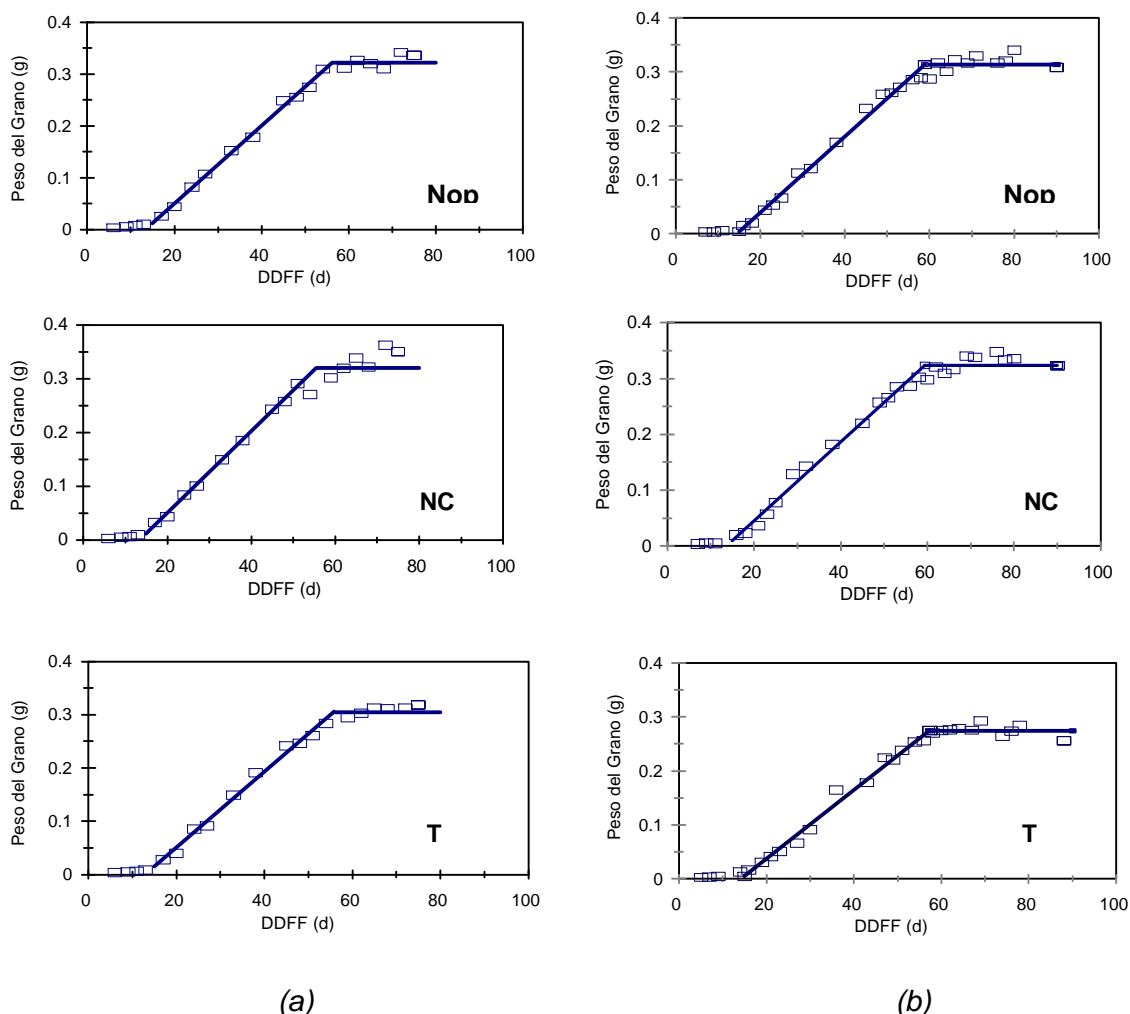
Tabla 49. Valores de la tasa de llenado de grano (mg d^{-1}) durante la etapa de llenado efectivo y duración de la misma.

Tratamiento	Tasa de llenado (mg d^{-1})	Duración del período efectivo de llenado de granos (d)
Ciclo 1999		
Nop	7.5	56
NC	7.6	56
T	7.1	56
Ciclo 2000		
Nop	7.0	59
NC	7.1	59
T	6.3	61

Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

En la Figura n° 87, se muestra la evolución del peso de grano, para estos tratamientos en función de los días desde la floración femenina. Para el año 1999, no hubo diferencias en la duración de la etapa “lag” entre tratamientos, siendo, para los tres niveles nitrogenados, de 17 días. En el año 2000, tampoco se midieron diferencias en la duración de este período, siendo de 16 días para todos los tratamientos.

Figura 87. Evolución del peso de grano (g) en función de los días transcurridos desde la floración femenina (DDFF, d) para todos los tratamientos. (a) 1999, y (b) 2000.



DDFF= días desde la floración femenina. Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

No existieron diferencias significativas entre tratamientos en los valores de la tasa de llenado en el año 1999 (Tuckey $\alpha= 0.05$) (Tabla 26, Anejo 2), las que sí se manifestaron en el 2000. La deficiencia nitrogenada, en este año 2000, afectó la tasa de llenado de grano, pero no la duración de esta etapa, la que está fuertemente regulada por la temperatura; existió una diferencia de acumulación de Tiempo Térmico de 21 °C, entre T y los tratamientos restantes. La duración de la etapa fue mayor en el ciclo 2000 con respecto a 1999. Existen estudios que encuentran que la temperatura no tiene ningún efecto sobre la tasa de llenado de granos durante esta etapa, si la acumulación de MS se da en un rango de amplitudes térmicas día/noche de 25/15 a 35/25 °C, en ambientes controlados (Badu-Apraku, 1983). Cirilo *et al.* (1996) en ensayos de campo encuentran una gran influencia de la temperatura en esta etapa. Jones *et al.* (1986) encuentran valores en la tasa de llenado, de entre 6 y 11 mg d⁻¹, para una amplia gama de híbridos, cultivados en diferentes latitudes.

Daynard y Kannenberg (1976) encuentran una asociación entre rendimientos elevados y la mayor duración del período de llenado de grano. Sin embargo, para el año 2000, las diferencias en rendimiento se debieron a las tasas más altas de llenado, cuando el N no fue limitante. Para este ambiente, las temperaturas medias del aire tampoco, fueron limitantes durante la etapa “lag” (24.2 y 24.7 °C para los años 1999 y 2000, respectivamente), ni para el período de llenado efectivo de grano (23.2 y 21.26 °C, para los años 1999 y 2000, respectivamente). Las temperaturas medias, en el año 1999, para estas etapas, fueron muy similares a las temperaturas medias en el ambiente I (Pergamino, Argentina), para los mismos períodos del ciclo.

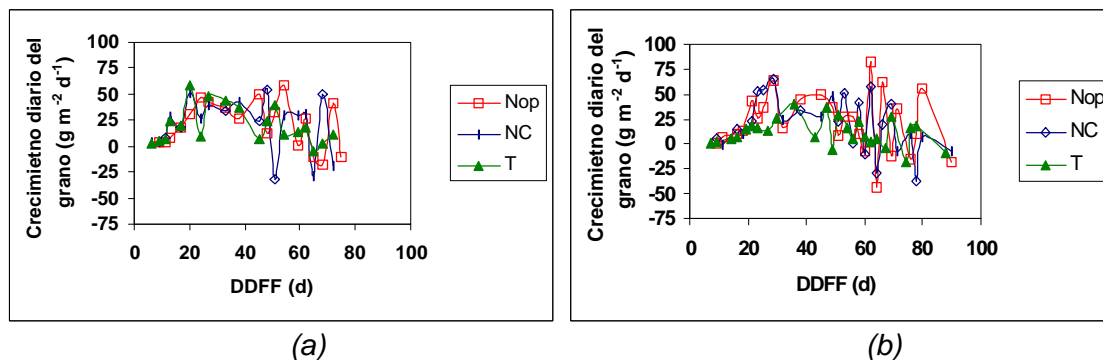
Las mayores tasas de llenado y la mayor duración del período de llenado para este ambiente (Albacete, España) constituyen una causa importante que determina los mayores rendimientos logrados, con respecto al ambiente I. Major *et al.* (1985) encuentran diferencias en las tasas de llenado de diferentes genotipos de maíz, en un estudio para explicar los mayores rendimientos de los maíces “flint”, con respecto a los dentados. El peso medio de los granos resulta del efecto combinado que ejercen dos factores concurrentes: la duración del período efectivo de llenado y la tasa de llenado. Maddoni *et al.* (1998) encuentran, para híbridos de mayor tamaño y mayor número de grano, como es el utilizado en este ambiente con respecto al Dekalb 752 (DK), utilizado en el ambiente I, mayores tasas de crecimiento de grano y mayores duración en el período lag. El híbrido Pregia, utilizado en este ambiente, presenta mayores tasas de llenado de grano, con respecto al DK 752, y mayores duraciones en la etapa “lag”, considerándola en función del Tiempo Térmico acumulado (296 y 297 °C para el ciclo 1999 y 2000, respectivamente, en el ambiente II, y 243 °C en al ambiente I).

b) Tasa de crecimiento del grano

En la Figura n° 88 se presenta la evolución de la tasa de crecimiento del grano en función de los días desde la floración femenina.

La tasa de crecimiento del grano, alcanzó los mayores valores para los tratamientos con las mayores dosis de nitrógeno (Fig. 88). Esta tasa fue calculada como diferencia entre dos fechas. Sin embargo, la tendencia es la misma para todos los tratamientos, y las diferencias son puntuales para la diferencia entre dos fechas de muestreo consideradas. Al igual que como se aclaró para el ambiente I, las tasas de crecimiento del grano están relacionada con la duración del período “lag” (Maddoni *et al.*, 1998). Como para este ambiente no se midieron diferencias en la duración de la etapa “lag” entre tratamientos, tampoco se encontraron diferencias marcadas en la tasa de crecimiento del grano.

Figura 88. Evolución de la tasa de crecimiento del grano ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) en función de los días desde la floración femenina (DDFF, d). (a)1999, y (b) 2000.

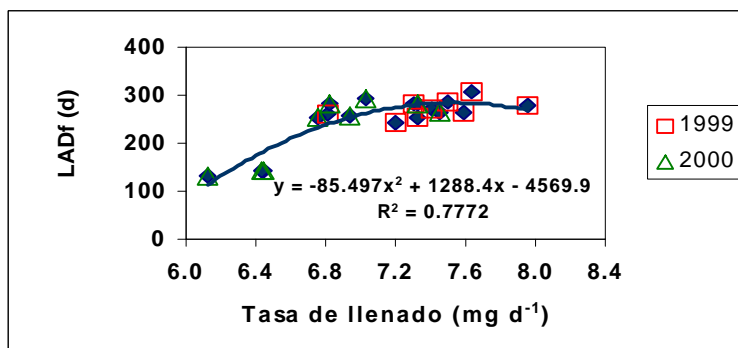


Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

4.2.1.10 Relación entre la tasa de llenado de grano y la duración del área foliar

En la Figura n° 89, se puede observar que para este ambiente, a partir de valores superiores a una tasa media de llenado de 7.3 mg d^{-1} , el valor de LADf mantiene en un valor medio de, aproximadamente, 230 días. Los valores más bajos de llenado de grano están relacionados con menores duraciones del área foliar fotosintéticamente activa postfloración. Para el ambiente I y el híbrido estudiado, las tasas de llenado son menores para todos los tratamientos y, también, lo son los valores de LAD posteriores a la floración. La relación entre LADf y la tasa de llenado del grano en el ambiente I, no alcanza techo, siendo el mayor valor medido de 6 mg d^{-1} para una LADf de 170 días. En el presente trabajo, la varianza de la tasa de llenado del grano explica significativamente un 78 % de la varianza de la duración del área foliar por medio del modelo polinómico, de segundo grado (Fig. 89).

Figura 89. Modelo polinómico de segundo grado, que relaciona, para todos los tratamientos nitrogenados, y los dos años experimentales, la duración del área foliar tras la floración (LADf, d) con la tasa de llenado del grano (mg d^{-1}).



Nota: el ajuste fue realizado para los dos ciclos agrícolas en conjunto (·)

Existen trabajos en el cultivo de soja que plantean la hipótesis que evidencia la influencia del número de granos por planta sobre la senescencia foliar, el peso seco de las semillas, y el N contenido en éstas, que indica que no es preponderante la función del N en la senescencia, sino que, conjuntamente, existiría una señal hormonal desde las semillas que regula este proceso. El concepto es que la demanda de N por parte de los granos regula la senescencia y que ésta depende de la tasa de asimilación de carbohidratos en grano (Crafts-Brandner y Egli, 1987).

4.2.1.11 Rendimiento y sus componentes

El resultado del análisis estadístico para el rendimiento y sus componentes, se presenta en la Tabla n° 27, Anejo 2, y en la Tabla n° 50, se presentan los resultados de rendimiento y sus componentes principales, para los dos ciclos agrícolas. Para el año 1999, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para los componentes del rendimiento: peso unitario de grano (PUG, g), número de granos por metro cuadrado (NG m⁻²), ni para el rendimiento.

Tabla 50. Rendimiento, y sus componentes, para los dos ciclos agrícolas experimentales.

Año 1999			
Tratamiento	NG m ⁻²	PUG (mg)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)
Nop	5036	310	15568
NC	4955	320	15872
T	5113	310	15851
Año 2000			
Nop	5560	300	16550
NC	5175	320	17061
T	3228	250	8082

NG m⁻²: número de granos por metro cuadrado; PUG: peso unitario de grano, g. Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

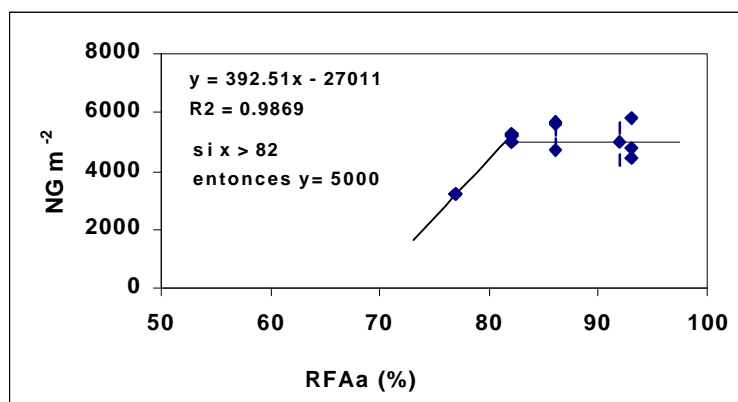
Para el ciclo 2000, cuando la deficiencia nitrogenada se manifiesta, las diferencias fueron altamente significativas para los componentes de rendimiento, encontrándose diferencias entre los tres tratamientos, y, para rendimiento, la diferencia fue significativa entre los tratamientos fertilizados y el testigo. Existió una compensación en NG m⁻² y PUG para los tratamientos Nop y NC, ya que el primero presentó mayor valor en el NG m⁻² y menor en el PUG, que el NC, no existiendo diferencias estadísticamente significativas, para el rendimiento, entre ellos. La disminución del NG m⁻² en el tratamiento testigo, evidencia que existió una limitación en los destinos reproductivos como consecuencia del efecto de la deficiencia nitrogenada en prefloración. El menor rendimiento en este tratamiento se debió a un/a: a) menor valor de IAF, b) menor % RFAi, c) menor EUR, d) menor acumulación de MST, y e) menor duración del área foliar.

Los altos rendimientos hallados tanto en el año 1999 como en el 2000 pueden ser comparados a los máximos hallados en la literatura (Tollenaar, 1986; Overman *et al.*, 1994; Flannery, 1996). En España, Murillo *et al.* (1992) no encuentran diferencias en los rendimientos del cultivo de maíz entre aplicaciones de fertilizante nitrogenado de alrededor de 400 kg N ha⁻¹ y 1/3 de la dosis anterior, obteniendo valores de rendimiento de 15600 y 16100 kg ha⁻¹, para cada tratamiento, respectivamente. El contenido de N-NO₃⁻ edáfico en la cosecha fue también 1/3 menor en el tratamiento que menor dosis recibió. Sin embargo en su trabajo, Murillo *et al.* (1992) puntualizan el hecho de que, la menor dosis de N aplicada, puede llegar a ser limitante si no se planifica una rotación de cultivos.

4.2.1.12 Número de granos producidos por unidad de superficie y radiación fotosintéticamente activa interceptada y absorbida

El NG m^{-2} está estrechamente relacionado con la RFAi. En la Figura n° 90, se presenta la relación entre el NG m^{-2} y la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAa) en la floración, para todos los tratamientos y ciclos agrícolas. Como ya se expresara para el ambiente I, en ausencia de limitaciones nutricionales, térmicas o hídricas, la radiación solar es la principal limitante del crecimiento del cultivo (Kiniry *et al.*, 1995).

Figura 90. Modelo lineal + meseta, que relaciona el número de granos por unidad de superficie (NG m^{-2}) y la radiación fotosintéticamente activa absorbida (RFAa) en floración, para todos los tratamientos nitrogenados y ambos ciclos agrícolas.



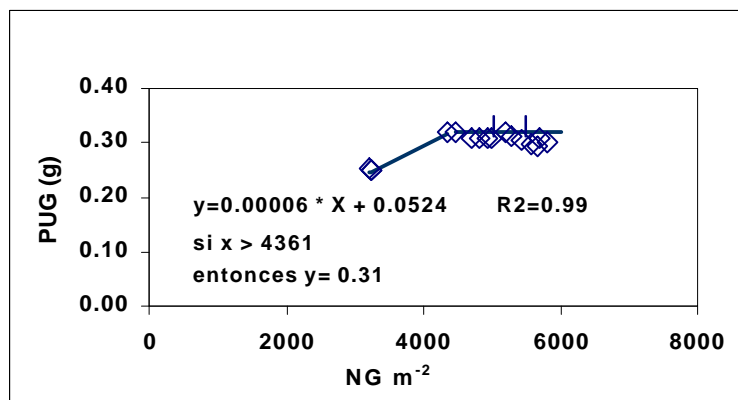
Un incremento de la RFAa en la floración por encima del 82 %, no incrementa el NG m^{-2} , por lo que, para este ambiente, el manejo de la fertilización nitrogenada deberá tener como objetivo la instalación de un sistema fotosintético que, en el estado fenológico de floración (Vt), sea capaz de absorber alrededor del 82 % de la RFA. En el estudio llevado a cabo, este valor se logra a partir del nivel de fertilización nitrogenada aportado en el tratamiento Nop, es decir, con dosis de 150 kg N ha^{-1} . En el ambiente I, la relación encontrada para las diferentes dosis de N entre el NG m^{-2} y la RFAa fue, para todos los niveles, lineal. Esta diferencia se puede explicar mediante los valores de RFAa entre ambientes; en el I, fue alrededor de los $500 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, mientras que, en Albacete, este valor ascendió a los $1200 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, posiblemente debido a las diferencias en la arquitectura de planta entre los híbridos utilizados, y por la menor ocurrencia de días nublados, en el ambiente II.

Girardin *et al.* (1987) encontraron que, sólo la ocurrencia de un estrés nitrogenado en etapas tempranas de desarrollo del cultivo, reduce el número de granos por metro cuadrado. La instalación en etapas tempranas de un estrés nitrogenado, puede afectar el número potencial de óvulos, o la tasa de crecimiento de la espiga en la floración (Uarth *et al.*, 1995). Reddy *et al.* (1991) encuentran que una deficiencia nitrogenada postfloración disminuye el rendimiento, y que, el contenido de proteína en el grano depende de la relación $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ disponible en este momento.

4.2.1.13 Relación entre los componentes de rendimiento

En condiciones de riego y fertilización nitrogenada, para este híbrido, se muestra la plasticidad de incremento en el número de granos (tamaño de la espiga) sin que disminuya el peso unitario de grano, en un rango entre 4360 y 6000 gr m^{-2} , para un PUG medio de 0.31 g (Fig. 91).

Figura 91. Modelo lineal que relaciona el peso unitario de grano (PUG, g) en función del número de granos por unidad de superficie (NG m^{-2}), para todos los tratamientos, repeticiones, y ciclos agrícolas.



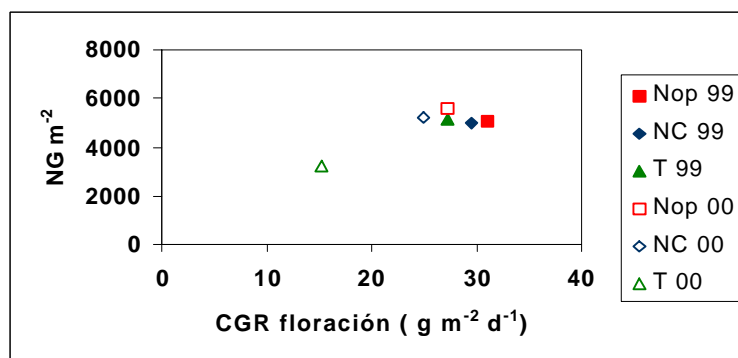
PUG= peso unitario de grano; NG m^{-2} = número de granos por metro cuadrado

Como se expresó para el ambiente I, ha sido demostrado que el NG m^{-2} es el principal componente del rendimiento en grano del cultivo de maíz en diferentes ambientes (Tollenaar, 1977; Hawkins y Cooper, 1981; Fischer y Palmer, 1984). El período crítico para la definición del NG comprende desde 1 a 2 semanas antes de floración femenina hasta 3 semanas posteriores (Tollenaar, 1977; Kiniry y Ritchie, 1985; Tollenaar *et al.*, 1992). La translocación de fotoasimilados a la espiga durante este período, está altamente relacionado con la definición del NG m^{-2} . Una deficiencia de nitrógeno afecta esta translocación, ya que disminuye los valores del IAF, la duración del área foliar (Novoa y Loomis, 1981, Sinclair y Horie, 1989) y, en consecuencia, la intercepción de la radiación y la eficiencia en el uso de la misma.

El NG final, es función de la tasa de crecimiento del cultivo en la floración (Fig. 92). Existe un umbral de crecimiento por debajo del cual no se fijan granos. En la Figura n° 92 se observa que, con CGR a floración superiores a los 26 $g m^{-2} d^{-1}$, no se incrementa el NG final por m^{-2} .

Para tasas de crecimiento del cultivo en la floración superiores a 26 $g m^{-2} d^{-1}$, no existió un incremento en el NG m^{-2} . El menor valor en el NG m^{-2} en función del CGR a floración, fue para el tratamiento T en el segundo año de ensayo, cuando se manifestó la deficiencia nitrogenada. El valor medio en el número de granos en el que no se manifestó una clara respuesta a la fertilización nitrogenada, fue de 5168 $gr m^{-2}$.

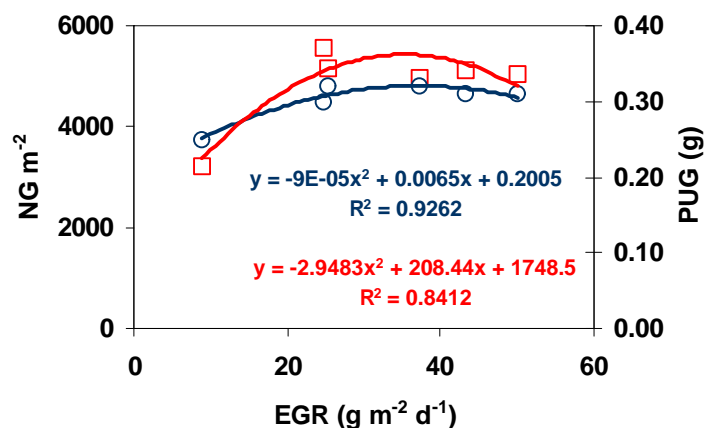
Figura 92. Número de granos por metro cuadrado (NG m^{-2}), en función de la tasa de crecimiento del cultivo en la floración (CGR floración, $g m^{-2} d^{-1}$).



Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

La varianza del índice de crecimiento de la espiga en la floración (EGR, $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) explica significativamente, en un 84 % la varianza del NG m^{-2} por medio de un modelo matemático que se recoge en la Figura n°93, mientras que el EGR total muestra relación con el PUG, y su varianza explica la de este componente del rendimiento, en un 93% (Fig. 93). En resumen, tanto el PUG como el NG m^{-2} , están fuertemente relacionados con la tasa de crecimiento de la espiga en la floración, y ésta, a su vez, puede ser modificada por un estrés nitrogenado. La tasa de crecimiento de la espiga, dependerá tanto de la MST acumulada alrededor de la floración y la capacidad de removilización del material utilizado, como de la duración del área foliar; ambas características determinarán la fuente de asimilados, mientras que, también son sumamente importantes los destinos que hayan sido fijados durante los 200 y 100 °C previos y posteriores a la floración (Otegui *et al.*, 1997), ya que tanto producirán una disminución en los rendimientos por una limitación en la fuente, como en los destinos.

Figura 93. Relaciones existentes entre los índices de crecimiento absoluto de la espiga (EGR, $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) en la floración y el número de granos (NG m^{-2}); y el EGR total ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) con el peso unitario de grano (PUG). \bar{I} PUG y \bar{II} número de granos.



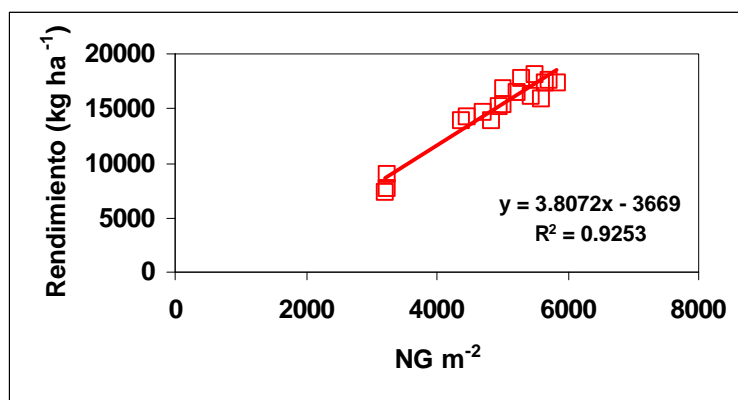
Con valores superiores a los $30 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ en la tasa de crecimiento de la espiga, no se incrementa el número final de gr m^{-2} . Como síntesis, se puede hablar para este ambiente, como objetivo el utilizar dosis de N que permitan una tasa de crecimiento del cultivo a floración de $25 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, y una tasa de crecimiento de la espiga en la floración de $30 \text{ g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, para asegurar, de esta forma, un número final de gr m^{-2} , y un PUG que permitan alcanzar altos rendimientos. Del análisis de los índices de crecimiento del cultivo realizado (Epígrafe 4.2.1.5), se puede concluir que las dosis de N que permiten estas tasas de crecimiento, tanto del cultivo, como de la espiga en la floración, son las de 150 y 300 kg N ha^{-1} y, al no existir diferencias entre ellas, las dosis superiores a los 150 kg N ha^{-1} propiciarán un consumo de lujo de N en el maíz, que no se traducirá en un incremento en el rendimiento en grano del cultivo, y serán una fuente potencial de contaminación de las aguas subterráneas.

En la Fig. n° 94, se muestra la relación existente, en este ambiente, entre el rendimiento y el NG m^{-2} . Cada 100 gr m^{-2} , el rendimiento aumenta en 381 kg ha^{-1} , considerando todos los niveles de nitrógeno confundidos. Para el ambiente I, los incrementos en el rendimiento por cada 100 gr m^{-2} fueron de 237 y 189 kg ha^{-1} , para condiciones de riego y seco, respectivamente. Valores de incremento de 370 kg ha^{-1} en el rendimiento por cada 100 gr m^{-2} fueron hallados por Andrade *et al.* (1996). Este gráfico confirma lo citado por numerosos autores con respecto a la fuerte

relación que existe entre el número de granos producidos por metro cuadrado y el rendimiento.

Los valores máximos de rendimiento fueron similares a los encontrados por otros investigadores españoles, del orden de los 7500 y 14500 kg ha⁻¹ (Barragán *et al.*, 1988; Cosculluela y Faci, 1992; Vallejo *et al.*, 1996). Las diferencias en el rendimiento entre los diferentes niveles de N se debe a la variación en los valores de IAF, LAD, LADf, y CGR, que dieron como resultado una mayor producción de MST y la mayor removilización durante la etapa de llenado de grano.

Figura 94. Modelo lineal que relaciona el rendimiento en grano (kg ha⁻¹), en función del número de granos por metro cuadrado (NG m⁻²), para todos los tratamientos, parcelas elementales, y ciclos agrícolas.



4.2.1.12 Índice de cosecha (IC)

El IC fue definido por Donald (1962). Este índice es usado para evaluar la eficiencia en la partición del cultivo, predecir rendimientos, y comportamiento del cultivo antes diferentes condiciones de estrés (CIMMYT, 1970; Rosielle y Frey, 1975). En los últimos años, el incremento en el IC, fue el responsable de los incrementos en los rendimientos de numerosos cereales (Gifford *et al.*, 1981). Este incremento se debió fundamentalmente a cambios en el patrón de partición de asimilados entre los diferentes órganos. Aunque existe un techo genético en el valor potencial del IC, debido a que es necesario realizar una “inversión” también en hojas y tallos como elemento de sostén (Gifford *et al.*, 1984), este valor también puede modificarse por diferencias de manejo.

En la Tabla n° 51, se presentan los valores de IC para los dos ciclos agrícolas. Para el año 1999, existieron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos Nop y T (Tuckey $\alpha = 0.05$). Para el año 2000, las diferencias fueron entre los tratamientos fertilizados y el testigo. Los resultados encontrados son similares a los presentados por otros autores, con valores de alrededor de 0.50 (Deloughry y Crookston, 1979; Tetio-Khago *et al.*, 1988; Grant, 1989). En España, Cosculluela y Faci (1992) encontraron valores de entre 17 y 58 %, dependiendo de la cantidad de agua aplicada. Aguilar (1994) según el cultivar y la densidad empleada, encontró valores de IC de entre 54 y 56.7 %. De Juan *et al.* (1999), para maíz dulce y una provisión de agua de entre 385 y 410 mm, encontraron valores de, aproximadamente, 50 %. Cox *et al.* (1993) encontraron valores de 0.42 a 0.50, crecientes de acuerdo al nivel de nutrición nitrogenada de 0 a 225 kg N ha⁻¹.

Para el año 2000, las dosis de fertilización nitrogenada de 150 y 300 kg N ha⁻¹ resultaron en mayores valores de IC, es decir una mayor transferencia fotoasimilados hacia destinos reproductivos. La presencia de un estrés nitrogenado resulta en una disminución de la translocación de asimilados al grano. Resultados similares fueron hallados por Muchow y Sinclair, 1995; Asadi *et al.*, 2002.

Muchow (1988b) encontró una respuesta lineal del IC a un incremento en el nivel de N de 0 a 120 kg N ha⁻¹, aunque la relación se mantuvo constante entre 120 a 240 kg N ha⁻¹. Este resultado es coincidente con el del presente trabajo, en el que la respuesta lineal del IC, se da para niveles entre 0 y 150 UFN, y se mantiene constante entre 150 a 300 kg N ha⁻¹.

Tabla 51. Análisis de varianza para el Índice de Cosecha (%).

Tratamiento	Año 1999	Nivel de significación	Año 2000	Nivel de significación
Nop	49 a	*	53 a	**
NC	53 ab		51 a	
T	55 b		48 b	
Tuckey $\alpha=0.05$		0.053		0.019

*: p < 0.05, **: p < 0.01; letras diferentes indican diferencias significativas, o altamente significativas entre tratamientos. Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

4.2.2 Efecto del agua sobre el funcionamiento del cultivo

El objetivo de este capítulo para este ambiente (Albacete, España), en donde no existieron niveles hídricos diferenciados, es el de constatar que el riego no fue deficitario, y estudiar el efecto de los diferentes niveles de N en el crecimiento radicular, el consumo hídrico, las eficiencias en el uso del agua y el estado hídrico en la planta.

4.2.2.1 Programación de riego y precipitaciones

La programación del riego fue realizada por el Servicio de Asesoramiento de Riegos de Albacete (SARA), del Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP, 1998).

En la Tabla nº 52, se presentan las fechas y volúmenes de riego aplicados de acuerdo a la programación de riego. El primer riego, en 1999, se aplicó el 10/05 y el último, el 12/09. En el año 2000, el inicio del riego fue el 20/05 y el último, el 20/09. Las láminas de riego aplicadas y su distribución porcentual fueron similares para los dos años. Las precipitaciones recibidas fueron escasas ambos años, de magnitud similar aunque de diferente distribución, pero poco relevantes para el consumo del cultivo. El agua total recibida, por lluvias y riegos, es adecuada, realizando un análisis global para todo el ciclo del cultivo, en función del consumo medio para el cultivo de maíz en esta zona.

Tabla 52. Lluvias recibidas (mm) y lámina de agua de riego aplicada (mm), en todos los tratamientos y su reparto porcentual en las etapas más significativas del ciclo del maíz: siembra-V6 (05/05-15/06); V6-Vt (15/06-24/07); y Vt-MF (24/07-18/09) en el ciclo 1999; y siembra-V6 (19/05-30/06); V6-Vt (30/06-31/07); y Vt-MF (31/07-28/09).

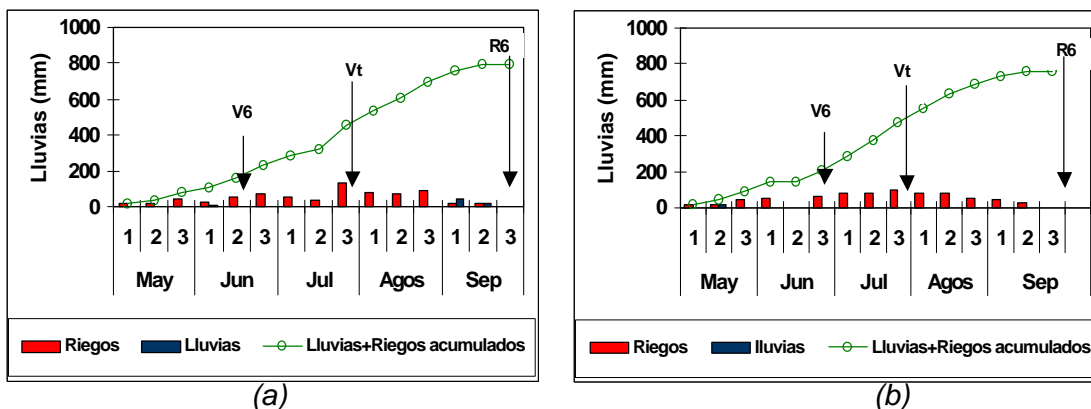
	Lluvias		Riegos		Agua total recibida	
	1999	2000	1999	2000	1999	2000
Subtotal Siembra-V6	5.88 (9 %)	16.30 (91%)	134.70 (18 %)	154.00 (20 %)	140.58 (18 %)	170.30 (22 %)
Subtotal V6-Vt	0.00 (0 %)	0.00 (0 %)	272.60 (37 %)	231.00 (30 %)	272.60 (34 %)	231.00 (29%)
Subtotal Vt-R6	57.10 (91 %)	1.50 (9 %)	331.20 (45 %)	385.00 (50 %)	388.30 (48%)	386.50 (49 %)
Total	63.0	17.8	738.49	770.0	801.48	787.7

V6= sexta hoja expandida; Vt= floración masculina; MF= madurez fisiológica

En la Figura nº 95, se presenta la distribución de lluvias y riegos aplicados en relación al momento fenológico del cultivo. Para el ciclo 2000, la distribución de riegos, y su magnitud, siguió la evolución del consumo del cultivo, mientras que en el año 1999, la distribución no fue tan homogénea. Para la última decena de julio y primera de agosto, el riego aplicado fue de 214 mm, lo que supone un consumo diario de 11mm. Aunque este momento coincide con la floración del cultivo, etapa de gran sensibilidad a la falta de agua, posiblemente el riego aplicado fue excesivo. En los primeros 20 días de julio (V9-Vt), el riego aplicado fue de 89.7 mm, lo que supuso un consumo diario inferior a los 5 mm, y una elevación del consumo al doble en los siguientes 20 días. Realizando el análisis en forma decenal, para la segunda decena de julio, el riego aplicado permite un consumo diario de 3.45 mm diarios, y para la siguiente, de 13.8 mm d⁻¹. Para el ciclo 2000, esta evolución diaria del consumo en función del riego aplicado, como se expresó anteriormente, fue más homogénea y coincidente con las curvas de evolución de coeficiente de consumo del cultivo (kc). Sólo se verificó para la segunda decena de junio una disminución del consumo calculado, según el riego aplicado. De cualquier forma, y como ya fue expresado, los volúmenes globales aplicados no fueron limitantes en la producción del cultivo, pero

es importante como objetivo para esta zona, donde la disponibilidad de agua es limitante, el realizar un ajuste más estricto de la evolución del riego a las necesidades del cultivo, lo que resultará en un ahorro en el agua de riego aplicada.

Figura 95. Lluvia registrada, riego aplicado, y lluvia + riego acumulado (mm), durante el ciclo 1999 (a) y 2000 (b).



V6= sexta hoja expandida; Vt= floración masculina; R6= madurez fisiológica del grano

4.2.2.2 Crecimiento del sistema radicular

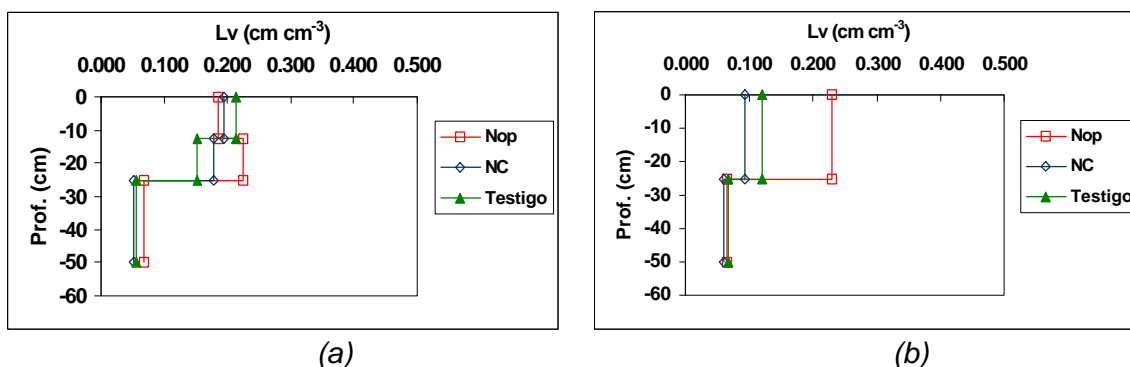
En la Figura n° 96, se presentan los perfiles de exploración radicular para todos los tratamientos. Al igual que para el ambiente I, para este ambiente, la medición de la longitud volumétrica radical (Lv) se realizó después de R1 (floración femenina) para poder estudiar el efecto de la fertilización nitrogenada en el sistema radicular, en el momento de su máximo desarrollo (MacKay y Barber, 1986). Para ninguno de los dos años de ensayo, existieron diferencias en la Lv, a partir de los 0.25 m, por efecto de los diferentes niveles nitrogenados (Fig. 96). Para este tipo de suelo y ambiente, debido al manejo del riego y la fertilización, los primeros 0.25 m de suelo son determinantes para la actividad radicular, y es en donde se encuentra la mayor concentración de raíces. Las modificaciones por causa del N, en los valores de Lv, se observaron en este horizonte. Para el ciclo 1999, la reducción en la Lv, del horizonte Ap al Bk, fue del 70 % para todos los tratamientos. Para el ciclo 2000, esta reducción se mantiene en la misma proporción para el tratamiento Nop, pero se modifica para los dos restantes, siendo del 36 y 45 % para NC y T, respectivamente. Esta modificación en la exploración del perfil del suelo para el último año de ensayo, se observó en el horizonte superficial Ap, y no en el Bk. Como se puede comprobar en la Figura n° 96, la Lv en el horizonte Bk es similar para los dos años de ensayo. Este hecho indica que el riego no limitante, y la presencia de un horizonte Bk, son mas determinantes en la distribución radicular hasta los 0.50 m que el manejo de la fertilización nitrogenada.

En 1999 (Fig. 96a), existieron diferencias menos marcadas entre tratamientos, observándose una disminución de los valores de Lv para el tratamiento T de 0.15 a 0.25 m de profundidad. Sin embargo, como se analiza en los Epígrafes 4.2.1.2 y 4.2.1.11, no existieron diferencias en el crecimiento, ni en la producción de granos, entre tratamientos, por lo que se puede inferir que, ni la disponibilidad hídrica ni nutricional fueron limitantes.

En el año 2000 (Fig. 96b), se observó una modificación en la distribución radicular en superficie (0-0.25 m, horizonte Ap). Sin embargo, esta modificación no responde a la hipótesis de que, a mayores dosis de N, existe un mayor desarrollo radicular en la zona de aplicación del fertilizante, ya que la mayor Lv fue medida

para Nop, seguida, en forma decreciente, por el tratamiento T y, finalmente, NC, con una diferencia pequeña entre estos últimos. Oikeh *et al.* (1999) encuentran que la aplicación de N estimula el crecimiento radicular hasta profundidades mayores a los 0.45 m en floración, en un suelo limoso. Para este suelo, y debido a los resultados encontrados, se puede concluir que la aplicación de N estimuló la actividad radicular en mayor proporción que su Lv, como se analiza a continuación a través del consumo específico.

Figura 96. Longitud volumétrica radicular (L_v , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) para los tratamientos Nop, NC, y T y los ciclos: (a) 1999 y (b) 2000.



Prof.= profundidad; Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional.

El consumo específico aparente radicular, calculado al igual que para el ambiente I, como la relación entre el consumo total en cm^3 , y la longitud total de raíces en cm^3 , fue de 92, 86, y 96 para Nop, NC, y T, respectivamente, en el año 1999. En el año 2000, que es cuando se midieron diferencias más marcadas en la L_v en superficie, estos valores fueron de 76, 148, y 120 para Nop, NC, y T, respectivamente. Considerando este parámetro como un indicador indirecto, y sólo orientativo, de la actividad radicular, el efecto del N tuvo influencia en la actividad radicular, como mostraron los resultados del consumo específico aparente para NC.

En condición de riego, la aplicación de N promueve el incremento en L_v en la zona de aplicación. En el año 1999, la distribución porcentual tanto en la longitud radicular (calculada como distribución porcentual de cm de raíz por horizonte; Tabla 53), como del peso por horizonte fue similar para los tres tratamientos, en coincidencia con los resultados hallados en el crecimiento y rendimiento (Epígrafes 4.2.1.2 y 4.2.1.11), los que no mostraron diferencias entre los distintos niveles nitrogenados. Se observó una diferencia marcada en la presencia de raíces en el horizonte superficial, con respecto al más profundo. La distribución porcentual en este horizonte, fue siempre mayor para la longitud radicular que para el peso, lo que indicó la presencia de raíces más finas en superficie. Más del 70 % de la longitud radicular se encontró en el horizonte Ap.

En el año 2000, se mantiene el mismo patrón de distribución radicular en superficie y en el horizonte Bk, pero con modificaciones en los valores absolutos por tratamiento (Tabla 53). Contrariamente a lo hallado por otros autores (Durieux *et al.*, 1994), en esta situación, el peso de raíces no decreció conjuntamente con el incremento en la dosis de N; por el contrario, los mayores pesos se midieron en los tratamientos fertilizados. Ya que la función del sistema radicular es la de proveer agua y nutrientes a la parte aérea para los diferentes procesos fisiológicos, al existir una alta disponibilidad de N (N residual + N fertilizante) e hídrica en superficie, en este año, para el tratamiento NC, sumado a la escasa profundidad de desarrollo del

suelo, determinaron que en este tratamiento no haya sido necesario la profundización y crecimiento radicular, proporcionando los valores más bajos de Lv. El tratamiento Nop aparece más estable en los parámetros evaluados, tanto de Lv como en el peso, para los dos años de ensayo. El tratamiento T presenta, para este año, una distribución porcentual en la longitud radical similar al tratamiento NC, con mayor presencia de raíces en el horizonte Bk con respecto al año 1999.

Tabla 53. Valores de peso raíces (g m^{-2} , %) y longitud volumétrica del sistema radicular (Lv, cm cm^{-3}), por horizonte del perfil del suelo explorado por el cultivo de maíz, para todos los tratamientos y los dos años de experimentación.

1999						
Horizonte del suelo (cm)	Nop		NC		T	
	Lv	Peso	Lv	Peso	Lv	Peso
Ap (0-25)	0.183 (75.84%)	96.30 (61%)	0.206 (73.80 %)	97.97 (61%)	0.186 (76.81 %)	62.72 (52%)
Bk (26-50)	0.055 (24.16%)	62.78 (39%)	0.069 (26.20 %)	90.49 (39%)	0.053 (23.19%)	79.45 (48%)
2000						
Horizonte del suelo (cm)	Nop		NC		T	
	Lv	Peso	Lv	Peso	Lv	Peso
Ap (0-25)	0.230 (76.78 %)	88.83 (59%)	0.093 (59.80 %)	95.90 (78%)	0.121 (63.37 %)	88.30 (78%)
Bk (26-50)	0.066 (23.32 %)	62.99 (41%)	0.059 (40.20 %)	26.85 (22)	0.066 (36.63 %)	25.33 (22%)

Nota: Los valores porcentuales que figuran en la columna de Lv, corresponden al porcentaje de longitud de raíces en cm por cada horizonte de suelo. Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo.

La relación peso seco de las raíces/longitud de raíces fue siempre menor en el horizonte superficial para el año 1999, indicando la presencia de raíces más finas en este horizonte. Los tratamientos fertilizados presentaron raíces de mayor diámetro en el horizonte Ap, con respecto a T, mientras que esta relación se invierte en el horizonte que se desarrolla de 0.25 a 0.50 m. A pesar de que el contenido de N mineral en la siembra fue similar para todos los tratamientos en 1999 (Epígrafe 4.2.3.1b), la aplicación de fertilizante nitrogenado favoreció el crecimiento de raíces finas en superficie.

Para el año 2000, sólo, el tratamiento Nop mantiene esta relación peso/Lv, con presencia de raíces más finas en superficie. En los tratamientos NC y T, la relación se invierte y de forma más marcada, para el tratamiento NC. Trabajando en las mismas condiciones pedoclimáticas, las diferencias encontradas en el modelo de reparto de raíces, se puede pensar que son debidas a características ligadas a la planta y a su interacción con las condiciones del medio y, en un nivel menos complejo, se puede hablar de un componente genético que intervendrá modificando la estrategia de penetración en profundidad de las raíces en función de “señales” producidas por cambios originados en el medio (Guevara, 1991). Para nuestros datos, y como se dijo anteriormente, la respuesta del cultivar utilizado, a una condición no limitante hídrica y nitrogenada (NC), fue la reducción del crecimiento radical.

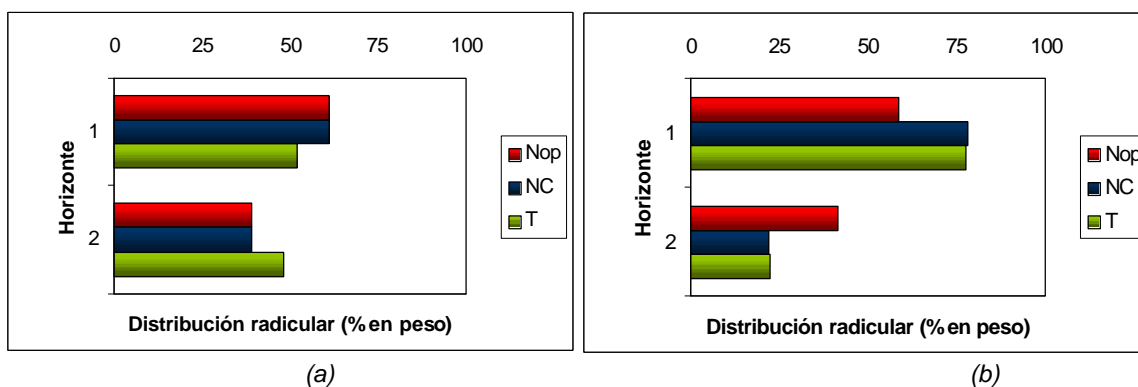
a) Distribución porcentual del sistema radicular

Analizando, en mayor profundidad, el modelo de reparto del sistema radicular, se observa, para el año 1999, que existió un efecto de la aplicación de fertilizante nitrogenado. A pesar de que la situación inicial de disponibilidad

nitrogenada para este año fue alta, y similar entre tratamientos (Epígrafe 4.2.3.1b), existió una modificación en la distribución porcentual de las raíces (Fig. 97a), como respuesta a la aplicación de fertilizante nitrogenado. Los tratamientos Nop y NC presentaron un mayor peso de raíces en superficie, con respecto al tratamiento T, situación que se invierte en el horizonte Bk. El porcentaje de raíces, para estos tratamientos, en el horizonte Ap, es de alrededor de 60 %, y de 40 % en profundidad, mientras que, para el tratamiento T, los porcentajes son similares en los dos horizontes.

Para el año 2000, la respuesta a la aplicación de N en la distribución porcentual es diferente para cada tratamiento. La distribución porcentual en el tratamiento Nop es similar a la encontrada en el año anterior. Sin embargo el tratamiento NC muestra una distribución muy similar al tratamiento T, el que, también, mostró diferencias con respecto al año 1999. Las diferencias encontradas en el tratamiento NC se pueden explicar como una respuesta a la alta disponibilidad nitrogenada en superficie, lo que hizo innecesario la profundización radicular. Sin embargo, para el tratamiento T, la mayor distribución porcentual en superficie indicó la presencia de raíces de mayor diámetro, aunque, para este año, se incrementa la Lv en la profundidad de 0.25-0.50 m (Tabla 53), como respuesta a la necesidad de mayor exploración del perfil debido al menor contenido de N en el horizonte Ap, con respecto al año anterior.

Figura 97. Distribución porcentual de raíces (% en peso) por horizonte del suelo para todos los tratamientos y los años: (a) 1999 y (b) 2000.



Horizontes 1: Ap, 0-25 cm; Horizonte 2: Bk, 26-50 cm. . Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

Como síntesis, con respecto a las modificaciones encontradas en el presente ambiente, como respuesta a la aplicación de N en los patrones de distribución radicular, se puede pensar que, cuando el ambiente hídrico y nitrogenado en el que se desarrolla el sistema radicular no es limitante, las diferencias y la variabilidad (CV 60 a 2%) de Lv medidas se deben a impedimentos edáficos, como en este caso el desarrollo de un horizonte petrocálcico (Ck), que impide el crecimiento radicular en esa profundidad y restringe la exploración en los primeros 0.50 m. De acuerdo a los resultados hallados en la bibliografía, el efecto del N en el desarrollo radicular incrementa la Lv en la zona de aplicación del fertilizante, pero no la Lv total, y disminuye el peso de raíces (Anderson, 1987; Durieux *et al.*, 1994).

En la Tabla n° 54, se presentan los resultados del peso total de raíces y la Lv total de las mismas. En 1999, el tratamiento que recibió la mayor dosis de N (NC) fue el de mayor peso y Lv. Estos resultados no son coincidentes con los hallados en la bibliografía. Durieux *et al.* (1994) mostraron que el peso de las raíces decrece con

el incremento de N, y que aumenta la Lv en el sitio de aplicación del fertilizante, pero que un aumento en la dosis nitrogenada no incrementa la Lv total. En este ambiente, la diferencia en los resultados pueden explicarse por el escaso desarrollo del suelo en profundidad, ya que un incremento en la Lv en uno de los horizontes representa el aumento de la Lv total. La Lv fue similar para Nop y T, con un mayor peso radicular en el tratamiento Nop, indicando la presencia de raíces más gruesas.

Para el año 2000, los valores, tanto de peso como Lv total, son menores para NC y para T, comparados con los del año anterior. Para NC, la reducción en la Lv fue mayor (45%) que en el peso (35 %), con respecto al año 1999. La reducción en el tratamiento T, también fue mayor en la Lv (81%) que en el peso (20 %), con respecto al año anterior. Para el tratamiento Nop, existió una pequeña disminución en el peso y un incremento en la Lv total.

Tabla 54. Peso seco de las raíces (peso total, g m⁻²) y longitud volumétrica total del sistema radicular (Lv, cm cm⁻³), para todos los tratamientos experimentales en los dos años de ensayo.

Año	1999		2000	
	Peso total	Lv	Peso total	Lv
Nop	159	0.238	152	0.295
NC	189	0.274	123	0.150
T	142	0.239	114	0.187

Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

b) Relación sistema radicular/ sistema aéreo de las plantas de maíz

La relación raíz/parte aérea fue similar entre tratamientos en el ciclo 1999. Los valores medidos fueron de 6, 7, y 6 % para Nop, NC, y T, respectivamente. En el año 2000, si se encontraron diferencias entre el tratamiento T y los tratamientos fertilizados. Los valores medidos fueron de 5, 7, y 12 % para Nop, NC, y T, respectivamente. En cuanto al índice de partición (peso raíz/materia seca total), los valores fueron de 6, 7, y 6 para los mismos tratamientos, y en ese orden, en el ciclo 1999. En el año 2000, también, se encontró una diferencia entre el T y los demás tratamientos, hallándose valores de 5, 7, y 11, para Nop, NC, y T, respectivamente.

Comparando los valores de la relación raíz/parte aérea e índice de partición calculados para este ambiente (Albacete, España) con respecto al ambiente I (Pergamino, Argentina), éstos resultaron muy pequeños en este sitio con relación a los medidos en Argentina, por lo que se podría pensar que la importancia del desarrollo radicular tiene menor incidencia en el rendimiento, remitiéndonos a los resultados logrados (Epígrafe 4.2.1.11) y, quizá, es conveniente hablar en términos de actividad radical. Cuando la disponibilidad de N fue limitante, como lo fue en el tratamiento T en el año 2000, la relación raíz/parte aérea se incrementó, pero en un porcentaje muy pequeño comparado con los incrementos encontrados en esta relación en el ambiente I, como respuesta en la estrategia de profundización radical ante condiciones limitantes, con lo que, se puede concluir que tanto esta relación como el índice de partición se modifican en pequeña medida ante situaciones limitantes en este suelo; sin embargo, la disminución del rendimiento es muy marcada, por lo que, nuevamente, debido a la limitación impuesta por una impedancia edáfica, la obtención de altos rendimientos en este ambiente estará fuertemente ligada al suministro de insumos, que representan un subsidio energético en el funcionamiento del cultivo.

Como se analiza en el Epígrafe 4.2.2.3, no existieron diferencia en el consumo hídrico entre tratamientos, por lo que se puede pensar que el efecto del N es más dependiente de su disponibilidad que de la disponibilidad hídrica en estas condiciones de manejo de riego, como encuentran Pandey *et. al.* (2000) en un trabajo con riego deficitario en maíz en un ambiente semiárido.

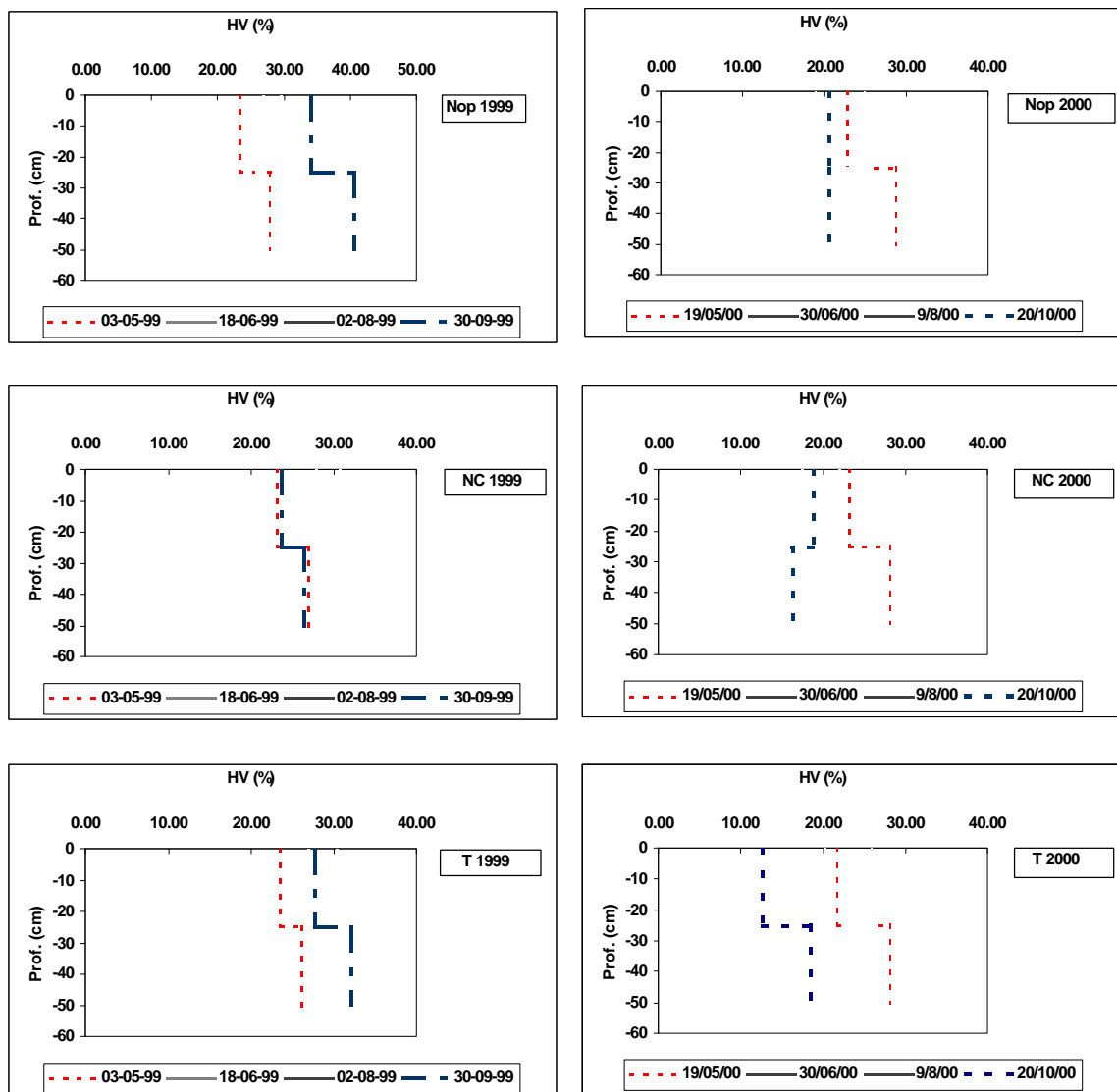
4.2.2.3 Consumo hídrico

En la Figura n° 98, se presentan los perfiles de consumo hídrico para todos los tratamientos, y los dos años de ensayo. Para el año 1999, el consumo fue más importante en el horizonte Ap que en el Bk, para Nop, mientras que en al año 2000 la situación es la inversa. En el tratamiento NC, el consumo también es más importante en superficie, en el año 1999, que en profundidad. En el año 2000, la situación también es la inversa, para las fechas consideradas. En el tratamiento T, el consumo es similar en las dos profundidades consideradas en el año 1999, mientras que, en el año 2000, y en las fechas analizadas, las variaciones en la humedad volumétrica indicaron que el consumo fue más importante en superficie (0-0.25) que de 0.25 a 0.50 m de profundidad.

Comparando los contenidos hídricos volumétricos iniciales y finales por tratamiento, y para cada año, se observó que, en 1999, hubo ingreso de agua en el sistema para los tratamientos Nop y T, mientras que los contenidos iniciales y finales fueron similares para NC. Sin embargo, para el año 2000, las diferencias entre los contenidos hídricos volumétricos iniciales y finales indican consumos mas importantes en profundidad para los tratamientos Nop y NC, mientras que, para el tratamiento T, el consumo es importante tanto en el horizontes Ap como en el Bk.

Debido a las características edáficas en este ambiente, este tipo de análisis es menos relevante que para el ambiente I, ya que la exploración radical se dio indistintamente para todos los tratamientos hasta los 0.50 m y el consumo hídrico no se vio limitado, aunque sí el nitrogenado (Epígrafe 4.2.3.1a), pero fundamentalmente, como respuesta a una baja disponibilidad de N, y no a una limitación en el desarrollo radicular debido a esta deficiencia. Aunque el N fue limitante, como sucedió en el tratamiento T el año 2000, el hecho de que la disponibilidad hídrica no lo fuera, fue suficiente para asegurar que el modelo de repartición de raíces no se viera afectado.

Figura 98. Perfiles del contenido volumétrico de humedad (HV, %) en el suelo experimental (0-0.50 m de profundidad), en distintas fechas de medición, durante los años de ensayo.



Prof.=profundidad; HV(%)= humedad volumétrica porcentual. Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

En la Tabla n° 55, se presentan los consumos por tratamiento y para los dos años de ensayo, calculados por etapas. Las etapas consideradas fueron: siembra-V6, V6-15 DDFF, y 15 DDFF- MF.

Para los dos años analizados, los consumos fueron mayores en todos los tratamientos en la etapa V6-15 DDFF, etapa crítica a la falta de agua (Classen y Shaw, 1970; Moss y Downey, 1971; Westgate y Boyer, 1986a,b). La distribución porcentual del consumo para los dos años, fue similar, aunque para el año 2000, el consumo en el período V6-15 DDFF se incrementó con respecto al consumo en la etapa 15 DDFF-MF.

Debido a que la disponibilidad hídrica no fue limitante para ninguno de los años, y en ninguno de los tratamientos, las diferencias en los consumos, ya sea por etapas o con respecto al consumo total, son muy pequeñas e irrelevantes. De acuerdo a los resultados de los consumos totales y, fundamentalmente en el período

V6-15 DDFF, se puede concluir que el riego aplicado no redujo el consumo; por el contrario, para la etapa siembra-V6, realizando una comparación en los consumos con los resultados obtenidos en el ambiente I, se puede pensar que el realizar un riego deficitario en esta etapa cumpliría con el objetivo de ahorrar agua sin disminuir los rendimientos.

Tabla 55. Consumos hídricos (mm, %) estimados en las etapas fenológicas en las que se ha desglosado el ciclo del maíz, y el total estacional, en los tres tratamientos nitrogenados diferenciados durante los dos años de experimento.

Tratamiento	Siembra-V6	V6-15 DDFF	15 DDFF-MF	Total
Año 1999				
Nop	99.80 (13.43%)	365.37 (49.18%)	277.68 (37.38 %)	742.86
NC	94.75 (11.83 %)	355.10 (44.32%)	351.31 (43.85 %)	801.16
T	91.83 (11.84 %)	361.05 (46.53%)	323.02 (41.63 %)	775.90
Año 2000				
Nop	146.64 (19.28 %)	399.34 (52.51 %)	214.54 (28.21 %)	760.53
NC	146.91 (19.11 %)	398.89 (51.90 %)	222.80 (28.99 %)	768.59
T	139.40 (18.09 %)	398.60 (51.73 %)	232.55 (30.18 %)	770.54

V6= sexta hoja expandida; 15DDFF días desde la floración femenina; y MF madurez fisiológica del grano. . Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

En la Tabla n° 56, se presentan las variaciones en el contenido de humedad entre las diferentes fechas de muestreo, para todos los tratamientos y los dos años. Los valores de esta tabla fueron utilizados en el balance hídrico. Los valores negativos indican la entrada de agua al sistema, mientras que los valores positivos indican consumo. La alta presencia de valores negativos para los dos años de experimentación está señalando una alta disponibilidad hídrica debido a la frecuencia y láminas de riego aplicadas. La ecuación utilizada para el balance hídrico fue la número 1 del Epígrafe 4.1.2.3.

Tabla 56. Variaciones de humedad (mm) en el perfil de suelo entre sucesivas fechas de medición.

Año	1999			Año	2000			
	Fecha	Nop	NC		T	Fecha	Nop	NC
	03/05-24/05	-0.85	-3.63	-8.94	19/05-25/05	-39.59	-38.92	-36.79
	24/05-03/06	0.89	-3.79	5.02	25/05-30/05	21.14	19.77	15.08
	03/06-08/06	2.07	-2.49	-6.86	30/05-08/06	-3.00	42.03	-5.32
	08/06-11/06	-18.66	-11.69	-13.77	08/06-13/06	-3.68	-49.70	-3.29
	11/06-18/06	-4.99	-6.47	-7.9	13/06-27-06	-3.28	-4.24	-6.72
	18/06-28/06	25.19	24.74	36.3	27/06-30/06	4.85	7.77	6.24
	28/06-06/07	-2.82	-6.08	-18.15	30/06-05/07	1.08	2.83	7.38
	06/07-16/07	-2.32	-3.45	3.32	05/07-14/07	-2.36	-7.03	-7.54
	16/07-21/07	4.28	-0.73	6.64	14/07-21/07	6.96	11.16	9.62
	21/07-02/08	-5.98	-4.94	-11.17	21/07-25/07	-7.05	-7.05	6.62
	02/08-11/08	0.22	5.27	4.95	25/07-03/08	1.35	-2.25	-16.51
	11/08-17/08	-21.12	-16.4	-0.28	03/08-09/08	-11.72	-6.06	-10.12
	17/08-27/08	-3.21	-2.23	-16.58	09/08-18/08	8.59	4.78	6.66
	27/08-30/08	13.58	17.37	1.37	18/08-25/08	-7.20	-7.95	-8.18
	30/08-30/09	-44.28	14.79	1.06	25/08-07/09	-6.66	-0.32	-0.53
					07/09-14/09	5.21	-0.75	4.67
					14/09-22/09	23.76	9.85	4.04
					22/09-29/09	-0.53	6.55	-5.61
					29/09-20/10	-15.05	0.43	23.15
Sumatoria	-58.02	0.28	-24.98		-27.17	-19.11	-17.15	

Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

Los consumos calculados, en todos los casos, no presentan diferencias entre los distintos tratamientos ni entre años (Tabla 57). Las lluvias representan un 8 % del consumo para el primer año y, sólo, un 2 % para el segundo. Las variaciones de humedad en el suelo están indicando la entrada de agua al sistema, excediendo el consumo. Para este ambiente, el consumo fue 108 y 140 mm mayor, en los años 1999 y 2000, respectivamente, con respecto al ambiente I, considerando un promedio de los tratamientos Prop. El rendimiento promedio, en los dos años de los tratamientos fertilizados, fue 3543 kg ha⁻¹ mayor que para los tratamientos T2 y T3 del ambiente I promediados. Esto representa una eficiencia en el uso del agua, considerando el consumo en exceso de este ambiente con respecto al ambiente I, y el incremento en la producción de grano también en este ambiente con respecto al I, de 2.86 kg m⁻³. Esta eficiencia es mayor a la calculada tanto para este ambiente, para todo el ciclo, como para el ambiente II.

Tabla 57. Componentes del balance hídrico (mm) y consumos estacionales de agua (mm) en cada tratamiento nitrogenado y año de ensayo.

Tratamiento	ΔH	Lluvias (mm)	Riego (mm)	Consumo (mm)
Año 1999				
Nop	-58.02	63	738	743
NC	0.28	63	738	801
T	-24.98	63	738	776
Año 2000				
Nop	-27.17	17.8	770	761
NC	-19.11	17.8	770	769
T	-17.15	17.8	770	771

ΔH = variación en el contenido de humedad volumétrica del suelo (inicial-final). Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

4.2.2.4 Eficiencia en el uso del agua

Fue calculada la eficiencia en el uso del agua para el período crítico para la definición de granos (EUA Pc) (Tabla 58). La extensión del período crítico se consideró, al igual que para el ambiente I, durante el período de elongación activa de la espiga, comprendido entre los -200 y 100°C desde floración femenina (Otegui *et al.*, 1997). Para el año 1999, esta eficiencia no fue diferente significativamente entre tratamientos, pero, para el año 2000, existieron diferencias estadísticamente significativas entre el tratamiento T y los dos restantes (Tabla 28, Anejo 2).

El resultado del análisis de varianza (Tabla 28, Anejo 2) para el año 1999, no mostró diferencias entre tratamientos, ni para la EUA MST ni para el EUA gr. Este resultado resalta, una vez más, que no se lograron diferencias en los niveles nitrogenados para este año, de una magnitud como para afectar la EUA. Para el año 2000, las diferencias son altamente significativas, tanto para la EUA MST como para EUA gr, lo que evidencia el efecto de los diferentes niveles de nutrición nitrogenada en la EUA. Para este año, las diferencias (altamente significativas) separan el tratamiento T (0 kg N ha⁻¹) de los dos restantes (150 y 300 kg N ha⁻¹). Para los dos años, los valores de EUA MST, fueron menores para NC con respecto a Nop. Esta misma tendencia se encontró para 1999 en el valor de la EUA gr, aunque estas diferencias no fueron estadísticamente significativas. Este resultado pone de manifiesto que un incremento de la fertilización nitrogenada, por encima de los 150 kg N ha⁻¹, no modifica en forma positiva la EUA.

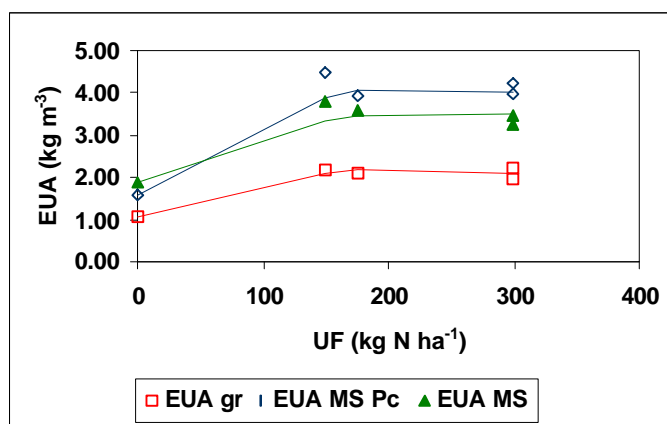
Tabla 58. Eficiencia en el uso del agua, referida a la materia seca total producida, para el período crítico (EUA MST Pc, kg m^{-3}) y para todo el ciclo agronómico (EUA MST, kg m^{-3}), y para la producción de grano (EUA gr, kg m^{-3}).

Tratamiento	EUA MST Pc	EUA MST	EUA gr
	(kg m^{-3})	(kg m^{-3})	(kg m^{-3})
Ciclo 1999			
Nop	3.93	3.60	2.10
NC	3.98	3.24	1.98
T	3.55	3.21	2.04
Ciclo 2000			
Nop	4.47	3.79	2.18
NC	4.23	3.47	2.22
T	1.56	1.89	1.05

Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

En la Fig. n° 99, se presenta la relación encontrada entre la EUA gr y la dosis de N aplicada (UF, kg N ha^{-1}), sin considerar el tratamiento T del año 1999. A pesar de que se logró sólo un punto que expresa la deficiencia nitrogenada (T; año 2000), la relación encontrada muestra que con dosis superiores a los 150 kg N ha^{-1} , no se incrementó la EUA en ninguna de sus variantes analizadas.

Figura 99. Relaciones existentes entre la EUA gr, MS Pc, y MS en función de la dosis de N aplicada para los tratamientos Nop y NC (años 1999 y 2000) y en el tratamiento T (año 2000). Los símbolos representan los valores observados y las líneas la ecuación de ajuste.



EUA gr= eficiencia en el uso del agua para grano; EUA MS Pc= eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca durante el período crítico a la falta de agua; EUA MS= eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca durante todo el ciclo de cultivo; UF= unidades de fertilizante

En la Tabla n° 59, se presentan las ecuaciones de ajuste para las relaciones presentadas en la Figura n° 99. Las relaciones fueron ajustadas por medio de ecuaciones cuadráticas, que resultaron significativas y altamente significativas, según la eficiencia analizada.

Tabla 59. Modelos polinómicos, de segundo grado, que explican la varianza de las distintas eficiencias en el uso del agua (kg m^{-3}) por la cantidad de nitrógeno aplicada (kg N ha^{-1}).

	$b(x)^2$	$c(x)$	d	Nivel de significación	R^2
EUA gr	-2.33495919E-05	0.010480	1.054252	**	0.92
EUA MS Pc	-4.82875421E-05	0.022611	1.567904	*	0.82
EUA MS	-2.87704713E-05	0.014055	1.879874	**	0.81

*: $p < 0.05$ **; $p < 0.01$; R^2 = coeficiente de determinación; EUA gr= eficiencia en el uso del agua para grano; EUA MS Pc= eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca durante el período crítico a la falta de agua; EUA MS= eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca durante todo el ciclo de cultivo.

Las mayores dosis de fertilizante nitrogenado aplicadas en el año 2000 produjeron un incremento en todas las EUA analizadas. Según la definición del concepto de EUA, como la relación entre la acumulación de biomasa, expresada como la asimilación de CO_2 , biomasa total, o rendimiento del cultivo en grano y el consumo hídrico, expresado como transpiración, evapotranspiración o entrada total de agua al sistema (Sinclair *et al.*, 1984), el efecto del N en el incremento en la EUA, se debió al incremento tanto de la producción de MST, para todo el ciclo y para el período crítico, como de la producción de grano, sin haber existido modificaciones importantes en el consumo, dentro de los diferentes niveles nitrogenados. Esto está indicando, para este ambiente, la importancia de ajustar los niveles de riego aplicado al nivel de fertilización nitrogenada, con el objetivo de lograr altos rendimientos, pero con altos niveles de eficiencias en el uso del agua.

4.2.2.5 Estado hídrico en planta. Mediciones indirectas

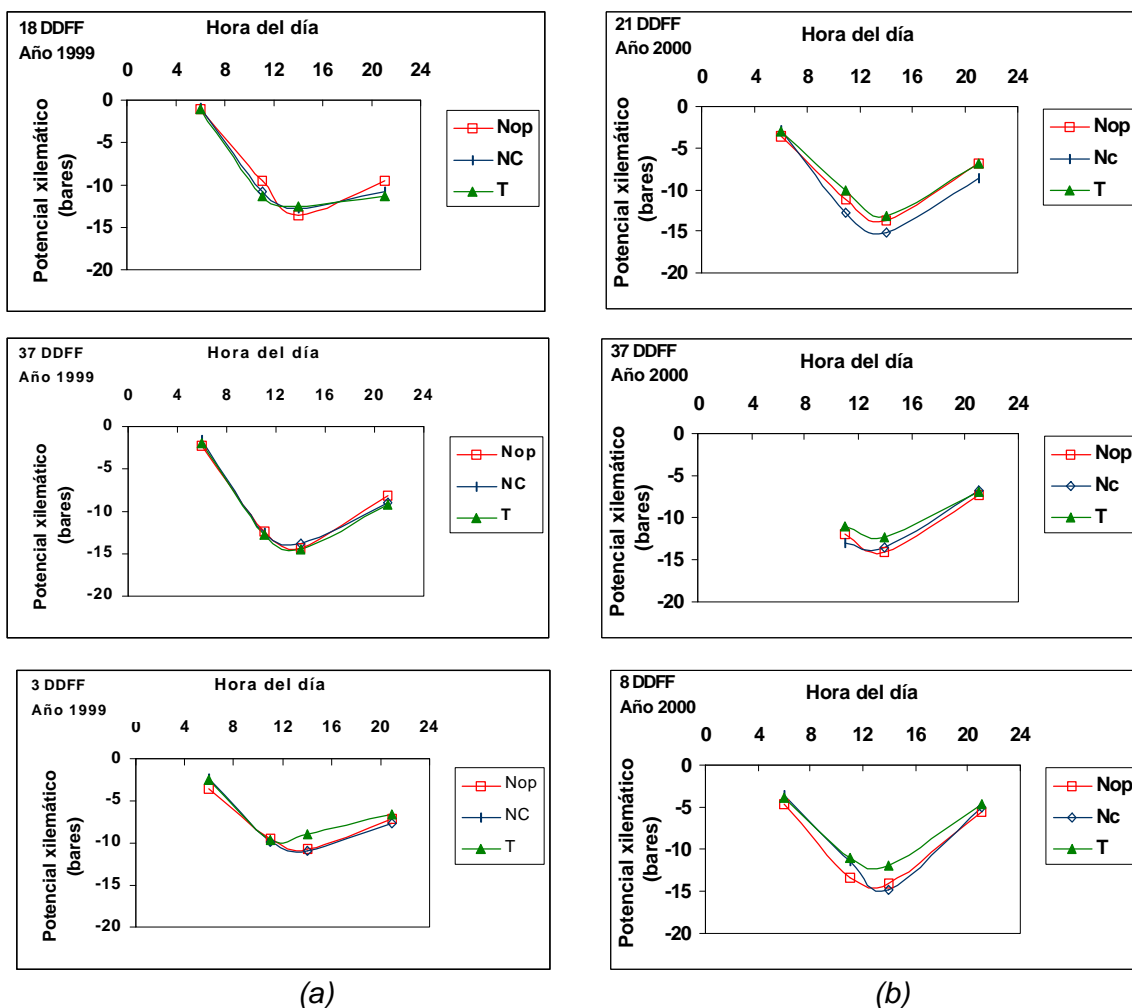
Para el primer año de ensayo (1999), no se encontraron diferencias entre los tratamientos en la evolución del potencial xilemático a lo largo del período de mediciones, debido a que la disponibilidad hídrica fue la misma para todos los tratamientos y a que no se lograron diferencias importantes en la disponibilidad de N. Sólo el día 3 DFF, para la medición de las 14 h, el tratamiento T presentó un potencial xilemático mas alto (menos negativo) que los restantes (Fig. 100), pero con una diferencia pequeña en valor absoluto.

Para el año 2000 (Fig. 100b), la tendencia general encontrada fue que el tratamiento T, tanto en las mediciones de las 11 como de las 14 hs, mostró un mayor potencial xilemático, seguido por el tratamiento Nop. NC fue el tratamiento que mostró un potencial más negativo. Esta tendencia es debida a que todos los tratamientos estuvieron sometidos a la misma programación de riego, si bien la producción de MST y rendimiento en grano fue menor para T (Epígrafes 4.2.1.2 y 4.2.1.11), hecho que determinó que el estado hídrico de la planta, medido a través del potencial xilemático fuera mejor, ya que tuvo mayor disponibilidad hídrica por unidad de producción, ya sea de MST o de rendimiento en grano. En el segundo año de ensayo, sólo se realizaron las mediciones de las 6 hs, los días 8 y 21 posteriores a R1, como únicos momentos de control, ya que los resultados del primer año de experimentación no presentaron diferencias entre tratamientos para esta hora de toma de datos. Las diferencias encontradas entre tratamientos, como respuesta a una disponibilidad hídrica no limitante, e igual para todos, son pequeñas, por lo que se puede concluir que los diferentes niveles de fertilización nitrogenada no tuvieron ningún efecto en el estado hídrico de la planta, en los momentos de medición que se presentan en la Figura n° 100.

En síntesis, los diferentes niveles de N no afectaron al potencial xilemático de la planta, a pesar de que el inicio de la senescencia fue mas temprano en el año

2000 para el tratamiento T; la duración del área foliar fue 89 y 114 días menor para este tratamiento con respecto a Nop y NC, respectivamente (Epígrafe 4.2.1.4a). Debido a esta menor duración del área foliar, era de esperar que, conjuntamente con el avance en el ciclo ontogénico más precoz en T, disminuyera la intensidad de los procesos fisiológicos, entre ellos la fotosíntesis y transpiración, resultando en potenciales xilemáticos más bajos. La disponibilidad hídrica para los dos años fue alta durante todo el ciclo del cultivo, y este hecho tuvo mayor influencia sobre el estado hídrico del cultivo en el tratamiento T, que sobre el momento del inicio de la senescencia.

Figura 100. Evolución diaria del potencial xilemático (bares) para diferentes días posteriores a la floración femenina.



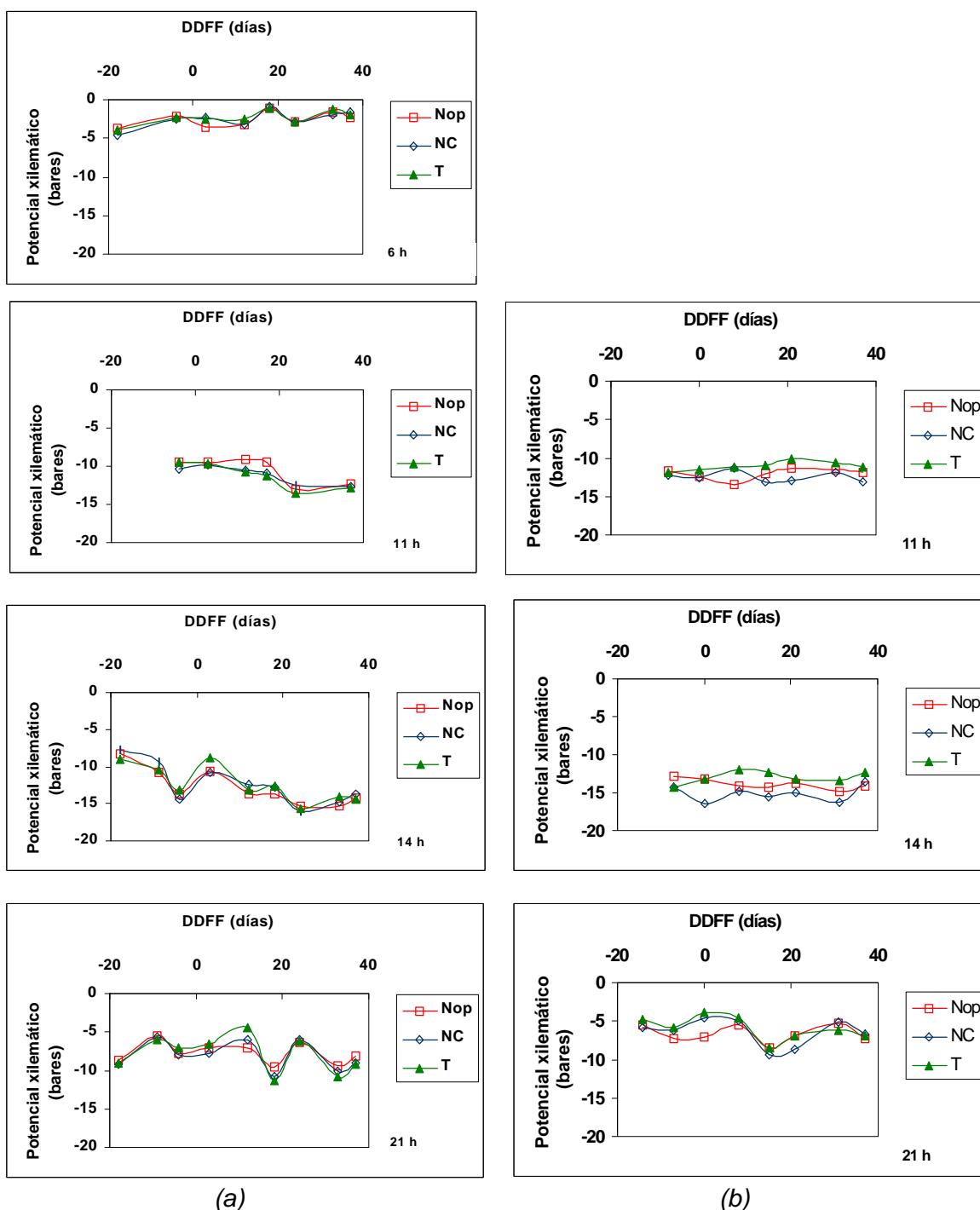
NOTA: la hora del día es UGTM + 2.

DDFF= días desde la floración femenina; Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

En la Figura n° 101, se presenta la evolución del potencial xilemático para todos los tratamientos y los dos años de medición, con el objetivo de ilustrar lo expresado en el párrafo anterior.

La tendencia encontrada fue a una disminución en la evolución del potencial xilemático con el tiempo, desde R1, aunque como se presenta en la Figura n° 101, esta tendencia es mucho más suave que la encontrada en el ambiente I, y fundamentalmente más suave con respecto a los tratamientos de secano (Epígrafe 4.1.2.5).

Figura 101. Evolución del potencial xilemático durante el período de mediciones para cada tratamiento. (a) año 1999, (b) año 2000.



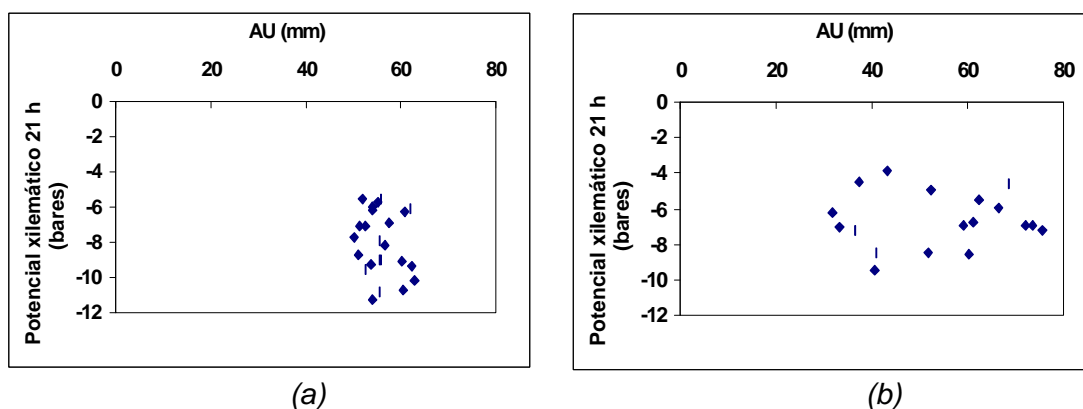
NOTA: la hora del día es UGTM + 2.

DDFF= días desde la floración femenina; Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

Debido a que, como se expresara para el ambiente I, es más simple medir y predecir el estado hídrico del suelo que el del cultivo a nivel de campo, y a que, la relación compleja entre el potencial xilemático y los diferentes procesos fisiológicos en la planta conducen a utilizar el estado hídrico del suelo en numerosos modelos de simulación para predecir el crecimiento de la parte aérea (Ludlow 1987), se trató de

relacionar el potencial xilemático con el contenido de agua útil del suelo (AU) para las diferentes fechas de medición. El escaso desarrollo edáfico en este ambiente (Albacete, España), determina que, en condiciones de riego, y cuando el consumo hídrico no es limitado, no exista relación entre el contenido hídrico del suelo y el potencial xilemático (Fig. 102). El escaso desarrollo del suelo determina que, ante un pequeño cambio en el contenido de agua útil, se instale un déficit hídrico marcado; por lo que, un método de conducción del riego utilizando un balance hídrico edáfico no sería el más adecuado para estas condiciones.

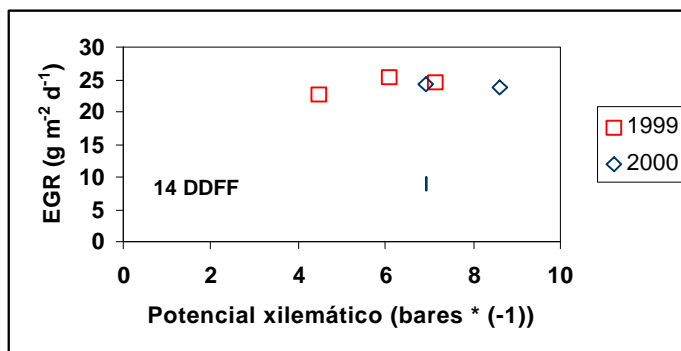
Figura 102. Relación entre el potencial xilemático (bares), a las 21 h y el contenido de agua útil edáfico (AU, mm) para todos los tratamientos. (a) 1999, (b) 2000.



De forma análoga al análisis realizado en el ambiente I (Pergamino, Argentina), se presenta en la Figura nº 103, la relación entre la tasa de crecimiento de la espiga y el potencial xilemático. Se observó que, aunque existió una reducción en la tasa de crecimiento de la espiga (tratamiento T; año 2000), los niveles de potencial xilemático mostraron baja sensibilidad ante estas variaciones, por lo que, la reducción de EGR para el año 2000 no tuvo relación con el estado hídrico de la planta, cuantificado indirectamente por el potencial xilemático.

Con valores de EGR inferiores a los $20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Epígrafe 4.2.1.11, Fig. 93), existieron reducciones importantes en el NG m^{-2} , principal componente del rendimiento. En efecto, los diferentes niveles nitrogenados, que resultaron en diferentes niveles de producción tanto de MST como de grano en el año 2000, no mostraron tener efecto sobre el estado hídrico del cultivo.

Figura 103. Relación entre la tasa de crecimiento de la espiga (EGR, $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y el potencial xilemático (bares * -1), medido a las 21 h.

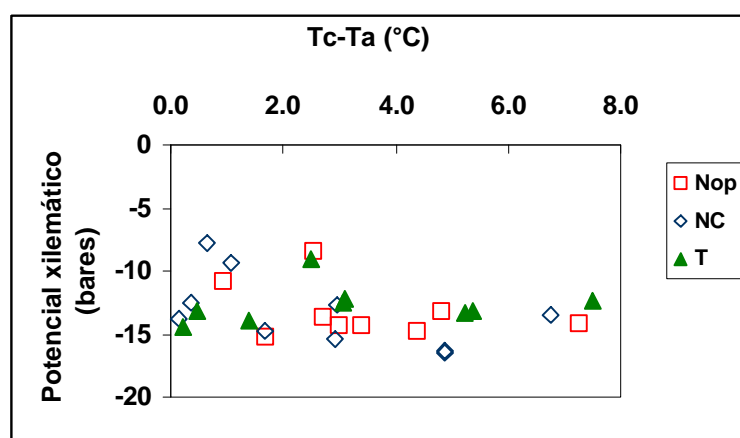


DDFF= días desde la floración femenina

4.2.2.6 Relación entre el potencial xilemático y la temperatura de canopeo

Para este ambiente, no se encontró relación entre la diferencia de temperatura del cultivo y la del aire y el potencial xilemático, medidos a las 14 h, ya que este momento no es el mejor del día para el monitoreo del estrés hídrico mediante la medición del potencial xilemático (Fig. 104). Se puede inferir que, el riego no fue deficitario para ninguno de los tratamientos, y que, los niveles nitrogenados no afectaron el estado hídrico de la planta, no creándose gradientes en el estado hídrico como consecuencia de la diferente nutrición nitrogenada recibida por cada tratamiento.

Figura 104. Relación entre el potencial xilemático en función de la diferencia entre la temperatura foliar- temperatura media del aire ($T_c - T_a$, °C), medidos a las 14 h, para todos los tratamientos y los dos ciclos agrícolas.



Nop= nitrógeno optimizado; NC= nitrógeno convencional; T= testigo

Debido a la simplicidad y rapidez de las mediciones de temperatura foliar, se podría pensar en esta medición como un dato de apoyo para la programación de riego utilizada, junto con el balance de agua simplificado (Epígrafe 4.2.2.1), para realizar un riego deficitario en las etapas tempranas de desarrollo del cultivo. A partir de estas mediciones y como se expresara para el ambiente I, es factible ajustar la metodología de cálculo del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) (Idso *et al.*, 1981a) para este ambiente. En zonas áridas, como es este ambiente, la temperatura del cultivo puede estar 10 °C por debajo de la temperatura del aire, y tener un rango quizá de hasta 15 °C. Es en estas zonas áridas donde las prácticas de conducción de riego mediante la utilización de la temperatura infrarroja puede funcionar mejor, sin descartar su uso durante períodos secos en zonas húmedas (Jackson *et al.*, 1977). Debido a la característica excluyente de regadío de esta zona para cultivos de verano, se podría pensar en ajustar esta metodología a gran escala, mediante la utilización de sensores remotos, ya que la evapotranspiración de un cultivo puede ser calculada con la utilización de la temperatura del canopeo. Jackson *et al.*, 1977, encuentran la siguiente relación empírica:

$$ET = R_n - 0.064 (T_c - T_a) \quad (2)$$

donde, ET (evapotranspiración, cm d^{-1}) es calculada para períodos semanales o de mayor extensión, R_n = radiación neta, T_c : temperatura del cultivo (°C), T_a : temperatura del aire (°C).

La radiación neta puede ser estimada a partir de la radiación solar incidente y el albedo, las temperaturas del aire pueden ser determinadas en el suelo, y la temperatura del cultivo (T_c), puede ser medida mediante el uso de sensores remotos, permitiendo la evaluación de la eficiencia en el uso del agua por los cultivos en grandes áreas.

4.2.3 Efecto del nitrógeno sobre el funcionamiento del cultivo

Para el estudio de los diferentes componentes del balance de nitrógeno, al igual que para el ambiente I, se utilizó la relación simplificada recogida en la expresión (9) del Epígrafe 3.1.8.3.

Las pérdidas por lixiviación no fueron medidas para este ambiente, razón por la cual, tampoco es el objetivo llegar a realizar el balance, sino estudiar las modificaciones ocurridas, como consecuencia de los distintos manejos de la fertilización nitrogenada, en los distintos parámetros que intervienen en el balance nitrogenado y que han sido medidos.

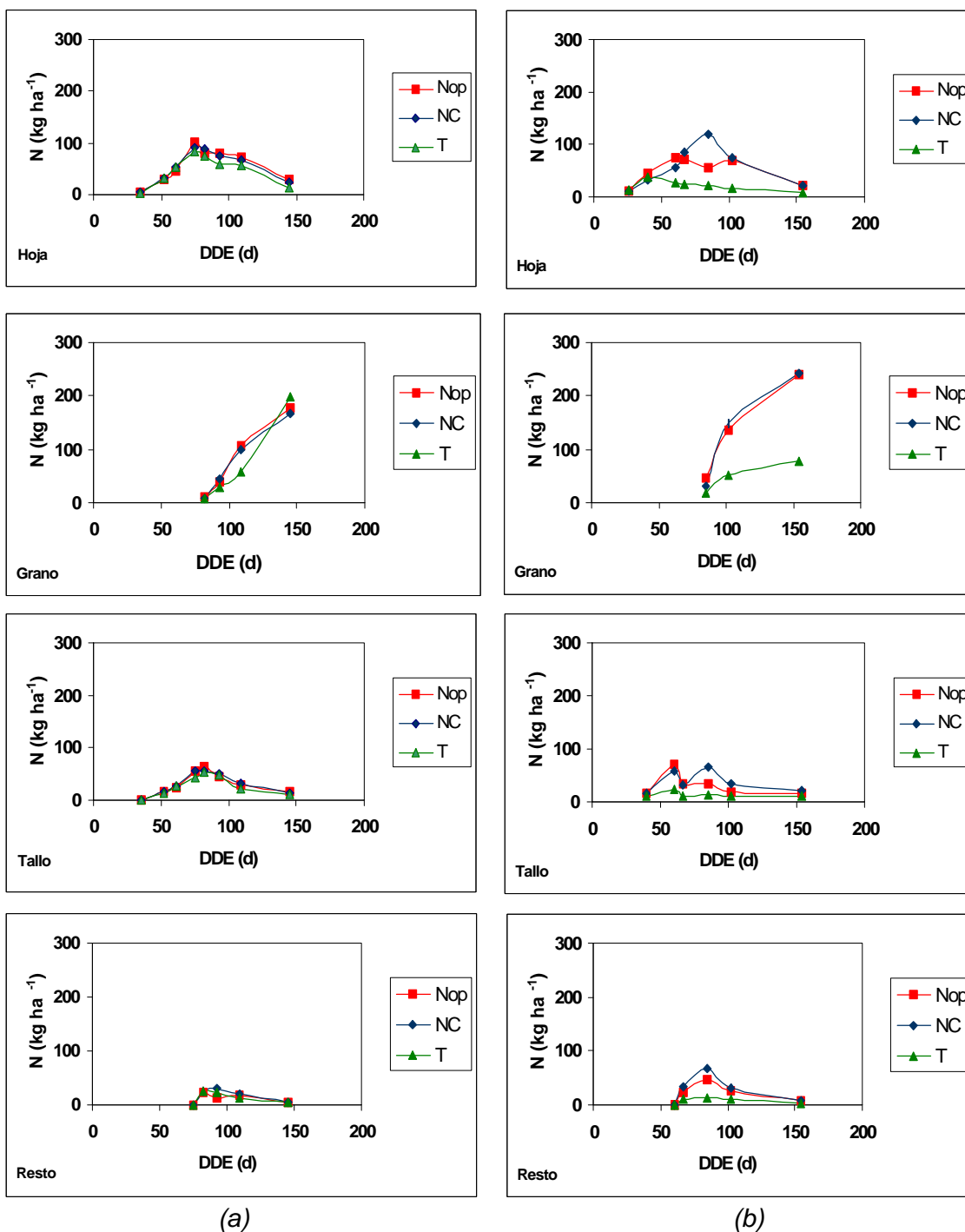
4.2.3.1 Caracterización de los componentes del balance nitrogenado

a) Repartición de N entre diferentes órganos aéreos

El contenido de N de los órganos aéreos de los cultivos anuales alcanza un máximo antes de la madurez fisiológica, seguido por una progresiva disminución (Wetslaar y Farquhar, 1980). Estas pérdidas ocurren, normalmente, después de anthesis y son generalmente mayores cuanto más elevados son los contenidos de N edáficos. En este ambiente, las determinaciones de N se realizaron para hoja, tallo + vainas foliares, grano y resto (zuro+ panícula+ brácteas) (Fig. 105).

Para el año 1999, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos (Tuckey, $\alpha= 0.05$) en la absorción de N. En general, se observaron menores valores de acumulación de N en grano y resto para este año, con respecto al 2000. Los resultados del análisis de varianza se presentan en la Tabla nº 29, Anejo 2. En el ciclo agrícola 2000, los análisis estadísticos mostraron diferencias significativas en la absorción de N por los órganos aéreos a partir de la floración (Vt-R1). Para este momento, la diferencia en el contenido de N se midió únicamente para el tallo. En la determinación del 03/08 (67 DDE), existieron diferencias, estadísticamente significativas, en el contenido de N en todos los órganos medidos. Las diferencias se midieron entre el tratamiento T y los fertilizados, con valores promedios en el contenido de N de 70, 68 y 64 % menores para hoja, tallo y resto, respectivamente. Entre los tratamientos Nop y NC no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. En los siguientes muestreos, también, se midieron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. El 21/08 (85 DDE, R3), las diferencias en el contenido de N en el tallo y el resto se observaron entre el tratamiento T y los fertilizados, no habiendo diferencias entre éstos últimos. Para grano, la diferencia se manifestó entre el tratamiento NC y los dos restantes, mientras que, para hoja, la diferencia fue entre T y NC, no encontrándose diferencias entre Nop y los dos restantes. Para los últimos dos muestreos (R4 y R6), la acumulación de N en grano, resto y en hoja muestra una diferencia estadísticamente significativa entre T y los tratamientos fertilizados. El contenido de N en tallo siempre fue mayor en el tratamiento NC, tanto en R4 como en R6.

Figura 105. Evolución del nitrógeno absorbido por los distintos órganos aéreos (N, kg ha^{-1}) en función de los días transcurridos desde emergencia (DDE). (a) 1999, (b) 2000.



Nop= nitrógeno optimizado; NC= N convencional; T= testigo

El híbrido utilizado en este ambiente también se puede considerar de alta fertilidad, ya que absorbe el 50 ± 2.56 % del nitrógeno posteriormente a la floración (Dow Chemical Company, 1989).

En el año 1999, a partir de la floración, comienza la removilización para todos los tratamientos, sin existir diferencias ni en el momento, ni en la magnitud de la

misma (Fig. 105a). La cantidad de N removilizado desde hojas fue el mismo para todos los tratamientos, con un valor de 66 kg N ha⁻¹. Sin embargo, es en el año 2000 (Fig. 105b), cuando se manifiesta la deficiencia nitrogenada, y se midieron diferencias, tanto en el momento del comienzo de la removilización, como en la magnitud de la misma. Para los tres niveles nitrogenados, siempre fue más importante la removilización a partir de la hoja con respecto a la producida desde el tallo. En el tratamiento Nop, la removilización se verifica a partir del día 60 DE del cultivo, tanto para hoja como para tallo. En este tratamiento, la removilización representó un 17 (41.3 kg) y 12 % (29.5 kg) del N del grano, translocados a partir de las hojas y los tallos, respectivamente. Para el tratamiento NC, la removilización se produjo a partir del día 85 DE, probablemente por la alta disponibilidad de N en suelo y la capacidad del híbrido utilizado de absorber N después de la floración. En este tratamiento, fue mayor la cantidad removilizada a partir de las hojas (99 kg N), representando un 41 % del N en grano, mientras que, a partir del tallo, fueron transferidos 18 kg N, lo que representa un 7 % del N en grano. Swank *et al.* (1982) encuentran que, para algunos híbridos, más de las 2/3 partes del N presente en la espiga fue removilizado a partir de los órganos vegetativos, mientras que para otros, la mitad del N en espiga tiene origen en la removilización. También encuentran diferencias entre años en la removilización, para un mismo híbrido, debidas a condiciones de manejo y a la presencia de un estrés hídrico.

El tratamiento T fue el que primero comenzó la removilización a partir de las hojas (40 DDE), totalizando 25 kg de N removilizados, es decir un 31 % de N en grano. El tallo aportó un 22 % del total del N en grano. Ante la instalación de un déficit nitrogenado, este híbrido adelanta la translocación de N a partir de las hojas, lo que consecuentemente, adelanta la senescencia, mientras que, en condiciones de alta disponibilidad del nutriente, la removilización se retrasa de forma importante. Un objetivo en el mejoramiento genético para incrementar la eficiencia en el uso del nitrógeno, sería lograr un material que, ante condiciones de déficit nitrogenado, tuviera la capacidad de adelantar la translocación a partir de tallo, de tal forma que no afectara la capacidad fotosintética del cultivo. Existen fuertes diferencias genotípicas en cuanto a la capacidad de translocación de N, en interacción con el medio, que explican la variación en los valores de este parámetro hallados en la bibliografía (Beauchamp *et al.*, 1976; Swank *et al.*, 1982).

Existen teorías que atribuyen la disminución en el contenido de N en los órganos vegetativos a la exudación de este elemento a través de las raíces vivas, pero, en pequeñas cantidades (Daigger *et al.*, 1975; Wetselaar y Farquhar, 1980; Martin, 1987). En trigo, se midieron pérdidas postantesis del orden de los 25 a 80 kg N ha⁻¹ (Daigger *et al.*, 1976), 5.9 a 7.4 kg N ha⁻¹ (Harper *et al.*, 1987) y de 14.9 a 76.9 kg N ha⁻¹ (Papakosta y Gagianas, 1991), atribuidas a la volatilización del N a partir de la biomasa aérea. En general, en la bibliografía, las pérdidas de N a partir de órganos vegetativos en los balances de N, no han sido consideradas. Es por esta razón, que en el presente trabajo, y para los dos ambientes estudiados, se habla de una removilización aparente de N, ya que este proceso no fue estudiado con marcadores, ni se midieron este tipo de pérdidas, por lo que los valores de removilización están posiblemente sobrestimados.

Para el cultivo de maíz, Francis *et al.* (1993), en un estudio con N marcado, encuentran pérdidas de N postantesis a partir de la materia seca aérea, del 10 al 20 %, del fertilizante aplicado, lo que representó entre 45 a 81 kg N ha⁻¹. Aunque no fueron medidas directamente, las pérdidas de NH₃ por volatilización aparecen como la principal causa de pérdidas del fertilizante aplicado en el ambiente estudiado. Estas pérdidas representan entre el 52 a 73 % de las pérdidas no medidas en los

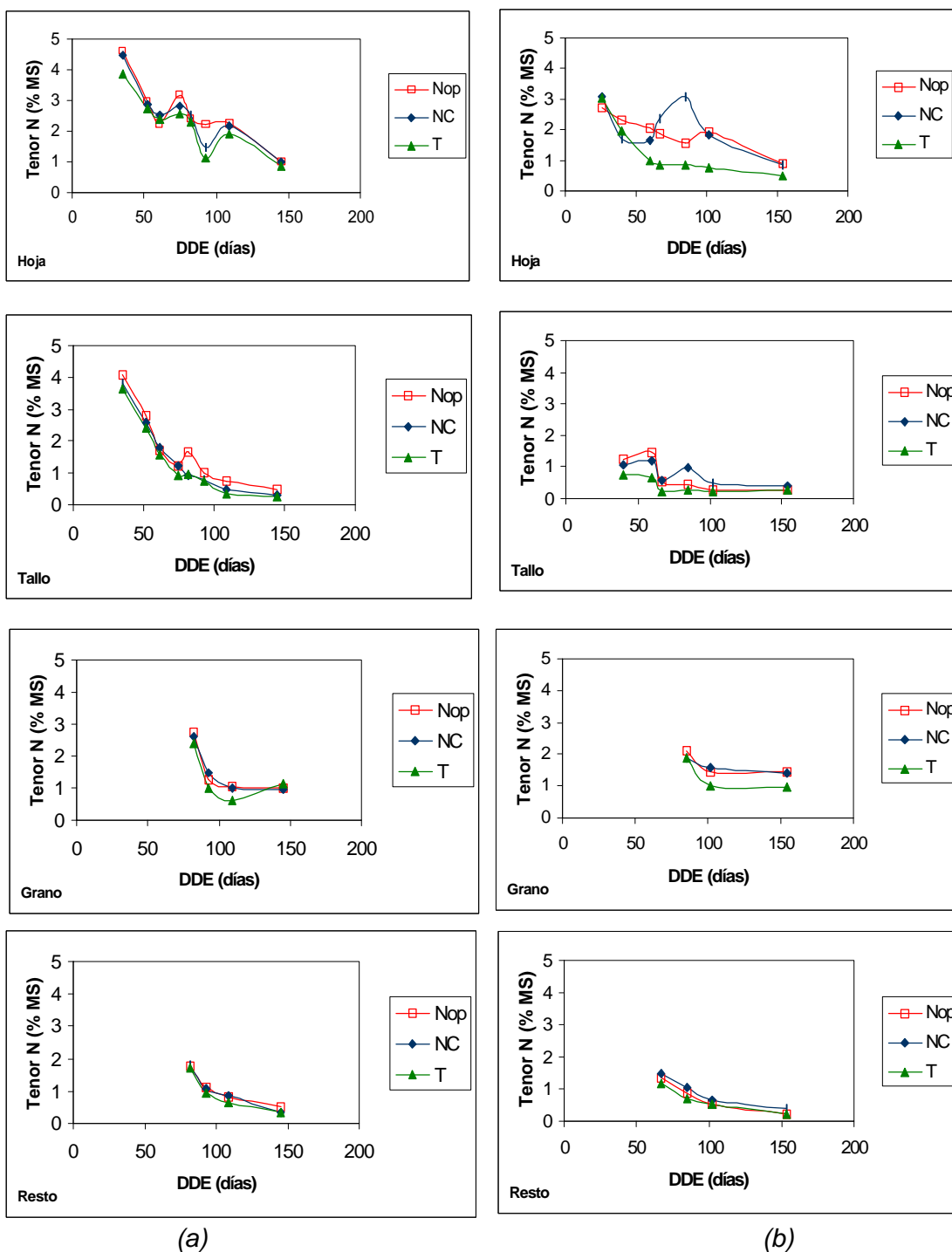
balances de N, y pueden llevar a sobrestimar las pérdidas por lixiviación y desnitrificación.

Los contenidos iniciales de N en el año 2000 fueron menores que en 1999, para todos los órganos analizados (Fig. 106). El valor final fue menor para las hojas en el 2000, indicando que el aporte de N por la materia seca del residuo del cultivo antecesor es un componente de gran importancia a tener en cuenta en el balance, ya que será menor para el año siguiente. Para el resto de los órganos analizados, se midieron valores finales similares para los dos años.

En el ciclo 1999, la evolución fue similar para todos los tratamientos y órganos analizados, no existiendo diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. Los mayores contenidos de N se encontraron en las hojas, y, en orden decreciente, en tallo, grano y resto. La disminución en el contenido en las hojas pasa, en valor promedio para todos los tratamientos, de 4.31 a 3.17 %, mas de un punto de diferencia en los 40 días que van desde V5 a Vt. En este mismo período, el tallo disminuye su contenido en N de 3.85 a 1.13 %. La disminución en resto es menos marcada y lenta, y ocurre después de Vt. En los granos, la evolución en el contenidos de N muestra la misma tendencia encontrada en el ambiente I (Pergamino, Argentina), y, también en la bibliografía (Plénet, 1995), ya que se produjo una rápida disminución en los 20-30 días posteriores a la floración, para luego estabilizarse.

Para el ciclo 2000, las dosis de N aplicadas permitieron crear niveles de alimentación nitrogenada diferentes. Los valores para las hojas disminuyen entre V6 y Vt (34 días) de 2.96, de valor promedio para los tres tratamientos, hasta 1.86 de promedio para Nop y NC; y 0.97, para T. Las diferencias entre los tratamientos fertilizados y no fertilizado se manifiestan a partir de Vt. A partir de esta fecha, las diferencias fueron estadísticamente significativas para las hojas. Para tallo esas diferencias significativas ocurren a partir de los 85 DDE, y para grano, a partir de R4 (Tabla 30, Anejo 2). La evolución encontrada en el grano es la misma que para el ciclo 99, aunque este año los tratamientos fertilizados se estabilizan en un valor superior al del año 1999. El tratamiento NC presenta un pico en el contenido de N en R4. Para el resto, no se encuentran diferencias en ninguno de los dos años, siendo, en todos los casos, los órganos analizados con menor contenido de N.

Figura 106. Evolución del contenido de N Kjeldahl (N, % MST) en los diferentes órganos aéreos de las plantas de maíz, en función de los días desde emergencia (DDE). (a) 1999, (b) 2000.

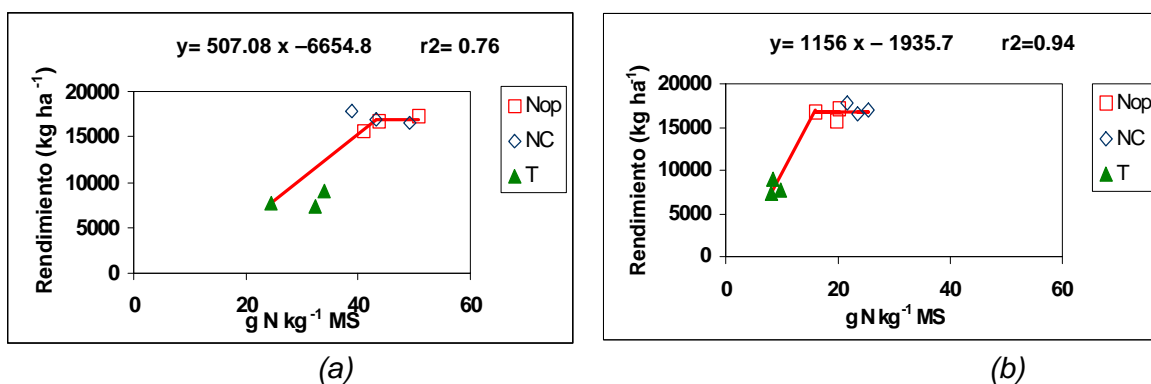


Nop= nitrógeno optimizado; NC= N convencional; T= testigo

La concentración de N en las hojas, los tallos o los granos es una referencia de diagnóstico para la fertilización. En el año 2000, se encontró que una concentración de N foliar superior a $40 \text{ g N kg}^{-1} \text{ MS}$, 15 días antes de Vt, no produjo incrementos en el rendimiento (Fig. 107a). Este parámetro explica, en este momento fenológico, un 76 % del rendimiento. El valor de la concentración “crítica” de N foliar, en este momento, es superior al hallado en la bibliografía. La misma relación medida

7 días posteriores a Vt explicó, en un 94 %, el rendimiento. En este momento, con concentraciones foliares superiores a $16 \text{ g N kg}^{-1} \text{ MS}$, medidos para dosis de fertilización N de 150 kg N ha^{-1} , no se obtuvieron incrementos en los rendimientos (Fig. 107b). Esta relación muestra, una vez más, que, para este ambiente, no se encuentra respuesta a la aplicación de dosis superiores a 150 kg N ha^{-1} . En el ambiente I, existió una menor relación entre ambos parámetros. Coincidentemente con los resultados del ambiente I, este parámetro medido en postfloración explica en un mayor nivel el rendimiento. Los umbrales hallados para la concentración de N foliar, por debajo del cual el rendimiento cae, fueron menores que los hallados en la bibliografía para Balcarce (Argentina), de 28 y 22 $\text{g N kg}^{-1} \text{ MS}$, en el estado de V6 y 15 días previos a la floración (Uarth y Andrade, 1995b), y, también, menores con respecto a los hallados para el ambiente I, donde la disminución de rendimiento se da a partir de valores de 31 y 28 $\text{g N kg}^{-1} \text{ MS}$ en la concentración de N foliar, en Vt y 13 DDF, respectivamente.

Figura 107. Relación entre el rendimiento (kg ha^{-1}) y la concentración de N foliar ($\text{g N kg}^{-1} \text{ MS}$). (a) 15 días antes de Vt, y (b) 7 días posteriores a Vt, en el ciclo agrícola 2000.



Nop= nitrógeno optimizado; NC= N convencional; T= testigo. R^2 = coeficiente de determinación.

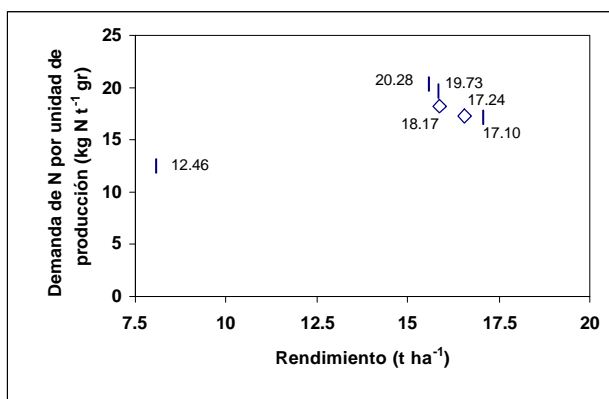
En la Figura n° 108, se presenta la relación que existió entre la cantidad de N absorbido por unidad de producción de grano, y el rendimiento. Debido a que, a partir del segundo año de ensayo se instala una deficiencia nitrogenada, existe solo un punto, correspondiente al rendimiento del tratamiento T (8082 kg ha^{-1}), que presenta un valor bajo de absorción, de $12.46 \text{ kg N t}^{-1} \text{ g}$. Los restantes tratamientos, incluso el T en el ciclo 1999, mostraron que con una absorción superior a los $18.50 \text{ kg N t}^{-1} \text{ g}$, no se produce incremento en los rendimientos.

Para el ambiente I, esta relación muestra una tendencia a alcanzar un techo en el requerimiento de N para la producción de grano, encontrándose el mismo alrededor de $19.60 \text{ kg N t}^{-1} \text{ gr}$. Para este ambiente, ese valor se ubica, aproximadamente, en los $18.50 \text{ kg N t}^{-1} \text{ gr}$.

De acuerdo a este valor medio de absorción, y considerando un rendimiento objetivo de 15 t ha^{-1} , para este ambiente, una tasa de mineralización media de 60 kg N ha^{-1} durante el ciclo del cultivo de maíz, un contenido medio de N mineral en la siembra de 60 kg N ha^{-1} , y un aporte de 33 kg N ha^{-1} por el agua de riego, y de acuerdo a las dosis media aplicadas en la zona, se puede inferir que: si el requerimiento en N para producir $15 \text{ t ha}^{-1} \text{ gr}$ es de 278 kg N ha^{-1} , restando el aporte de N por mineralización de 60 kg N ha^{-1} , el contenido medio de N mineral a la siembra de 60 kg N ha^{-1} y el aporte de N por el agua de riego de 33 kg N ha^{-1} la

dosis media, para este ambiente, para conseguir ese rendimiento objetivo es de $125 \pm 9.68 \text{ kg N ha}^{-1}$.

Figura 108. Demanda de N por unidad de producción para los dos ciclos agrícolas y todos los tratamientos.



b) Contenido de N-NO_3^- y N-NH_4^+ edáfico en la siembra y en la cosecha.

Los valores iniciales de N-NO_3^- y N-NH_4^+ edáfico en la siembra, son anteriores a la aplicación del fertilizante nitrogenado. Para el ciclo 1999, el contenido de N inicial fue similar para los tres tratamientos (Tabla 60), y es una de las causas que explican el alto rendimiento obtenido en el tratamiento T en ese ciclo. Existen numerosos trabajos que han mostrado una alta correlación entre el rendimiento en grano del cultivo de maíz y las concentraciones de N-NO_3^- en los 0.30 m superficiales del suelo, cuando las plantas de maíz tienen de 0.15 a 0.30 cm de altura. Esta correlación es ampliamente usada en Connecticut, Iowa, Pennsylvania y Vermont (Blackmer *et al.*, 1989; Fox *et al.*, 1989).

En la Tabla n° 60, se presenta el valor en kg ha^{-1} de N-NO_3^- y N-NH_4^+ en la siembra y en la cosecha para todos los tratamientos y los dos ciclos de experimentación. Para el ciclo 1999, los valores iniciales de N inorgánico son similares para los tres tratamientos, mientras que el contenido de N final se mantiene para el tratamientos Nop, aumenta en NC, y disminuye para T. En el año 2000, el contenido de N inorgánico inicial para Nop es mayor que el final del 1999, en 6 kg N ha^{-1} ; para NC, existió una pérdida de 28 kg N ha^{-1} , mientras que, en el tratamiento T, también existe una disminución de alrededor de 7 kg N ha^{-1} . Se pudo observar como el contenido final en este año disminuyó en 30 kg N ha^{-1} , en el tratamiento Nop, con lo que se podría pensar que en el siguiente año será necesario aumentar la dosis de fertilización nitrogenada. En el tratamiento NC, el valor sigue siendo elevado, lo que representa un riesgo de lixiviación de una parte de ese "pool" de N en el período intercultivo, mientras que, para el tratamiento T, el valor sigue descendiendo, indicando la baja capacidad nutritiva de estos suelos.

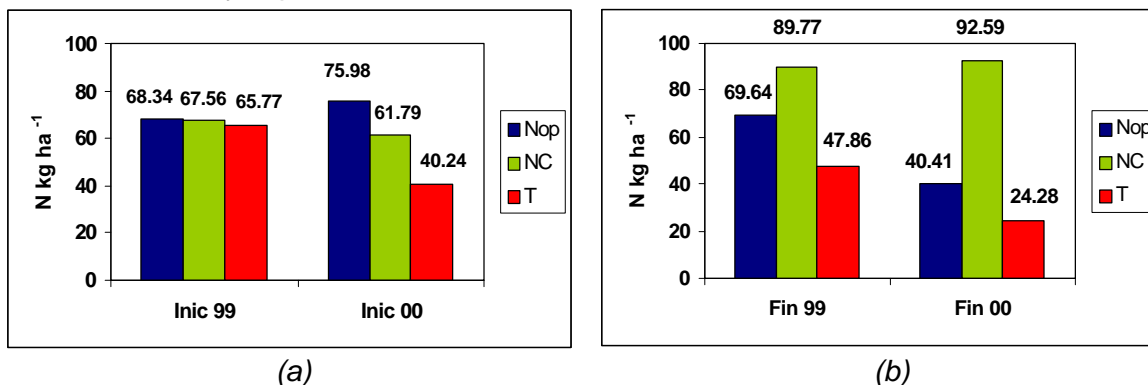
Tabla 60. Contenido de N-NO_3^- (kg ha^{-1}) y N-NH_4^+ (kg ha^{-1}) iniciales y finales, para la profundidad edáfica de balance, y todos los tratamientos.

Ciclo 1999 Inicial: 28-04-1999					
Horizonte	Profundidad	Tratamiento	N-NO_3^- (kg ha^{-1})	N-NH_4^+ (kg ha^{-1})	Total
Ap + Bk	0-50	Nop	62.31	6.03	68.34
		NC	62.98	4.58	67.56
		T	58.63	7.15	65.77
Ciclo 1999- Final: 30-09-1999					
Horizonte	Profundidad	Tratamiento	N-NO_3^- (kg ha^{-1})	N-NH_4^+ (kg ha^{-1})	Total
Ap + Bk	0-50	Nop	48.76	20.88	69.64
		NC	64.31	25.46	89.77
		T	25.30	22.56	47.86
Ciclo 2000 Inicial: 16-05-2000					
Horizonte	Profundidad	Tratamiento	N-NO_3^- (kg ha^{-1})	N-NH_4^+ (kg ha^{-1})	Total
Ap + Bk	0-50	Nop	66.53	9.45	75.98
		NC	50.29	11.50	61.79
		T	27.70	12.54	40.24
Ciclo 2000 Final: 20-10-2000					
Horizonte	Profundidad	Tratamiento	N-NO_3^- (kg ha^{-1})	N-NH_4^+ (kg ha^{-1})	Total
Ap + Bk	0-50	Nop	31.78	8.62	40.41
		NC	82.87	9.72	92.59
		T	15.48	8.80	24.28

Nop= nitrógeno optimizado; NC= N convencional; T= testigo. R^2 = coeficiente de determinación.

La cantidad de N residual en la cosecha, se presenta en la Figura n° 109. Las cantidades de N residual son bajas (24 a 40 kgN ha^{-1}), cuando la dosis de fertilizante es igual o inferior a la óptima. Cuando la dosis es superior, la cantidad de N residual aumenta de forma importante. La totalidad de este N mineral residual no está expuesto a la lixiviación, ya que parte puede ser reorganizado por la biomasa microbiana (Plénet, 1995). Estas mediciones permiten conocer los riesgos potenciales de contaminación de aguas subterráneas por nitratos.

Figura 109. Contenidos (a) inicial y (b) final de N total mineral (N , kg ha^{-1}), en todos los tratamientos y la profundidad de 0-0.50 m.



Nop= nitrógeno optimizado; NC= N convencional; T= testigo. R^2 = coeficiente de determinación. N= nitrógeno total mineral; Inic= inicial; Fin= final; 99= ciclo 1999; 00 = ciclo 2000

A pesar de que, en el tratamiento NC, la dosis de N aplicada fue fraccionada, el N residual presente en la recolección fue de una magnitud importante. Resultados de investigaciones sobre el efecto del fraccionamiento de la dosis N en la cantidad del N residual encuentran que, para las dosis óptimas o inferiores a la óptima, el

fraccionamiento conduce a cantidades de N residual idénticas a aquellas encontradas en el método tradicional de aporte. Cuando la dosis es superior a la óptima, el fraccionamiento parece aumentar el N residual. El interés del fraccionamiento para disminuir el riesgo de contaminación, está, entonces, en función de la utilización de un método de diagnóstico del estado de nutrición nitrogenada del cultivo que permita decidir la utilidad de un aporte complementario (Plénet *et al.*, 1990a).

Murillo *et al.*(1992) con aplicaciones de dosis de fertilizante nitrogenado de 400 y 130 kgN ha⁻¹, en el cultivo de maíz, encuentra valores de N-NO₃⁻ en la cosecha 1/3 menores para la menor dosis, sin haberse visto afectado el rendimiento. En el presente trabajo, y para el año 2000, el N-NO₃⁻ en la recolección, para el tratamiento Nop, fue un 56 % menor con respecto al tratamiento NC, no habiéndose medido diferencias en los rendimientos entre tratamientos.

c) Aporte de N con el agua de riego

El aporte de N con el agua de riego, de acuerdo a los volúmenes aplicados y a la concentración de NO₃⁻ del agua de riego para cada ciclo agrícola (Epígrafe 3.2.6.1), fue de 41 kg N ha⁻¹.

d) N mineralizado

El N mineralizado fue calculado utilizando la ecuación (1) del Epígrafe 4.1.3.1.

Al no contar con los valores de lixiviación para este ambiente, sólo pueden considerarse estos valores de mineralización como orientativos, fundamentalmente para el primer año de experimentación, donde la disponibilidad nitrogenada fue alta a pesar de no haber sido aplicado N en forma de fertilizante al sistema en el tratamiento T. Este valor tan alto de mineralización, en el primer año de ensayo, está indicando la importancia de tener en cuenta el cultivo antecesor en la previsión de la dosis de N a aplicar, en cuanto al volumen de residuos aportado, la relación C/N del mismo, y el manejo de la fertilización nitrogenada que se ha realizado.

El utilizar el tratamiento testigo 0 N, para el cálculo del N mineralizado implica asumir que la aplicación de N no afecta las ganancias, o las pérdidas de N, en los procesos de mineralización-inmovilización. La aplicación de fertilizante puede aumentar la disponibilidad de N desde otros “pools” de N del suelo y/o estimular el crecimiento de las raíces y la absorción de N (Rao *et al.*, 1991; Ma *et al.*, 1999).

En la Tabla n° 61, se presenta la cuantificación del N mineralizado, en ambos años de experimento, en la profundidad de 0 a 0.50 m.

Tabla 61. N mineralizado en los ciclos agrícolas 1999 y 2000.

Año	N (kg ha ⁻¹)	Nabs (kg ha ⁻¹)	N r (kg ha ⁻¹)	N min (kg ha ⁻¹)
1999	-17.91	228.72	-41	169.81
2000	-15.96	100.67	-41	43.04

N= N residual- N inicial; Nabs= N absorbido; Nr= N aportado con el agua de riego; Nmin= N mineralizado

Es importante considerar el cultivo precedente del primer año de experimentación, y la fertilización recibida, para explicar el valor elevado de mineralización en ese año. El cultivo antecesor de la parcela de experimentación fue *Papaver somniferum* L., el cual fue sembrado el 9 de abril de 1998, y recibió una dosis total de N correspondiente a 250 kgN ha^{-1} . La alta dosis de N, en función al requerimiento del cultivo, sumado a la baja relación C/N del rastrojo del mismo, son factores que favorecen la mineralización.

Smith *et al.* (1990) encuentran que la tasa de mineralización del N es altamente dependiente de la relación C/N del cultivo antecesor, siendo mayor cuando el cultivo antecesor era alfalfa y, en orden decreciente cacahuete, soja, avena, sorgo, trigo y en último lugar, para los residuos del cultivo de maíz. Este orden se correspondía con la relación C/N de los residuos de cada cultivo, siendo de 16 para la alfalfa y de 64 para el maíz. Este hecho está en relación con los resultados de mineralización, encontrados en el presente trabajo, en el año 1999 cuando el cultivo precedente fue la adormidera y para el año 2000, cuando el cultivo antecesor fue el maíz.

Como se expresó anteriormente, debido a que no fueron medidas las pérdidas por lixiviación, las que en el primer año de ensayo pueden haber sido considerables en la parcela testigo, estos valores se utilizarán sólo como orientativos. La eficiencia en el uso del N se estudiará mediante un análisis con un enfoque fisiológico, realizado en el siguiente epígrafe (Epígrafe 4.2.3.2).

En un experimento realizado en la zona del río Jarama (España) en el cultivo de maíz, utilizando una dosis de N equivalente a la utilizada en NC, y respetando la aplicación de riego que realizaban los agricultores de la zona, fue medido un drenaje correspondiente al 20 % del agua aplicada por riego (Díez *et al.*, 1994), y una lixiviación de N superior a los 250 kg N ha^{-1} (Cartagena *et al.*, 1995). Vallejo *et al.* (1996) en un ensayo realizado para evaluar la lixiviación de NO_3^- , encuentran valores de 120 kgN ha^{-1} en parcelas no fertilizadas y de 240 kgN ha^{-1} en las parcelas fertilizadas y conducidas con riego. Las pérdidas en el tratamiento optimizado son considerablemente menores que aquellas encontradas en el tratamiento de manejo convencional, entre 43 (parcelas no fertilizadas) y $165 \text{ (parcelas fertilizadas) kgN ha}^{-1}$.

4.2.3.2 Eficiencia en el uso del nitrógeno

El análisis realizado en el estudio de la eficiencia en el uso del nitrógeno es el que ha sido expuesto en el Epígrafe 4.1.3.3. La única diferencia, en este cálculo, fue que se consideró en el término N_p el N aportado con el agua de riego, debido a la magnitud del mismo en este ambiente.

En la Tabla n° 62, se presentan los valores de los diferentes parámetros que participan en el cálculo de las eficiencias en el uso del N. Los valores de N_p para el ciclo 1999, fueron muy superiores con respecto a los del ciclo 2000. La diferencia en el tratamiento T indica que, de los componentes que intervienen en el cálculo de N_p para este tratamiento (N_h y N_t), el de mayor peso en la diferencia en N_p entre los años de experimento, fue en N total presente en la MST aérea (N_t), hecho que deja en evidencia la alta tasa de mineralización que existió en el primer año de experimentación. Conjuntamente con la disminución en N_p y N_{disp} , para el año 2000, en T, existió una absorción de N menor en 128 kg N ha^{-1} .

Tabla 62. Parámetros que intervienen en el cálculo de las eficiencias en el uso del N.

Tratamiento	Rend gr (kg ha ⁻¹)	N disp (kg ha ⁻¹)	N gr (kg ha ⁻¹)	Np (kg ha ⁻¹)	Nr (kg ha ⁻¹)	Nh (kg ha ⁻¹)	Nf (kg ha ⁻¹)	Nt (kg ha ⁻¹)
Año 1999								
Nop	15568	295.52	177.24	492.58	68.34	69.64	175	225.88
NC	15872	301.82	167.81	617.58	67.56	89.77	300	212.05
T	15851	276.58	197.07	317.58	65.77	47.86	0	228.72
Año 2000								
Nop	16550	325.73	239.97	315.95	75.98	40.41	150	285.32
NC	17061	384.27	242.27	465.95	61.79	92.59	300	291.68
T	8082	124.95	79.20	165.95	40.24	24.28	0	100.67

Rend gr= rendimiento en grano; N disp= nitrógeno disponible; N gr= nitrógeno en grano; Np= nitrógeno provisto; Nr= Nitrógeno residual inorgánico previo al inicio del crecimiento del cultivo; N min= nitrógeno mineralizado; Nf= nitrógeno aportado con el fertilizante; Nh= nitrógeno inorgánico en la cosecha; Nt= nitrógeno en la materia seca aérea

Nop= nitrógeno optimizado; NC= N convencional; T= testigo. R²= coeficiente de determinación.

En la Tabla n° 63 se presentan los cálculos de las distintas EUN a partir de los valores presentados en la Tabla n° 62.

Tabla 63. Cálculo de las eficiencias en el uso del N para todos los tratamientos.

Tratamiento	Rend gr/ Np (kggr kg ⁻¹ N)	Ndisp/ Np	Rend gr/ Ndisp (kggr kg ⁻¹ N)	Nt/Ndisp	Rend gr/ Nt (kggr kg ⁻¹ N)	Ngr/Np	Ngr/ Ndisp	Ngr/Nt
Año 1999								
Nop	34.47	0.65	52.68	0.76	68.92	0.39	0.60	0.78
NC	27.53	0.52	52.59	0.70	74.85	0.29	0.56	0.79
T	57.31	1.00	57.31	0.83	69.30	0.71	0.71	0.86
Año 2000								
Nop	60.34	1.19	50.81	0.88	58.01	0.87	0.74	0.84
NC	40.21	0.91	44.40	0.76	58.49	0.57	0.63	0.83
T	65.03	1.00	64.68	0.81	80.28	0.64	0.63	0.79

Rend gr= rendimiento en grano; Ndisp.= nitrógeno disponible; Ngr= nitrógeno en grano; Np= nitrógeno provisto; Nr= Nitrógeno residual inorgánico previo al inicio del crecimiento del cultivo; Nmin= nitrógeno mineralizado; Nf= nitrógeno aportado con el fertilizante; Nh= nitrógeno inorgánico en la cosecha; Nt= nitrógeno en la materia seca aérea total.

Nop= nitrógeno optimizado; NC= N convencional; T= testigo. R²= coeficiente de determinación.

La EUNp (relación entre el rendimiento de grano y el N provisto por el suelo) (Tabla 63) presentó la mayor variabilidad para el primer año de ensayo, siendo el mayor valor para T, tanto en 1999 como en el año 2000. El tratamiento NC manifestó los menores valores para esta relación. La producción de gr por unidad de N disp (Tabla 63, EUNdisp) presentó el mayor valor para el tratamiento T en los dos ciclos agrícolas. En 1999, existió una menor variabilidad para este índice con respecto a los valores encontrados para la relación Rendimiento/Np para el mismo año, indicando que existió un valor alto de N disponible que no fue aplicado como fertilizante, y aportado por medio de la mineralización endógena. La eficiencia en la utilización del N (relación entre el rendimiento y el Nt; Tabla 63), mostró el mayor valor en el ciclo 1999 para NC, y en el 2000, para T, no existiendo diferencias, en este año, entre Nop y NC. En síntesis, la eficiencia en la producción de grano aumentó a medida que la disponibilidad de N fue menor. Este resultado no es coincidente con el hallado para el ambiente I, en el que las mayores eficiencias para estos tres índices (eficiencia en el uso del N provisto, disponible, y en la utilización del N total en planta), en condiciones hídricas no limitantes, (Prop) se midió para la dosis media de N (90 kgN ha⁻¹).

La relación N_{disp}/N_p o eficiencia en la disponibilidad de N (Tabla 63), en el ciclo 1999, presentó el mayor valor para el tratamiento T y el menor, para NC, probablemente debido a pérdidas de N por lixiviación. En el segundo año de ensayo, el valor superior a 1 para Nop se debe posiblemente a errores en el muestreo; mientras que el valor para NC aumenta con respecto al año 2000, debido al menor valor de N_r en este año. El tratamiento T mantiene la relación para los dos años de ensayo.

La relación entre N_{disp} y N_t , es decir, la eficiencia en la absorción del N disponible, (Tabla 63), presentó los menores valores para NC en los dos años de ensayo, indicando que la disponibilidad de N en ese tratamiento fue superior a la capacidad de absorción del cultivo, regulada por la demanda, en mayor medida que para Nop y T. En el segundo año de ensayo, se incrementa esta relación para los dos tratamientos fertilizados.

La acumulación de N en el grano, tanto de N_p como de N_{disp} (Tabla 63), fue mayor, en el año 1999, para el tratamiento T, indicando que la disponibilidad de N probablemente a partir de la mineralización, como se expresó anteriormente, fue la que logró las mayores eficiencias. Este hecho resalta la importancia de evaluar los principales términos del balance nitrogenado, en el momento de decidir la dosis de fertilizante a aplicar y, en particular, del N producido por la mineralización del humus, término difícil de cuantificar (Delphin, 1986). Para el segundo año de experimentación, cuando se manifiesta la deficiencia N, las mayores eficiencias en estos dos índices se midieron para el tratamiento Nop.

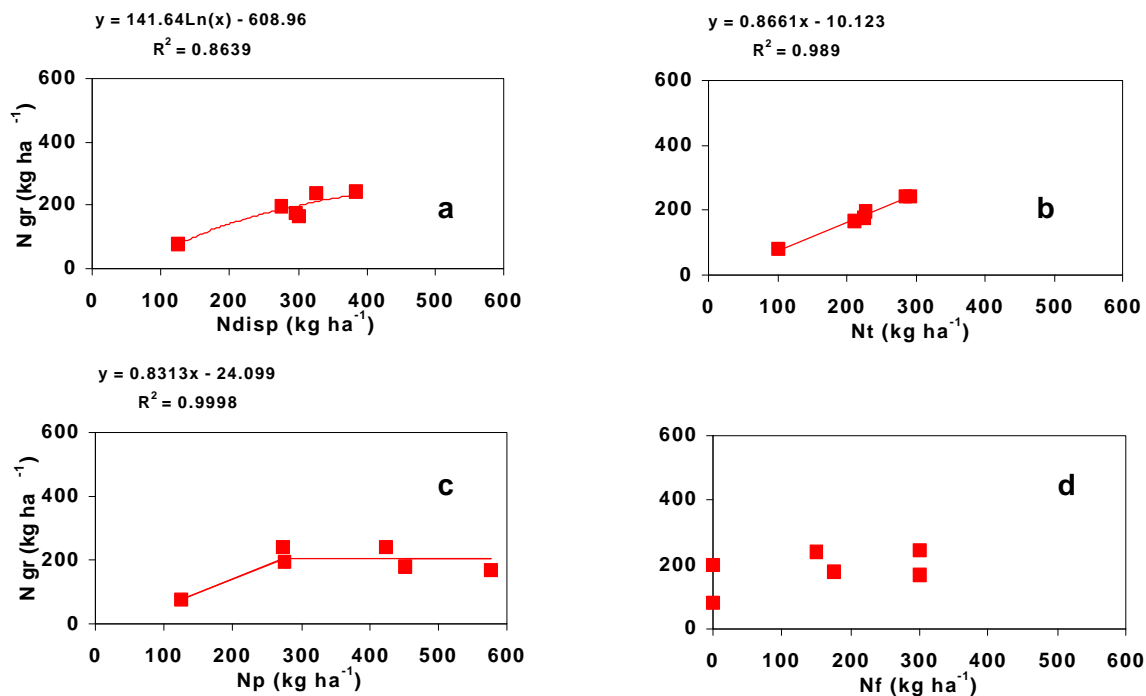
El índice de cosecha de N (Tabla 63), fue mayor en el año 1999 para el tratamiento T y en el 2000, para Nop, pero con una diferencia pequeña entre Nop y NC para los dos años, indicando que, cuando la disponibilidad y la absorción de N no son limitantes, esta eficiencia es fuertemente dependiente del genotipo usado.

La relación entre el N_{gr} y el N_{disp} (Fig. 110a) fue logarítmica, con incrementos decrecientes a partir de los 280 kgN ha^{-1} . La relación con N_t fue lineal y significativa (Fig. 110b).

Existió una relación lineal + meseta para la relación N_{gr}/N_p (Fig. 110c). Con valores superiores a 275 kgN ha^{-1} , el contenido de N_{gr} se mantiene en un valor promedio alrededor de 205 kgN ha^{-1} .

El contenido de N residual para el primer año de ensayo y la mayor tasa de mineralización debido al residuo del cultivo antecesor, con baja relación C/N, determinaron que la disponibilidad de N para el tratamiento T en este año fuera alta, no manifestándose diferencias con los tratamientos fertilizados en ninguno de los parámetros medidos y, consecuentemente, la relación tanto para N_{gr} como para Rend gr con respecto a N_f (Fig. 110 y 111d) está enmascarada por esta situación. La tendencia fue, sin considerar el valor para el tratamiento T en 1999, a que, con dosis superiores a los 150 kg N ha^{-1} aplicados, no existió un incremento ni en N_{gr} ni en el rendimiento (Fig. 110d, 111d).

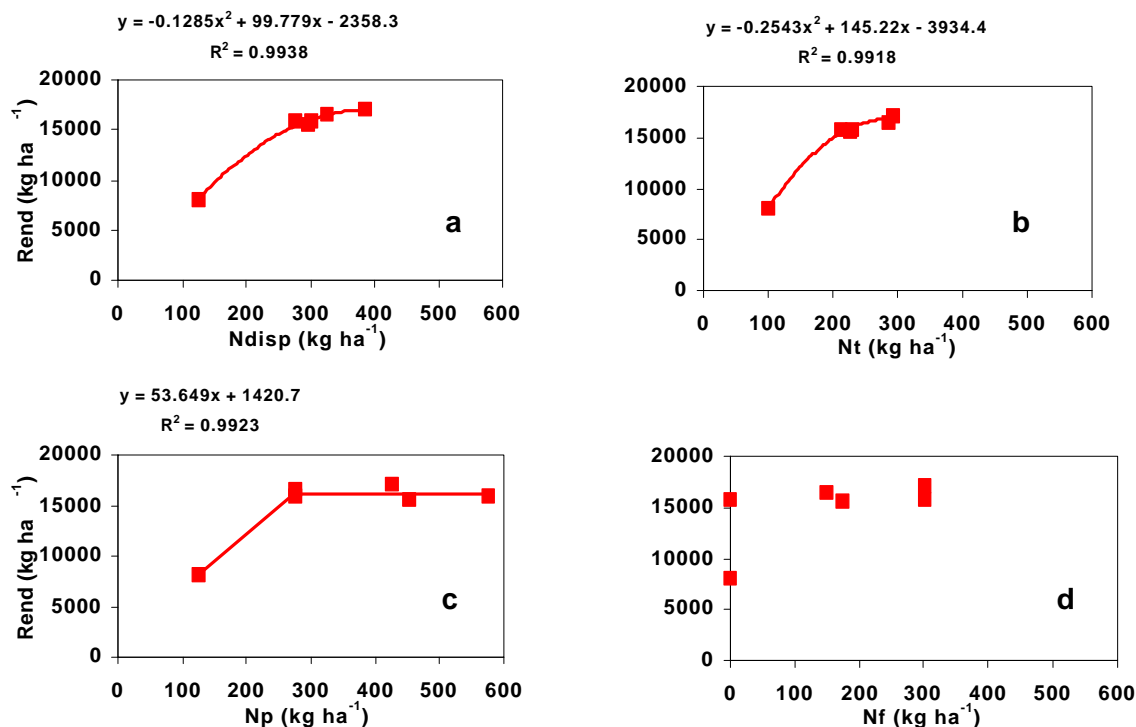
Figura 110. Relación entre N gr y: (a) N disponible (Ndisp); (b) N total en materia seca aérea (Nt); (c) N provisto (Np); y (d) N aplicado (Nf).



R^2 = coeficiente de determinación; Ngr= contenido de nitrógeno en el grano; N disp= nitrógeno disponible en el suelo (Ec. 4); Nt= nitrógeno contenido en la materia seca total aérea; Np= nitrógeno presente en el suelo (Ec. 2); Nf= nitrógeno aportado con el fertilizante.

Una relación cuadrática y significativa se encontró tanto para el rendimiento en grano en función del Ndisp como del Nt (Fig. 111a,b). La relación entre el rendimiento y el Np, también, fue lineal + meseta (Fig. 111c). Con valores superiores a 275 kg N ha⁻¹, no se incrementó el rendimiento por encima de alrededor de 16000 kg ha⁻¹. El rendimiento en grano tampoco se incrementó por encima de los 16000 kg ha⁻¹ con valores superiores a los 212 kg ha⁻¹ de Nt.

Figura 111. Relación entre el rendimiento en grano y (a) N disponible (Ndisp); (b) N total en materia seca aérea (Nt); (c) N provisto (Np); y (d) N aplicado como



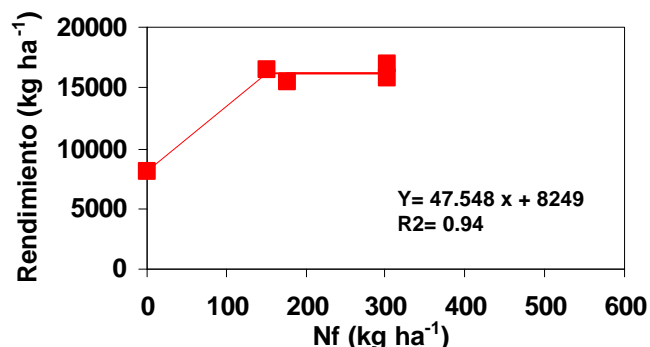
fertilizante (Nf).

R^2 = coeficiente de determinación; Rend= rendimiento en grano; N disp= nitrógeno disponible en el suelo (Ec. 4); Nt= nitrógeno contenido en la materia seca total aérea; Np= nitrógeno presente en el suelo (Ec. 2); Nf= nitrógeno aportado con el fertilizante.

En la Figura n° 112, se presenta la relación entre la dosis de fertilizante nitrogenado (Nf) y el rendimiento, sin considerar el tratamiento T para el año 1999. Para este ambiente, y utilizando un modelo lineal + meseta para el ajuste de los datos, se encontró que, con una dosis de fertilizante de 150 kg N ha⁻¹, se lograron rendimientos de 15300 kg ha⁻¹, no encontrándose respuesta a la aplicación de fertilizante con dosis mayores a ésta.

Bullock *et al.* (1994) encuentran que la función cuadrática + meseta es preferible al modelo cuadrático para predecir los requerimientos de fertilizante nitrogenado en el cultivo de maíz. En el presente trabajo, y debido al número de datos para ajustar el modelo con que se contó, la función utilizada fue lineal + meseta. El hecho de que esta relación haya sido ajustada sin utilizar el resultado del tratamiento T para el año 1999, indica la importancia de considerar el Nt residual para la previsión de la dosis de fertilización nitrogenada en este ambiente, de acuerdo al manejo de la fertilización que convencionalmente realizan los agricultores de la zona.

Figura 112. Relación entre la dosis de fertilizante nitrogenado (Nf) y el rendimiento, sin considerar el tratamiento T para el año 1999.



En síntesis, con la dosis de 300 kgN ha⁻¹ se logran tanto altas producciones de MST como altos rendimientos, al igual que con la dosis de 150 kgN ha⁻¹, pero también se midieron altos contenidos de N mineral en la cosecha, siendo más vulnerable un sistema productivo con este manejo de la fertilización N a la contaminación del agua subterránea con nitratos. Las mayores eficiencias medidas en el análisis de eficiencia en el uso del N para Nop, indican que el manejo de la fertilización nitrogenada realizado en este tratamiento será menos contaminante que el realizado para NC.

4.3 Comparación de la producción del cultivo de maíz en condiciones no limitantes, entre ambientes

En condiciones de alta fertilidad, la temperatura y la radiación explican la variabilidad en los rendimientos entre ambientes (Muchow *et al.*, 1990).

Cuando la disponibilidad hídrica y nitrogenada no fueron limitantes, la radiación fotosintéticamente activa absorbida explicó un 99 % de la diferencia de rendimientos entre ambientes. En la Figura n° 1a, se presenta esta relación para los tratamientos T2 y T3 (Argentina), y los tratamientos Nop y NC (España), para el año 2000.

La mayor amplitud térmica medida en el ambiente II, debida a temperaturas mínimas inferiores a las del ambiente I, explicó un 98 % de la variabilidad en los rendimientos entre ambientes.

A pesar de que sólo se contaron con dos puntos por ambiente para la relación (Fig. 113a), y dos para el ambiente I y cuatro para el II, para la relación (Fig. 113b), la tendencia es clara, indicando que la limitación en la producción del cultivo de maíz en condiciones no limitantes para el ambiente I, está dada por la oferta climática (radiación y temperatura).

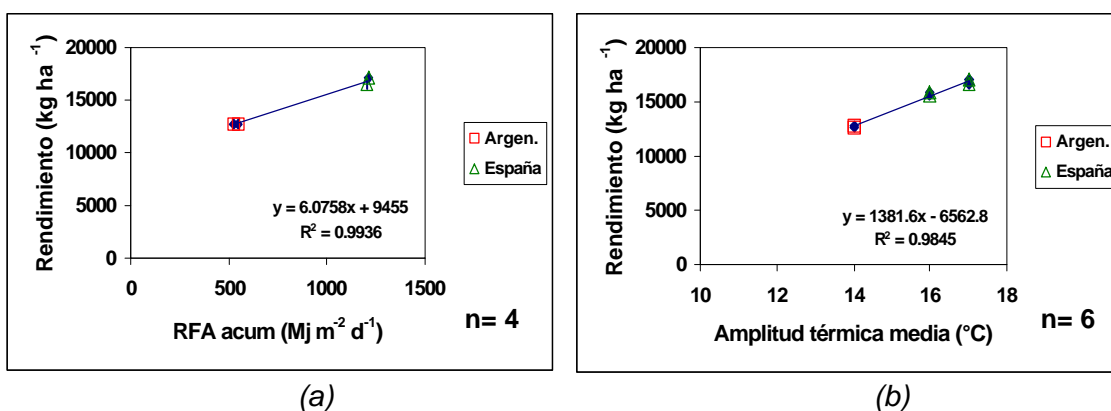
Sin embargo en España (ambiente II), la limitación hídrica es restrictiva en la producción del cultivo de maíz, siendo la única posibilidad su cultivo en condiciones de riego permanente y fertilización. En Argentina (ambiente I), es posible el cultivo de maíz en condiciones de secano, existiendo una variabilidad en los rendimientos entre años según la magnitud y momento de ocurrencia de las sequías estacionales, pero a pesar de esta variabilidad, siempre existirá producción. Los resultados del presente trabajo mostraron que los mayores rendimientos se alcanzaron en este

ambiente con láminas de riego y aportes de nitrógeno mucho menores que en el ambiente II, por lo que desde un enfoque ambiental y de conservación de los recursos, el cultivo del maíz en Argentina es menos contaminante y más conservador de los recursos que en España.

Es importante recordar que el umbral de fertilización nitrogenada por encima del cual no se incrementaron los rendimientos para Argentina fue de 90 kg N ha^{-1} , mientras que para España fue de 150 kg N ha^{-1} . Las láminas de riego con las que se alcanzaron los máximos rendimientos y eficiencias, fueron de 340 mm para Argentina y de 754 mm, en promedio para los dos ciclos agrícolas para España, recordando que el ciclo de experimentación en Argentina (1999-2000), fue particularmente seco con respecto a la media histórica (déficit climático de 119 mm).

A pesar de la imposibilidad de modificar las variables ambientales limitantes del rendimiento en Argentina (radiación y temperatura), la magnitud de la oferta de los recursos suelo y agua es mayor que en España, y, en un balance comparado, ya sea de costos energéticos o económicos de la producción, el cultivo de maíz aparece como más productivo y menos contaminante en Argentina.

Figura 113. Relación entre el rendimiento en función de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (a) y la amplitud térmica media para el ciclo del cultivo (b).



5. CONCLUSIONES

5.1 Ambiente I: Pergamino, Argentina

Para el ambiente I, el agua resultó ser, de los factores estudiados, el más limitante, afectando el rendimiento del cultivo a través de todas las etapas que intervienen en su formación: instalación del área foliar, intercepción de la radiación fotosintéticamente activa, eficiencia en el uso de la radiación, acumulación y partición de fotoasimilados, tasas de llenado de grano y componentes del rendimiento. La deficiencia nitrogenada tuvo su efecto más marcado en la reducción del índice de crecimiento de la espiga, el porcentaje de radiación interceptada, la eficiencia en el uso de la radiación y la partición de materia seca hacia destinos reproductivos.

Los diferentes niveles de agua y nitrógeno no modificaron el desarrollo de cultivo. La producción de materia seca total presentó reducciones de entre 7 y 10 % debidas al estrés nitrogenado, mientras que, estas reducciones fueron de entre 11 y 32 % como respuesta al estrés hídrico. El análisis de la participación porcentual de los distintos órganos aéreos en la materia seca total, mostró que la participación porcentual de las hojas secas en la materia seca total fue la que se vio afectada en mayor medida en los tratamientos de secano. Este hecho está indicando un inicio anticipado de la senescencia, y consecuentemente un menor tamaño de las fuentes para el llenado de grano. El factor nitrógeno es altamente significativo, lo que estaría indicando que el nitrógeno tiene influencia principalmente en la duración del área foliar, siendo este efecto más importante que el efecto en el valor absoluto de la misma, y, consecuentemente en la absorción de la radiación fotosintéticamente activa. La acumulación de materia seca en la espiga se vio reducida entre un 6 y un 35 % como respuesta a la deficiencia nitrogenada.

El análisis tradicional de crecimiento realizado mostró que, ante situaciones puntuales en las que se manifiesta un estrés hídrico, nutricional o ambiental, es preferible utilizar el método clásico al funcional en el análisis de crecimiento, ya que este último suaviza las variaciones ocurridas como respuesta a un estrés, enmascarando el comportamiento del cultivo. Esto es un hecho importante si el objetivo es encontrar ajustes matemáticos para la modelización del crecimiento del cultivo. Considerar el crecimiento en términos de la cantidad de radiación fotosintéticamente activa absorbida, y la eficiencia con que el cultivo la transforma en materia seca, es fisiológicamente más relevante y, analíticamente más fructífero, que usar los análisis de crecimiento tradicionales. Tanto la deficiencia hídrica como nitrogenada tuvieron un mayor efecto más marcado en la eficiencia en el uso de la radiación que en el porcentaje de radiación fotosintéticamente activa interceptada. El efecto de la deficiencia nitrogenada fue más mayor en la reducción de la eficiencia en el uso de la radiación que el de la deficiencia hídrica. La reducción del número de granos por metro cuadrado en el presente trabajo debida al estrés hídrico fue de 31 y 17 %. Con respecto a las dosis de nitrógeno estudiadas en este ambiente, no se encontraron respuestas positivas, en los diferentes procesos fisiológicos analizados, con dosis superiores a los 90 kg N ha⁻¹.

La diferencia encontrada entre los tres niveles hídricos analizados no avala la hipótesis de que aprovechando el agua útil inicial y regando solo durante el período crítico, no disminuyen los rendimientos; no como consecuencia de los momentos de riego, sino por causa de la magnitud de las láminas aplicadas. La estrategia programación de riego durante el período crítico, favorece la profundización radical, con el inicio del riego alrededor de 20 días previos a la floración, e incrementó la eficiencia en el uso del agua para grano en más de 1 kg de grano m⁻³. El inicio del riego en etapas más tempranas promovió el crecimiento radicular en superficie, resultando en un aprovechamiento ineficiente tanto del agua como de los nutrientes

presentes en el suelo. El aumento de la disponibilidad hídrica incrementó la absorción de nitrógeno, dentro de un mismo nivel nitrogenado, y consecuentemente la producción de materia seca total y grano. La eficiencia en el uso del agua para la producción de grano se vio incrementado conjuntamente con el incremento en la dosis de fertilización nitrogenada. Aunque fueron sólo tres dosis de nitrógeno las evaluadas, el nivel de N de 90 kg ha⁻¹, es el que está señalando el comienzo de incrementos decrecientes en la eficiencia en el uso del agua para la producción de grano.

Para este ambiente, la relación encontrada por regresión lineal, muestra una disminución del potencial xilemático de 1.06 bares, por cada °C de aumento en la temperatura foliar. La metodología de medición de la temperatura foliar está altamente correlacionada con los valores de potencial xilemático, al nivel de 1 % de significación ($R^2= 0.75$).

De acuerdo a los resultados obtenidos, es fundamental conocer la capacidad de híbrido utilizado de absorber N a lo largo de su ciclo para poder hacer una aplicación ajustada a las necesidades del mismo. Los híbridos capaces de absorber un alto % de nitrógeno después de floración aprovecharán, en mayor medida, aplicaciones tardías.

El contenido de nitrógeno mineral en la cosecha aumenta a medida que disminuye la disponibilidad hídrica. Los valores de mineralización para este ambiente, oscilaron entre 126 y 143 kg N ha⁻¹.

En cuanto al análisis realizado de la eficiencia en el uso del nitrógeno, las mayores eficiencias encontradas, del nitrógeno provisto y disponible, para el nivel intermedio de fertilización nitrogenada y en condiciones de riego, refuerzan los resultados encontrados en los estudios de carbono y agua, en los que no se encuentran respuestas que muestren incrementos en la producción del cultivo, con dosis superiores a los 90 kg N ha⁻¹.

Del análisis de las distintas eficiencias realizadas, surge como conclusión que la disponibilidad y posibilidad de absorción de nitrógeno es fuertemente dependiente de la disponibilidad hídrica, y debido al contenido de nitrógeno de estos suelos, para este ambiente, una vez mas aparece el factor agua como el mas limitante.

El análisis realizado en el presente trabajo no siguió una evolución temporal en la repetición del mismo, por lo que surge la importancia de realizar un análisis de la problemática del N en la producción de cultivos desde un enfoque de sistemas, con el objetivo de hacer la utilización mas eficiente del mismo, aprovechando el nitrógeno residual del rastrojo antecesor, incorporando al maíz en una rotación de cultivos que permita hacer el mejor uso tanto de la oferta ambiental como de aquella incorporada por la tecnología.

Ambiente II: Albacete, España

Los altos contenidos de nitrógeno mineral al comienzo del experimento, no permitieron separar las respuestas en el desarrollo, crecimiento, rendimiento y demás parámetros medidos, a la aplicación de dosis diferenciales de fertilización nitrogenada. Los resultados encontrados en el año 1999 no son representativos de los esperados de acuerdo a los tratamientos planteados.

La deficiencia nitrogenada se manifestó a partir del año 2000. El primer parámetro afectado fue la producción de materia seca total y, a partir de ella, los índices derivados. Este hecho señala la importancia en esta zona de considerar los niveles de N residuales debido a las altas dosis de fertilización nitrogenada que se manejan en la zona.

La falta de diferencias entre los tratamientos con aplicación de Nitrógeno optimizado ($175\text{-}150\text{ kg N ha}^{-1}$) y Convencional (300 kg N ha^{-1}), en la producción de MST en el año 2000, evidencian un consumo de lujo por parte del tratamiento Nitrógeno Convencional. Este se pone de manifiesto en los valores del índice de área foliar, que fue mayor para este tratamiento con respecto al nitrógeno optimizado, pero superó el índice de área foliar crítico, lo que significó una mayor masa foliar detrimental en la economía del cultivo, ya que no se tradujo en rendimientos en grano.

La instalación de la deficiencia nitrogenada en este ciclo produjo una disminución en el índice de área foliar, y consecuentemente en la radiación fotosintéticamente activa absorbida, en las tasas de crecimiento tanto del cultivo como de la espiga, en la producción de materia seca total y, finalmente, en el rendimiento.

Como síntesis, se puede hablar para este ambiente como objetivo utilizar dosis de nitrógeno que permitan una tasa de crecimiento del cultivo en la floración de alrededor de $25\text{ g m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ y una tasa de crecimiento de la espiga en la floración de alrededor de $30\text{ g m}^{-2}\text{ d}^{-1}$, para asegurar de esta forma un número de granos por metro cuadrado y un peso unitario de grano que permitan alcanzar altos rendimientos. Del análisis de los índices de crecimiento del cultivo realizado, se puede concluir que las dosis de nitrógeno que permiten estas tasas de crecimiento, tanto del cultivo como de la espiga en la floración, son las de 150 y 300 kg N ha^{-1} , y al no existir diferencias entre ellas, las dosis superiores a los 150 kg N ha^{-1} , propiciarán un consumo de lujo que no se traducirá en un incremento en el rendimiento en grano del cultivo, y serán potencialmente contaminantes de aguas subterráneas.

Los volúmenes globales de riego aplicados no fueron limitantes en la producción del cultivo, pero, quizá, es importante como objetivo para esta zona, donde la disponibilidad de agua es limitante, el realizar un ajuste más estricto de la evolución del riego a las necesidades del cultivo, lo que resultará en un ahorro en el agua de riego aplicada.

De acuerdo a los resultados de los consumos totales, y fundamentalmente en el período V6-15 DFFF, podemos concluir que el riego aplicado no redujo el consumo, y, por el contrario, para la etapa siembra-V6, realizando una comparación con los resultados obtenidos en el ambiente I, se puede pensar el realizar un riego deficitario en esta etapa, con el objetivo de ahorrar agua sin disminuir los rendimientos.

Como síntesis a las modificaciones encontradas en el presente ambiente a la aplicación de nitrógeno en los patrones de distribución radical, se puede afirmar que, cuando el ambiente hídrico y nitrogenado en el que se desarrolla el sistema radicular no es limitante, pero si existen impedimentos edáficos, como en este caso el desarrollo de un horizonte petrocálcico (Ck), cementado con carbonato de calcio, que impide el desarrollo radicular en esta profundidad restringiendo el ambiente para su desarrollo a los primeros 0.50m , el patrón de desarrollo radicular no responde a los descriptos en la bibliografía.

No existieron diferencias en la eficiencia en el uso del agua entre las dosis de 150 y 300 kgN ha⁻¹ para el segundo año de experimentación. Este resultado indica que un incremento de la fertilización nitrogenada por encima de los 150 kgN ha⁻¹ no modifica en forma positiva la eficiencia en el uso del agua.

Las mayores dosis de fertilizante nitrogenado para el año 2000, produjeron un incremento en todas las eficiencias en el uso del agua analizadas. El efecto del nitrógeno en el incremento de la eficiencia en el uso del agua fue, mediante el aumento tanto en la producción de la materia seca total, para todo el ciclo, como para el período crítico, como en el incremento en la producción de grano, sin haber existido modificaciones importantes en el consumo dentro de los diferentes niveles nitrogenados. Esto está indicando, para este ambiente, la importancia de ajustar los niveles de riego aplicado al nivel de fertilización nitrogenada, con el objetivo de lograr altos rendimientos, pero con altos niveles de eficiencias en el uso del agua.

Las diferencias encontradas entre tratamientos en el potencial xilémico, como respuesta a una disponibilidad hídrica no limitante e igual para todos los tratamientos, son pequeñas, por lo que se puede concluir que los diferentes niveles de fertilización nitrogenada no tuvieron ningún efecto en el estado hídrico de la planta.

En 1999, no existieron diferencias en la acumulación ni en la removilización de nitrógeno entre los diferentes tratamientos. La absorción de nitrógeno en los diferentes órganos aéreos manifestó diferencias en el segundo año de ensayo, quedando diferenciado el tratamiento Testigo (0 kgN ha⁻¹) de los dos restantes. En este año también existieron diferencias en cuanto al momento y la magnitud de la removilización. El tratamiento Testigo (0 kgN ha⁻¹) fue el primero que comenzó la removilización, seguido por el Nitrógeno optimizado (175 y 150 kgN ha⁻¹) y el Nitrógeno Convencional (300 kgN ha⁻¹). La removilización fue siempre mayor a partir de hojas, en todos los tratamientos. En orden decreciente la magnitud de la removilización fue mayor para Nitrógeno Convencional (300 kgN ha⁻¹), Nitrógeno optimizado (175 y 150 kgN ha⁻¹) y Testigo (0 kgN ha⁻¹).

Con concentraciones de nitrógeno foliar 15 días antes y 7 días posteriores a Vt, superiores a 40 y 16 g nitrógeno foliar kg⁻¹ materia seca, respectivamente, no se encontraron incrementos en el rendimiento. Estos umbrales de nitrógeno foliar se alcanzaron con dosis de 150 kg N ha⁻¹. El umbral de absorción de nitrógeno total para producir una tonelada de grano, fue de 18.50 kgN t⁻¹ gr.

Las cantidades de nitrógeno residual son bajas (24 a 40 kgN ha⁻¹), cuando la dosis de fertilizante es igual o inferior a la óptima en relación al rendimiento en grano. Cuando la dosis es superior, la cantidad de nitrógeno residual aumenta de forma importante, lo que indicó la potencialidad de contaminación de las aguas subterráneas.

Para este ambiente, el aporte de nitrógeno con el agua de riego es un componente a tener en cuenta en la previsión de la dosis de fertilizante nitrogenado a aplicar, debido a su magnitud.

Con la dosis de 300 kgN ha⁻¹ se logran altas producciones de materia seca total como altos rendimientos, al igual que con la dosis de 150 kgN ha⁻¹, pero también para la dosis mas alta se midieron altos contenidos de nitrógeno mineral en la cosecha, siendo mas vulnerable un sistema productivo con este manejo de la fertilización nitrogenada a la contaminación del agua subterránea con nitratos. Las

mayores eficiencias medidas en el análisis de eficiencia en el uso del nitrógeno para Nitrógeno optimizado (175 y 150 kgN ha⁻¹), indican que el manejo de la fertilización nitrogenada realizado en este tratamiento será menos contaminante que el realizado para Nitrógeno Convencional (300 kgN ha⁻¹).

Las diferencias encontradas entre ambientes, en los diferentes parámetros evaluados, muestran el carácter específico para cada sitio de las relaciones encontradas, la imposibilidad de extrapolar las mismas a diferentes ambientes, y la necesidad de validación y calibración al utilizar modelos desarrollados en ambientes diferentes. Es importante conocer en el ambiente en estudio cuáles son los factores más relevantes en la producción en el escenario en estudio para elegir el modelo que tenga mayor precisión en esos aspectos.

A pesar de la imposibilidad de modificar las variables ambientales limitantes del rendimiento en Argentina (radiación y temperatura), la magnitud de la oferta de los recursos suelo y agua es mayor que en España, y, en un balance comparado, ya sea de costos energéticos o económicos de la producción, el cultivo de maíz aparece como más productivo y menos contaminante en Argentina.

Propuesta de trabajo

Para ambos ambientes, constituirá un aporte importante al conocimiento del funcionamiento de los cultivos, la incorporación de este tipo de experimentación en una rotación de cultivos, para estudiar de forma dinámica la influencia del cultivo antecesor en las economías del agua, del nitrógeno y del carbono, en el funcionamiento del cultivo. Se propone dar continuidad a este tipo de estudios para modelizar el funcionamiento del cultivo de maíz en cada ambiente, en distintos escenarios de trabajo y en función de estudios climáticos frecuenciales, identificar los factores más limitantes de la producción del cultivo en cada ambiente, conocer el riesgo de aplicación de una tecnología, y mejorar las recomendaciones de manejo para preservar la calidad del ambiente.

Para Albacete, España, un objetivo en el corto plazo será la utilización modelos de simulación de crecimiento y desarrollo, como una herramienta integradora de los diferentes procesos involucrados en el crecimiento, desarrollo y formación del rendimiento de los cultivos, que permite identificar las principales limitantes en la producción de los mismos, y fomenta el trabajo interdisciplinario. La integración de estos modelos con el uso de sistemas de información geográfico (SIG), permite la identificación de problemas en la producción y son una herramienta de ayuda a la toma de decisiones, a gran escala. Los resultados obtenidos con los modelos de simulación no son extrapolables, es necesaria la experimentación e investigación para la calibración y validación, y el conocimiento del grado de precisión en sus predicciones.

6. BIBLIOGRAFIA

- Acevedo, E.T., Hsiao, C. and Henderson, D.W. 1971. Immediate and subsequent growth response of maize leaves to changes in water stress. *Plant Physiol.* 48: 631-636.
- Acevedo, E.T., Fereres, E., Hsiao, T.C. and Henderson, D.W. 1979. Diurnal growth trends, water potential, and osmotic adjustment of maize and sorghum in the field. *Plant Physiol.* 64:476-480.
- Ackerson, R. C. 1983. Comparative physiology and water relations of two corn hybrids during water stress. *Crop Sci.* 23: 278-283.
- Aguilar Portero, M. 1994. Respuesta fisiológica y agronómica del maíz a distintas poblaciones de plantas en Andalucía. Sevilla. Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía. Informaciones Técnicas N° 27.
- Aina, P. O. and Fapohunda, H.O. 1986. Root distribution and water uptake of maize cultivars field-grown under differential irrigation. *Plant and Soil.* 94: 257-265.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Racs, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Rome, Italy. FAO Irrigation and Drainage. Paper N° 56
- Allison, J. C. S. 1971. Analysis of growth and yield of inbred and cross-bred maize. *Ann. Appl. Biol.* 68: 81-92.
- Allison J. C. S. and Daynard, T. B. 1979. Effect of change in time of flowering, induced by altering photoperiod or temperature, on attributes related to yield in maize. *Crop Sci.* 19: 1-4.
- Amir, J., Krikun, J., Orion, D., Putter, J. and Klitman, S. 1991. Wheat production in an arid environment. 1. Water- use efficiency, as affected by management practices. *Field Crop Res.* 27: 351-364.
- Anderson, E. L. 1987. Corn root growth and distribution as influenced by tillage and nitrogen fertilization. *Agron. J.* 79: 544-549.
- Andrade, F. H., Cirilo, A., Uhart, S. A. y Otegui, M. 1996. Ecofisiología del cultivo de maíz. Balcarce, Dekalb Press. CRBAS/FAC-UN Mar del Plata. 292 p.
- Andrade, F. H., Uhart, S. A. y Cirilo, A. 1993a. Temperature affects radiation use efficiency in maize. *Field Crop Res.* 32:17-25.
- Andrade, F. H., Uhart, S. A., and Frugone, M. I. 1993b. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize: shade versus plant density effects. *Crop Sci.* 33:482-485.
- Andriulo, A., Ferreyra, C., Sasal, C., Rivero de Galetto, M. L., Abrego, F., Bueno, M., Rimatori, F., Cruz, M. A. de la, Venencio, M. de V. y Giacosa, R. 2000. Nitratos en el agua subterránea del partido de Pergamino. Efecto a largo plazo de la agricultura continua y a corto plazo de la producción intensiva de granos. *In:* Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, 17°. Mar del Plata, 2000. Bs. As. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Buenos Aires, Argentina.
- Arguissain, G. G. 1990. Productividad de maíz en Balcarce. Tesis Magister Scientiae. Balcarce. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. 60 pp.
- Asadi, M. E., Clemente, R. S., Gupta, A. D., Loof, R. and Hansen, G. K.. 2002. Impacts of fertigation via sprinkler irrigation on nitrate leaching and corn yield in acid-sulphate soil in Thailand. *Agric. Water Manag.* 52, 197-213.
- Bacon, P. E. 1995. Nitrogen fertilization in the environment. Marcel Dekker, New York, USA.

- Badu-Apraku, B., Hunter, R. B. and Tollenaar, M.. 1983. Effect of temperature during grain filling on whole plant and grain yield in maize. *Can. J. Plant. Sci.* 63: 357-363.
- Barloy, J. 1984. Biologie de l'élaboration du rendement. In: France.INRA: Physiologie du Maïs, pp.163-180.
- Barragán, J., Calavia, T. and Segarra, J. 1988. Riego y abonado en maíz: evolución de algunos parámetros fisiológicos. *Riegos y Drenajes* 20: 43-50.
- Beauchamp, E. G., Kannenberg, L. W. and Hunter, R. B. 1976. Nitrogen accumulation and translocation in corn genotypes following silking. *Agron. J.* 68: 418-422.
- Below, F. E., Christensen, L. E., Reed, A. J. and Hageman, R. H. 1981. Availability of reduced N and carbohydrates for ear development in maize. *Plant Physiol.* 68: 1186-1190.
- Bell, M. J., Muchow, R. C. and Wilson, G. L. 1987. The effects of plant population on peanuts (*Arachis hypogaea* L.) in a monsoonal tropical environment. *Field Crop Res.* 17:91-107.
- Ben- Asher, J., Phene, C.J., and Kinarti, A. 1992. Canopy temperature to asses daily evapotranspiration and management of high frequency drip irrigation systems. *Agric. Water Manag.* 22: 379-390.
- Berbecel, O. and Eftimescu, M. 1972. Effect of agrometeorological conditions in maize growth and development. Part. I. *Meteorology and Hidrology* 2: 45-51.
- Bethenod, O. et Tardieu, F. 1990. Assimilation nette et conductance stomatique du maïs. In: Colloque sur la physiologie du maïs. Pau, France. 1990. Paris, INRA.
- Blacklow, W. M. 1972. Influence of temperature on germination and elongation of the radicle and shoot of corn (*Zea mays* L.). *Crop Sci.* 12: 647-650
- Blackman, P. G., and Davies, W. J. 1985. Root to shoot communication in maize plants of the effects of soil drying. *J. Exp. Bot.* 36: 39-48.
- Blackmer, A. M., Pottker, D., Cerrato, M. and Webb, J. 1989. Correlations between soil nitrate concentrations in late spring and corn yields in Iowa. *J. Prod. Agric.* 2: 103-109.
- Bloc., D., Gay, J. P. et Gouet, J. P.. 1983. Evolution de la teneur en eau et poids de 1000 grains pendant la maturation du maïs. In: Colloque sur la physiologie du maïs. Royan, 1983. Paris. France, INRA.
- Bollero, G. A., Bullock, D. G. and Hollinger, S. E. 1996. Soil temperature and planting date effects on corn yield, leaf area, and plant development. *Agron. J.* 88: 385-390.
- Bonhomme, R., Derieux M., J. R., Kiniry, G. O., Edmeades, H. and Ozier -Lafontaine. 1991. Maize leaf number sensitivity in relation to photoperiod in multilocation field trials. *Agron. J.* 83: 156-164.
- Bonhomme, R., Derieux, M. and Edmeades, G. O. 1994. Flowering of diverse maize cultivars in relation to temperature and photoperiod in multilocation trails. *Crop Sci.* 34:156-164.
- Boote, K. J. 1977. Root:shoot relationships. *Proc. Soil. Crop Sci. Soc. Flo.* 36:15-23.
- Boote, K. J., Jones, J. W. and Pickering, N. B. 1996. Potential Uses and limitations of crop models. *Agron. J.* 88: 704-716.
- Borowiak, D. S. 1989. Model discrimination for nonlinear regression models. Marcel Dekker, Inc., NY, USA.

- Botella, O., de Juan, J. A., Martín de Santa Olalla, F. J. 1997. Growth, development and yield of five sunflower hybrids. *Eur. J. Agron.* 6: 47-59.
- Boyer, J. S. 1970. Leaf enlargement and metabolic rates in corn, soybean, and sunflower at various leaf water potentials. *Plant Physiol.* 46: 233-235.
- Boyer, J. S. 1985. Water transport. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 36:473-516.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M. H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayoy, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J. M., Maynard, J. M. et Delécolle, R. 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18: 311-346.
- Brown, R. E., Varvel, G. E., Shapire, C. A. 1993. Residual effect of interseed hairy vetch on soil nitrate-nitrogen levels. *Soil Sci. Soc. Of Am. J.* 1993. 57: 121-124.
- Bullock, D.G. and Bullock, D.S. 1994. Quadratic and quadratic-plus-plateau models for predicting optimal nitrogen rate of corn: A comparison. *Agr. J.* 86:191-195.
- Buttery, B. R. 1969. Analysis of growth of soybean as affected by plant population and fertilizer. *Can. J. Plant Sci.* 49: 675-684.
- Buttery, B. and Buzzell, R.I. 1974. Evaluation of methods used in computing net assimilation rates of soybeans (*Glycine max* (L.) Mersill). *Crop Sci.* 14: 41-44.
- Calder, D. M. 1964. Inflorescence induction and initiation in the Graminae. P. 59-73. In: C. Barnard (ed.) *Grasses and Grasslands*. Mac Millan, London.
- Caldwell, D. S., Spurgeon, W. E. and Manges, H. L.. 1994. Frequency of irrigation for subsurface drip - irrigated corn. *Trans. ASAE.* 37: 1099 - 1103.
- Cantarero, M. G., Cirilo, A. and Andrade, F. H. 1999. Nigth temperature at silking affects kernel set in maize. *Crop Sci.* 39: 703-710.
- Carpio Rodriguez, J. 1986. Castilla- La Mancha. Factores naturales del espacio agrario. *Boletín El Campo* Nº 102. 7-15.
- Cartagena, M. C., Vallejo, A., Diez, J. A., Bustos, A. Caballero, R., and Román, R. 1995. Effect of the type of fertilizer and source of irrigation water on N use in a maize crop. *Field Crop Res.* 44:33-39.
- Castrignanó, A., Rubino, P., Tarantino, E. 1985. Analisi funzionale di crescita della coltura di pomodoro da industria sottoposta a diversi regimi irrigui. In: Anderlini, R. *La coltivazione del pomodoro*. Universale Edagricole Nº120, Bologna, Italia.
- Cerrato, M. E. and Blackmer, A. M. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 82: 138-143.
- Christensen, L. E., Below, F. E. and Hageman, R. H. 1981. The effects of ear removal on senescence and metabolism of maize. *Plant Physiol.* 68: 1180-1185.
- CIMMYT. 1970 Annual report International Maize and Wheat Improvement. México, D.F. CIMMYT
- Cirilo, A. 1994. Desarrollo, crecimiento y partición de materia seca en cultivos de maiz sembrados en diferentes fechas. Tesis. Magister Scientiae. Balcarce. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. . 86p.

- Cirilo, A. and Andrade, F. H. 1994. Sowing date and maize productivity: I. Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Sci.* 34: 1039-1043.
- Cirilo, A. and Andrade, F. H. 1996. Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Sci.* 36: 325-331.
- Claasen, M. M. and Shaw, R. H. 1970. Water deficit effects on corn. II. Grain components. *Agron. J.* 62: 652-655.
- Clawson, K. J. and Blad, B. L. 1982. Infrared thermometry for scheduling irrigation of corn. *Agron. J.* 74: 311-316.
- Clawson, K. L., Specht, J. E. and Blad, B. L. 1986. Growth analysis of soybean isolines differing in pubescence density. *Agron. J.* 78: 64-172.
- Coaldrake, P. D. and Pearson, C. J. 1985. Development and dry weight accumulation of pearls millet as affected by nitrogen supply. *Field Crop Res.* 11: 193-205.
- Cooper, P. J. M. and Law, L. R. 1978. Enhanced soil temperature during very early growth and its association with maize development and yield in the Highlands of Kenya. *J. Agric. Sci.* 89:569-577.
- Coscolluela, F. y Faci, J. M. 1992. Obtención de la función de producción del maíz (*Zea mays* L.) respecto al agua mediante una fuente lineal de aspersión. *Invest. Agr. Prod. Prot. Veg.* 7(2): 169-194.
- Cox, W. J., Zobel, R. W., van Es H. M., and Otis, D. J. 1990. Growth, development and yield of maize under three tillage systems in the northwestern U.S.A. *Soil Tillage Res.* 18: 295-310.
- Cox, W. J., Kalonge, S., Cherney, D. J. R. and Reid, W. S. 1993. Growth, yield and quality of forage maize under different nitrogen management practices. *Agron. J.* 85: 341-347.
- Cox, W. J., Cherney, J. H., Cherney, D. J. R., Pardee, W. D. 1994. Forage quality and harvest index of corn hybrids under different growing conditions. *Agron. J.* 86: 277-282.
- Craft-Brandner, S. J. and Egli, D. B. 1987. Modification of seed growth in soybean by physical restraint: effect on leaf senescence. *J. Exp. Bot.* 38: 2043-2049.
- Criado, S. R. 1996. Considerations on main factors which take part in nitrate contamination of groundwater in Spain with relationship to other EU countries. *Fertil. Res.* 43: 203-207.
- Cutforth, H. W. and Shaykewich, C. F. 1989. Relationship of development of corn from planting to silking to air and soil temperatures and to accumulated thermal units in a prairie environment. *Can. J. Plant Sci.* 69: 121-132.
- Daigger, L. A., Sander, D. H. and Peterson, G. A.. 1976. Nitrogen content of winter wheat during growth and maturation. *Agron. J.* 68: 815-818.
- Davies, W. J., Metcalfe, J., Lodge, T. A. and da Costa, A. R. 1986. Plant growth substances and the regulation of growth under drought. *Aust. J. Plant Physiol.* 13:105-125.
- Daynard, T. B., Tanner, J. W. and Hume, D. J. 1969. Contribution of stalk soluble carbohydrates to grain yield. *Crop Sci.* 9: 831-834.
- Daynard, T. B. 1972. Relationship among black-layer formation, grain moisture percentage and heat units accumulation in corn. *Agron. J.* 64: 716-719.
- Daynard, T. B., and Kannenberg, L. W. 1976. Relationship between length of actual and effective grain filling periods and grain yield of corn. *Can. J. Plant Sci.* 56: 237-242.

- Daughtry, C. S. T., Gallo, K. P., Goward, S. N., Prince, S. D. and Kustas, W. P. 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sens. Environ.* 39: 141-152.
- De Juan Valero, J. A., Tarjuelo Martín-Benito, J. M., y Ortega Alvarez, J. F. 2001. Rasgos básicos de los factores naturales del espacio agrario castellano-manchego. La Mancha. Universidad de Castilla. Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla- La Mancha, Albacete, España.
- De Juan Valero, J. A., Fabeiro Cortés, C., Martín de Santa Olalla Mañas, F. J., y López Córcoles, H. 1999. Efecto del déficit de suministro de agua en el rendimiento y en la calidad de un cultivo de maíz dulce. *Información Técnica Económica Agraria* 95: 218-240.
- De Juan Valero, J. A., Martín de Santa Olalla Mañas, F. J., y Botella, O. 1992. Dinámica del crecimiento y desarrollo del girasol. Albacete. España. Ediciones de la Universidad de Castilla – La Mancha. Colección de Ciencia y Técnica, Ciudad Real, España.
- Deloughry, R. L. and Crookston, R. K. 1979. Harvest index of corn affected by population density, maturity rating and environment. *Agron. J.* 77: 577-580.
- Delphin, J. E. 1986. Evaluation du pouvoir minéralisateur de sols agricoles en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques. *Agronomie.* 6:453-458.
- Derieux, M. and Bonhomme, R. 1982a. Heat units requirements for maize hybrids in Europe. Results from the European FAO subnetwork: I. Sowing-silking period. *Maydica* 27: 59-77.
- Derieux, M. and Bonhomme, R. 1982b. Heat units requirements for maize hybrids in Europe. Results from the European FAO subnetwork: II. Period from silking to maturity. *Maydica* 27: 77-95.
- Derieux, M. and Bonhomme, R. 1986. Different approche to maturity ratings in maize in the world. *Information Bulletin of the FAO Research Network on Maize* 3:15-21.
- Diez, J. A., Román, R., Cartagena, M. C., Vallejo, A., Bustos, A. and Caballero, R. 1994. Controlling nitrate pollution of aquifers by using different nitrogenous controlled release fertilizers in maize crop. *Agric. Ecosyst. Environ.* 48: 49-56.
- Donald, C.M. 1962. In search of yield. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 28: 171-178.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. H. 1986. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Rome, Italy. FAO Riego y Drenaje N°33.
- Doorenbos, J. and Pruitt W. O. 1984. Las necesidades de agua de los cultivos. Rome, Italy. FAO Riego y Drenaje N°24.
- Dow Chemical Company, Midland. 1989. Nitrogen and hybrid management for high yield production. 64 pp. Midland, USA.
- Duncan, W. G. 1975. Maize. In: Evans, L.T. ed. *Crop Physiology*. London, Cambridge University Press pp.23-50.
- Durieux, R. P., Kamprath, E. J., Jackson, A. W. and Moll, R. H. 1994. Root distribution of corn: The effect of nitrogen fertilization. *Agron. J.* 86: 958-962.
- Dwyer, L. M. and Stewart, D. W. 1986. Leaf area development in field grown maize. *Agron. J.* 78: 334-343.
- Dwyer, M. L., Stewart, D. W., Balchin, L. Houwing, C. J., Marur, R. and Hamilton, I. 1989. Photosynthetic rates of six maize cultivars during development. *Agron. J.* 81: 597-602.

- Dwyer, M. L., Anderson, A. M., Stewart, D. W., Ma, B. L. and Tollenaar, M. 1995. Changes in maize hybrid photosynthetic response to leaf nitrogen, from pre-anthesis to grain fill. *Agron. J.* 87:1221-1225.
- Dwyer, M. L., Stewart, D. W., Carrigan, Ma., B. L., Neave, P. and Balchin, D. 1999. A general thermal index for maize. *Agron. J.* 91: 940-946.
- Eck, H. V. 1984. Irrigated corn yield response to nitrogen and water. *Agron. J.* 76: 421-428.
- Early, E. B., Miller, R. J., Reichert, G. L., Hageman, R.H. and Seif, R. D. 1966. Effects of shade on maize production under field conditions. *Crop Sci.* 6:1-7.
- Early, E. B., McIlrath, W. O., Seif, R. D. and Hageman, R. H. 1967. Effects of shade applied at different stages of plant development on corn (*Zea mays* L.) production. *Crop Sci.* 7:151-156.
- Edwards, G. E. 1986. Carbon fixation and partitioning in the leaf. In: Shannon, et al eds. Regulation of carbon and nitrogen reduction and utilization in maize. Rockville MD., American Society of Plant Physiology. pp.51-66
- Edmeades, G. O. and Daynard, T. B. 1979. The relationship between final yield and photosynthesis at flowering in individual maize plants. *Can. J. Plant. Sci.* 59: 585-601.
- Eghball, B. and Maranville, J. W. 1993. Root development and nitrogen influx of corn genotypes grown under combined drought and nitrogen stresses. *Agron. J.* 85: 147-152.
- Elias Castillo, F y Ruiz Beltran, L. 1981. Estudio agroclimático de la Región de Castilla – La Mancha. Departamento de Agricultura. Junta de Comunidades.
- Ellis, R. H., Summerfield, R. J., Edmeades, G. O. and Roberts, E. H. 1992. Photoperiod, temperature, and the interval from sowing to tassel initiation in diverse cultivars of maize. *Crop Sci.* 32: 1225-1232.
- Evans, C. 1972. The quantitative analysis and design of experiments. Reading,. Agric. Res. Council.
- Evans, C. 1978. The influence of irradiance before and after atthesis on grain yield and its components in microcrops of wheat grown in a constant daylength and temperature regime. *Field Crops Res.* 91: 259-265.
- Evans, L.T. (ed). 1975. Crop physiology-some case histories. Cambridge, University Press.
- Evanylo, G. K. 1991. No-till corn response to nitrogen rate and timing in the middle Atlantic coastal plain. *J. Prod. Agric.* 4:180-185.
- Fabeiro, C., Martín de Santa Olalla, F.J. and de Juan, J. A. de. 2001. Yield and size of deficit irrigated potatoes. *Agric. Water Manag.* 48: 255-266.
- Fabeiro, C., Martín de Santa Olalla, F.J. and de Juan, J. A. 2002. Production of muskmelon (*Cucumis melo* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate. *Agric. Water Manag.* 54: 93-105.
- FAIR 1 CT95-0088. 1999. Water, agriculture and environment interactions. Reducing the impacts of water applications heterogeneity on: nitrates leaching, water losses and economic yields. Rapport d'avancement NIWASAVE rédigés á l'issue de la 3 éme période. Final report
- FAO. Clasificación Taxonómica Americana (7^a aproximación). 1999. (<http://www.fao.org/docrep>). (Consulta: enero de 2000).

- Feller, U. K., Soong, T. T. and Hageman, R. 1977. Leaf proteolytic activities and senescence during grain development of field grown corn (*Zea mays* L.). *Plant Physiol.* 59: 290-294.
- Ferrari, M. C., Ostojic, J. J., Ferraris, G. N., Ventimiglia, L. A., Carta, H. G y Rillo, S. N. 2001. Momento de aplicación del fertilizante nitrogenado en maíz de siembra directa. In: Congreso Nacional de Maíz, 7º. Pergamino (Argentina), 2001.
- Fisher, R. A. 1973. The effect of water stress at various stages of development on yield process in wheat. In: Symposium Plant responses to climatic factors. Uppsala , 1970.
- Fischer, K. S. and Palmer, F. E. 1984. Tropical maize. In: Goldsworthy, P. R. and Fischer, N. M. eds. *Physiology of tropical field crops*. New York, Wiley Interscience. pp. 213-248.
- Fischer, K. S. and Wilson, G. L. 1975. Studies of grain production in *Sorghum bicolor* (L.) Moenoh. V. Effect of planting density on growth and yield. *Aust. J. Agric. Res.* 26: 31-41.
- Flannery, R. L. 1986. Plant food uptake in a maximum yield corn study. *Better Crops Plant Food* 70: 4-5.
- Fletcher, D. A. 1991. A national perspective. In: Follett, R. F., Power, J. F., Meisinger, J. J., Schepers, J. S., and Smith, S. J. eds. *Managing nitrogen for ground-water quality and farm profitability*. Madison, Soil Science Society of America. pp 9-16.
- Fleury, A. 1990. Méthodologie de l'analyse de l'élaboration du rendement. In: Colloque Physiologie et production de maïs. Pau, France, 1990. Paris, INRA. pp. 279-290.
- Fortin, M. C. and Pierce, F. J. 1991. Timing and nature of mulch retardation of corn vegetative development. *Agron. J.* 83: 258-253.
- Fox, R. H., Roth, G. W., Iverson, K. V. and Piekielek, W.P. 1989. Soil and tissue nitrate test compared for predicting soil nitrogen availability to corn. *Agron. J.* 81: 971-974.
- Francis, D. D., Schepers, J.S. and Vigil, M.F.1993. Post- anthesis nitrogen loss from corn. *Agron. J.* 85: 659-663.
- Friedrich, J. W. and Schrader, I. E. 1979. Deprivation in maize during grain filling II. Remobilization of ¹⁵N accumulation. *Agron. J.* 71:461-465.
- Gallagher, J. N. and Biscoe, P.V. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J. Agric. Sci.* 91:47-60.
- Gallo, K. P. and Daughtry, C. S. T. 1986. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Agron. J.* 78: 752-756.
- Gallo, K. P., Daughtry, C. S. T. and Wiegand, C. L. 1993. Errors in measuring intercepted absorbed radiation and computing crop radiation use efficiency. *Agron. J.* 85: 1222-1228.
- Gardner, B. R., Blad, B. L., Garrity, D.P. and Watts, D.G.. 1981a. Relationships between crop temperature, grain yield, evapotranspiration, and phenological development in two hybrids of moisture stressed sorghum. *Irrig. Sci.* 2 : 213-224.
- Gardner, F. P., Pearce, R. B., and Mitchell, R. L. 1985. *Physiology of crop plants*. Iowa State University Press. Ames, IO, USA.
- Gardner, F. P., Pearce, R. B. and Mitchell, R. L. 1990. Carbon fixation by crop canopies. In: *Physiology of crops plants*. Iowa, State Univ. Press.
- Gardner, B. R., Nielsen, D.C. and Shock, C.C.. 1992. Infrared thermometry and crop water stress index. I. History, theory, and baselines. *J. Prod. Agric.* 5: 462-466.

- Geiser, K. M., Slack, D.C., Allred, E.R. and Stange, K.W. 1982. Irrigation scheduling using crop canopy-air temperature difference. *Trans. of the ASAE*. 25: 689 - 694.
- Gherbin, P. ed Montelleone, M. 1996. Analisi funzionale di crescita di un ibrido di sorgo da cellulosa sottoposto a diversi regimi irrigui: II) Aspetti agronomici. *Riv. di Agron.* 30: 50-57.
- Gifford, R. M. and Evans, L. T. 1981. Photosynthesis, carbon partitioning, and yield. *Economic plants. Annu. Rev. Plant. Physiol.* 32: 485-509.
- Gifford, R. M. and Thorne, J. H. 1984. Crop productivity and photoassimilate partitioning. *Science* 225: 801- 808.
- Gilmore, E. and Rogers, J. S. 1958. Heat units as a method of measuring maturity in corn. *Agron. J.* 50:611-615.
- Girardin, P., Tollenaar, M. and Deltour, A. 1985. Effect of temporary N starvation in maize on leaf senescence. *Can. J. Plant Sci.* 65: 819-829.
- Girardin, P., Tollenaar, M. and Muldoon, J. F. 1985. Effect of temporary N starvation on leaf photosynthetic rate and chlorophyll content of maize. *Can. J. Plant Sci.*: 65: 491-500.
- Girardin, P; Tollenaar, M., Deltour, A. and Muldoon, J. 1987. Temporary N starvation in maize (*Zea mays* L.): effects on development, dry matter accumulation and grain yield. *Agronomie* 7 : 289-296.
- Gollan, T., Passioura, J. B. and Munns, R. 1986. Soil water status affects the stomatal conductance of fully turgid wheat and sunflower leaves. *Aust. J. Plant Physiol.* 13: 459-464.
- Grant, R. F. 1989. Simulation of maize phenology. *Agron. J.* 81:451-457.
- Grant, R. F., Jackson, B. S., Kiniry, J. R. and Arkin, G. F. 1989. Water deficit timing effects on yield components of maize. *Agron. J.* 81: 61-65.
- Gregory, F.G. 1926 . The effect of climatic conditions on the growth of barley. *Ann. Bot.* 40: 1-26.
- Guevara, E. R. 1991. Role des caracteres d'enracinement dans la tolerance au deficit hydrique du mais (*Zea mays* L.) en Argentine. Thèse de Docteur. Montpellier, France. Ecole National Supérieure Agronomique. 141 p.
- Guiraud, G. 1984. Contribution du marquage isotopique a l'évaluation des transferts d'azote entre les compartiments organiques et minéraux dans les systèmes sol-plante. Thèse de Docteur Etat. Paris, France. Univ. Pierre et Marie Curie. 335 p.
- Gupta, S. and Larson, W.E. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter content, and bulk density. *Water Resour. Res.* 15: 1633-1635.
- Hagman, R. H. 1986. Nitrate metabolism in roots and leaves. In: Shannon, J.C. et al eds. Regulation of carbon and nitrogen reduction and utilization in maize. Rockville Md, Am. Soc. Plant Physiol. pp: 105-116.
- Hagin, J. and Lowengart, A. 1996. Fertigation for minimizing environmental pollution by fertilizers. *Fertil. Res.* 43: 5-7.
- Hall, A. J., Ginzo, H.D., Lemcoff, J.H. and Soriano, A. 1980. Influence of drought during pollen-shedding on flowering, growth and yield of maize. *Z. Acker-und Pflanzenbau.* 149: 287-298.

- Hall, A. J., Lemcoff, J.H. and Trapani, N. 1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica* 26: 19-30.
- Hall, A. J., Connor, D. J., and Sadras, V. O. 1994. Radiation-use efficiency of sunflower crops: effects of specific leaf nitrogen and ontogeny. *Field Crop Res.* 41:65-77.
- Hamblin, A, and Tennant, D. 1987. Root length density and water uptake in cereals and grain legumes: How well are they correlated. *Aust. J. agric. Res.* 38: 513-527.
- Hanway, J.J. 1962. Corn growth and composition in relation to soil fertility: I. Growth of different plant parts and relation between leaf weight and grain yield. *Agron. J.* 54: 145-148.
- Harper, L. A., Sharpe, R. R., Langdale, G.W. and Giddens, J.E. 1987. Nitrogen cycling in a weath crop: soil, plant and aerial nitrogen transport. *Agron. J.* 79: 789-792.
- Harris, P. M. 1978. *Potato crop: the scientific basis for improvement.* London, Chapman and Hall.
- Hawkins, R. C. and Cooper, P.J.M. 1981. Growth, development and grain yield of maize. *Exp. Agric.* 17:203-207.
- Heermann, D. F., Martin, D. L., Jackson, R. D. and Stegman, E. C. 1990. Irrigation scheduling controls and techniques. *In:* Stewart. B.A. and Nielsen. D.R. eds. *Irrigation of agricultural crops.* . Madison, Wis.,ASA. CSSA. SSSA. *Agronomy* N°30. pp 509- 535.
- Hergert, G. W. 1986. Nitrate leaching through sandy soil as affected by sprinkler irrigation management. *J. Environ. Qual.* 15: 272-278.
- Herrero, M. P. and Johnson, R.R. 1981. Drought stress and its effects on maize reproductive systems. *Crop Sci.* 21: 105-110.
- Hesketh, J. D. and Dale, R.F. 1987. Data for plant growth modeling: an evaluation. *In:* Plant growth modeling for resource management. Vol. I. Boca Raton, CRC Press pp.57-71
- Hesketh, J. D. and Warrington, I. J. 1989. Corn growth response to temperature: rate and duration of leaf emergence. *Agron. J.* 81: 696-701.
- Hsiao, T. C. 1973. Plant response to water stress. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 24: 519-570.
- Hsiao, T. C., Fereres, E., Acevedo, E. and Henderson, D.W. 1976. Water stress and dynamics of growth and yield of crop plants. *In:* Lange, O.L., Kappen, I. and Schulze, E.D. eds.. *Water and plant life, problems and modern approaches.* Berlin, Springer-Verlag, *Ecological Studies* N° 19. pp. 281-305.
- Huggins, D. R. and Pan, W.L. 1993. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity. *Agron. J.* 85:898-905.
- Hunt, R. 1978 . *Plant growth analysis.* London, Edward Arnold
- Hunt. R. 1982 . *Plant growth curves. The functional approach to plant growth analysis.* London, Edward Arnold
- Hunt, L. A. and Poorten, G.van der. 1985. Carbon dioxide exchange rates and leaf nitrogen contents during ageing of the flag and penultimate leaves of five spring wheat cultivars. *Can. J. Bot.* 63: 1605 –1609.
- Hunter, R. B., Hunt, L. A. and Kannenberg, L. W. 1974. Photoperiod and temperature effects on corn. *Can. J. Plant Sci.* 54: 71-78.

- Idso, R. J., Jackson, R. D., Pinter, P. J. jr., Reginato, J. and Hatfield, J. L.. 1981a. Normalizing the stress-degree-day parameters for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24: 45-55.
- Idso, R. J., Jackson, R. D. and Reginato, R. J. 1977. Remote sensing of crop yields. *Science*. 196: 19-25.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 1972. Carta de suelos de la República Argentina. Centro de Investigación de Recursos Naturales. Hoja 3360-32: Pergamino. Buenos Aires, INTA. 106 p.
- ITAP. 1998. Servicio de Asesoramiento de Riegos. 1998. Instituto Técnico Agronómico Provincial. Albacete, España. Boletín N° 35.
- Jackson, R. D., Reginato, R. J. and Idso, R. J. 1977. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resour. Res.* 13: 651-656.
- Jackson, R. D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. *In: Advances in Irrigation*. Vol.1. Madison, Wis.,ASA. CSSA. SSSA.
- Jackson, W. A., Pan, W. L., Moll, R. H. and Kamprath, E. J. 1986. Uptake, translocation and reduction of nitrate. *In: Neyra, C. A. ed. Biochemical basis of plant breeding*. Vol. 2. Nitrogen metabolism. Boca Raton, FL., CRC Press. pp. 95-98
- Jamieson, P. D., Brooking, I. R., Porter, J. R. and Wilson, D. R. 1995. Prediction of leaf appearance in wheat: a question of temperature. *Field Crop Res.* 41: 35-44.
- JCRMO. 2000. El acuífero libre de contaminación por nitratos. *Agua. Boletín Informativo de la Junta Central de Regantes de La Mancha Oriental* 1: 15, Albacete, España.
- Jokela, W. E. and Randall, G. W. 1989. Corn yield and residual soil nitrate as affected by time and rate of nitrogen application. *Agron. J.* 81: 720-726.
- Jones, C. A., and Kiniry, Gengenbach, B. G., and Cardweell, V. H. 1981. Temperature effects on in vitro kernel development of maize. *Crop Science*, 21: 761-766.
- Jones, R. J., Roessle, J. and Ouattar, S. 1985. Thermal environment during endosperm cell division in maize: effect on number of endosperm cells and starch granules. *Crop Sci.* 25: 830.834.
- Jones, C. A. and Kiniry, J. R. 1986. CERES-maize. A simulation of maize growth and development. Texas, A&M Univ. Press.
- Jones, H. G. 1980. Interaction and integration of adaptative responses to water stress: the implications of an unprecictable environment. *In: Turner, N.C. and Framer, P.J. eds. Adaptation to plants to water and high temperature stress*. Chichester, John Wiley and Sons. pp.353-365
- Jones, J. W. and Ritchie, J.T. 1991. Crop growth models. *In: Training Program on Computer Simulation for Crop Growth and Nutrient Management*, Alabama, 1991.
- Jordan, W. R. 1983. Limitations to Efficient Water Use in Crop Production. Madison, Wis. ASA. CSSA. SSSA.
- Jurgens, S. K., johnson, R. R., and Boyer, J. S. 1978. Dry matter production and translocation in maize subjected to drought during grain filling. *Agron. J.* 70: 678-682.
- Kaluli, J. W., Madramootoo, C. A., Zhou, X., Mackenzie, A. F. and Smith, D. L. 1999. Subirrigation systems to minimize nitrate leaching. *J. Irrig. Drain. Eng.* 125 (2): 52-58.

- Karlen, D. L., Flannery, R. L. and Sadler, E. J. 1988. Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. *Agron. J.* 80: 232-242.
- Katyal, J. C., Sirligh, B., Vleck, P. L. G. and Crasweel, E. T. 1985. Fate and efficiency of nitrogen fertilizer applied to wetland rice. II. Punjab, India. *Fertil. Res.* 6: 279-290.
- Keeney, D. R. 1986. Sources of nitrate to ground water. *CRC Critical Rev. Envir. Control* 16: 257-304.
- Keeney, D. R. 1989. Sources of nitrate to groundwater. *In*: Follet, R.F. ed. Nitrogen management and groundwater protection. Developments in agricultural and managed-forest ecology.. New York, N.Y, Elsevier. pp.23-34
- Keeney, D. R. and Follett, R. F. 1991. Managing nitrogen for ground water quality and farm profitability: overview and introduction. *In*: Follett, R.F., Power, J. F., Meisinger, J. J., Schepers, J. S. and Smith, S. J. (eds). Managing nitrogen for ground-water quality and farm profitability. Madison, Soil Science Society of America. pp.1-7.
- Ketring, D. L. and Wheless, T. G. 1989. Thermal time requirements for phenological development of peanut. *Agron. J.* 81: 910-917.
- Kiesselbach, T. A. 1950. Progressive development and seasonal variations of the corn crop. Nebraska. Agricultural Experimental Station. Research Bulletin N° 166.
- Kiniry, J. R. and Bonhomme, R. 1991. Predicting maize phenology. *In*: T. Hodges (ed.), Predicting crop phenology. Boca Raton, Ann Arbor., CRC Press. pp. 115-131.
- Kiniry, J. R. and Ritchie, J. T. 1985. Shade intensive interval of kernel number of maize. *Agron. J.* 77:711-715.
- Kiniry, J. R. Jones, C. A., O'Toole, J. C., Blanchet, R., Cabelguenne, M. and Spanel, D. A. 1989. Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain filling for five grain crop species. *Field Crops Res.* 20: 51-64.
- Kiniry, J. R. 1991. Maize phasic development. *In*: Hanks, J. and Ritchie, J.T. eds.. Modeling plant and soil systems. Madison, Wis., ASA-CSSA-SSSA. Agronomy Monograph. 31: 55-70.
- Kiniry, J. R. and Knievel, D. P. 1995. Response of maize seed number to solar radiation intercepted soon after anthesis. *Agron. J.* 87:228-234.
- Kiniry, J. R., Ritchie, J. T., Musser, R. L., Flint, E. P. and Iwig, W. C. 1983a. The photoperiod sensitive interval in maize. *Agron. J.* 75: 687-690.
- Klute, A. 1986. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd.ed. Madison, Wis. ASA-CSSA-SSSA.
- Law, R. and Cooper, P. J. M. 1976. The effect and importance of soil temperature in determining the early growth rate and final grain yields of maize in Western Kenya. *East Afr.Agric. For. J.* 41(3):189-200.
- Lemaire, F. 1975. Action comparée de l'alimentation azotée sur la croissance du système racinaire et des parties aériennes des végétaux. *Ann. Agron.* 26: 59-74.
- Lemaire, G., Cruz, P., Gosse, G. and Chartier, M., 1985. Etude des relations entre la dynamique de prélèvement d'azote et la dynamique de croissance en matière sèche d'un peuplement de luzerne (*Medicago sativa* L.). *Agronomie* 5: 685 – 692.
- Lemaire, G. and Chartier, J. M. 1992. Relationships between growth dynamics and nitrogen uptake for individual sorghum plants growing at different plant densities. *In*. ESA Congress, 2nd. Warwick Univ., 1992. Proceedings. pp.98-99

- Lemcoff, J. H., and Loomis, R. S. 1986. Nitrogen influences on yield determination in maize. *Crop. Sci.* 26:1017-1022.
- Loomis, R. S. and Connor, D. J. 1992. *Crop ecology: productivity and management in agricultural systems.* Cambridge University Press, London, UK.
- López Fuster, P. 2000. *Los regadíos de la Mancha Oriental. Una quimera hecha realidad.* Albacete, Instituto Técnico Agronómico Provincial y Caja de Castilla-La Mancha, Albacete, España.
- López Rita, J. 1990. *El diagnóstico de suelos y plantas.* Mundi-Prensa. Madrid.
- Ludlow, M. M. 1987. Defining shoot water status in the most meaningful way to relate to physiological processes. *In:* Hanks, R. J. and Brown, R. W. (eds). *Measurement of soil and plant water status.* Int. Conf., Logan, UT. 1987. Utah State University. pp.47-53
- Ma, B. L., Dywer, L. M. and Gregorich, E. G. 1999. Soil nitrogen amendment effects on nitrogen uptake and grain yield of maize. *Agron. J.* 91: 650-656.
- Ma, B. L. and Dywer, L. M. 2001. Maize kernel moisture, carbon, and nitrogen concentrations from silking to physiological maturity. *Can. J. Plant Sci.* 81: 225-232.
- Machet, J. M., Pierre, D., Recous, S., Rémy, J. C. 1987. Signification du coefficient réel d' utilisation et conséquences pour la fertilisation azotée des cultures. *C. R. Acad. Agric. Fr.* 73: 39-55.
- Machet, J. M. 1993. Le bilan. *In:* Séminaire du COMIFER, Paris, France, 1993. Recueil complet des différentes interventions.
- MacKay, A. D. and Barber, S. A. 1986. Effect of nitrogen on root growth of two corn genotypes in the field. *Agron. J.* 78: 699-703.
- Maddoni, G. A., Otegui, M. E., and Bonhomme, R. 1998. Grain yield components in maize. II Postsilking growth and kernel weight. *Field Crop Res.* 56: 257-264.
- Major, D. J., Brown, D. M., Bootsman, A., Dupuis, G., Fairey, N. A. and Grant, E. A. 1983. An evaluation of the corn heat units system for the short-season growing regions. *Can. J. Plant Sci.* 63: 121-130.
- Major, D. J. and Schaalje, G. B. 1985. Effect of temperature on in vitro kernel growth of flint and dent maize hybrids. *Crop. Sci.* 25: 732-735.
- Maman, N., Mason, S. C., Galusha, T. and Clegg, M. D. 1999. Hybrid and nitrogen influence on pearl millet production in Nebraska: yield, growth and nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency. *Agron. J.* 91: 737-747.
- Marschner H. 1986. *Mineral nutrition in higher plants.* Academic Press, Orlando, FL, USA.
- Martin, C. and Thimann, K. V. 1972. The role of protein synthesis in the senescence of leaves. I. The formation of protease. *Plant Physiol.* 49: 64-71.
- Martin, J. K. 1987. Carbon flow through the rizosphere of cereal crops- a review. *INTECOL. Bull.* 15: 17-23.
- Martin de Santa Olalla, F.J., de Juan, J. A. y Tarjuelo, J. M. 1992. *Respuesta al agua en cebada, girasol y maíz.* Universidad de Castilla- La Mancha. Instituto Técnico agronómico provincial. Albacate, España.
- Martin de Santa Olalla, F. J. y de Juan, J. A. (coords.) 1993a. *Agronomía del riego.* Mundi-Prensa, S. A., Madrid, España.

- Martin de Santa Olalla, F. J. y de Juan, J. A. 1993b. La programación del riego. *In*:: Martin de Santa Olalla, F. J. y de Juan, J. A. (coords.). *Agronomía del riego*. Madrid, Mundi-Prensa y Universidad de Castilla-La Mancha. .pp.549-595
- Martin de Santa Olalla, F. J., de Juan, J. A. and Fabeiro, C. 1994a. Growth and production of onion crop under different irrigation scheduling. *Eur. J. Agron.* 3 (1): 85-92.
- Martín de Santa Olalla, F. J., de Juan, J. A. and Fabeiro, C. 1994b. Growth and yield analysis of soybean under different irrigation schedules in Castilla-La Mancha, Spain. *Eur. J. Agron.* 3(3): 187-196.
- Maturano, M. 1996. Informe interno de beca. Estación Experimental Agropecuaria. INTA. Pergamino, Buenos Aires, Argentina.
- Maturano, M., Guevara, E. R., Meira, S. y Coca, G. 1997. Criterios de irrigación en el cultivo de maíz. Eficiencia en el uso del agua. *In*: Congreso Nacional de Maíz, 6º Pergamino, Argentina.
- Mary, B. 1997. N hazards to crops and environment. *In*: Lemaire, G. (ed.) *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Berlin, Springer-Verlag. pp.229-235.
- McCullough, D. E., Aguilera, A. and Tollenaar, M.. 1994. N uptake, N partitioning and photosynthetic N-use efficiency of an old and a new maize hybrid. *Can. J. Plant Sci.* 74: 479-484.
- Meira, S., Guevara, E. R., Maturano, M., Coca, G. and Ostojic J. 1999. Maize modelling: a tool for fertilization strategy in the corn belt of Argentina. *In*: International Symposium Modelling Cropping Systems. Lérida, Spain, 1999.
- Melgar, R., Camozzi, M. E. y Figueroa, M. 1999. Boletín trimestral mercado de fertilizantes. octubre-diciembre 1999. Pergamino, Proyecto Fertilizar/ INTA, Pergamino, Argentina. 6p.
- Michelena, V. A. and Boyer, J. S. 1982. Complete turgor maintenance at low water potentials in the elongation region of maize leaves. *Plant Physiol.* 69: 1145-1149.
- Millard, P. 1988. The accumulation and storage of nitrogen by herbaceous plants. *Plant, Cell and Environment* 11: 1-8.
- Moll, R. H., Kamprath, E. J. and Jackson, W. A.. 1982. The potential for genetic improvement in nitrogen use efficiency in maize. *Proc. Ann. Corn and Sorghum Indus. Res. Conf.* 37:163-175.
- Monteith, J. I. 1996. The quest for balance in crop modelling. *Agron. J.* 88: 704-716
- Monteleone, M., Gherbin, P. e Quaglietta Chiaranda, F. 1996. Analisi funzionale di crescita di un ibrido di sorgo da cellulosa sottoposto a diversi regimi irrigui: I) approccio metodologico. *Riv. di Agron.* 30(1): 44-49.
- Moreno, F., Cayuela, J. A., Fernández, J. E., Fernández-Boy, E., Murillo, J. M. and Cabrera, F. 1996. Water balance and nitrate leaching in an irrigated maize crop in SW Spain. *Agric. Water Manag.* 32: 71-83.
- Moss, G. I. and Downey, L. A. 1971. Influence of drought stress of female gametophyte development in corn (*Zea mays* L.) and subsequent grain yield. *Crop Sci.* 11:368-373.
- Muchow, R. C. 1985. An analysis of the effects of water deficits on grain legumes grown in a semi-arid tropical environment in terms of radiation interception and its efficiency of use. *Field Crops Res.* 11:309-323.

Muchow, R. C. and Davis, R. 1988a. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. II. Radiation interception and biomass accumulation. *Field Crops Res.* 18: 17-30.

Muchow, R. C. 1988b. Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. III. Grain yield and nitrogen accumulation. *Field Crops Res.* 18: 31-43.

Muchow, R. C., Sinclair, T. R. and Bennet, J. M. 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yields across locations. *Agron. J.* 82:338-343.

Muchow, C. and Sinclair, R. 1995. Effect of nitrogen supply on maize yield: II. Field and model analysis. *Agron. J.* 87: 642-648.

Murata, Y. 1981. Dependence of potential productivity and efficiency for solar energy utilization on leaf photosynthetic capacity in crop species. *Japanese. J. Crop Sci.* 50:223-232.

Murillo, J. M., Moreno, F., Cabrera, F. and Castro, C. 1992. Crop response to two fertilization rates under SW Spain conditions. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23 (15 / 16): 1767-1779.

Musick, J. T. and Dusek, D. A. 1980. Irrigated corn yield response to water. *Trans. ASAE.* 23:92-98.

Ne Smith, D. S. and Ritchie, J. T. 1992. Short- and long term response of corn to preanthesis soil water deficit. *Agron. J.* 84: 107-113.

Newman, E. L. 1966. A method of estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.* 3:139-145

Noggle, G. R. and Fritz, G. J. 1984. *Fisiologia vegetale.* Ed. G. Laudi. Edagricole, Bologna. Italia.

Novoa, R. and Loomis, R. S. 1981. Nitrogen and plant production. *Plant and Soil.* 58:177-204.

Oikeh, S. O., Kling, J. G., Horst, W. J., Chude, V. O. and Carsky, R. J. 1999. Growth and distribution of maize roots under nitrogen fertilization in plinthite soil. *Field Crops Res.* 62: 1-13.

Omanga, P. A. and Summerfield, A. 1995. Flowering of pigeonpea (*Cajanus cajan*) in Kenya: responses of early-maturing genotypes to location and date of sowing. *Field Crops Res.* 41: 25-34.

Ortega, J. F., Tarjuelo, J. M., de Juan, J. A., López, H. y Fernández, D.. 1997. Servicio de Asesoramiento de Riegos de Albacete. ITEA, 93 (3): 178-183

Otegui, M. E, Nicolini, M. G., Ruiz, R. A. and Dodds, P. A. 1995b. Sowing date effects on grain yield composition of different maize genotypes. *Agron. J.* 87: 29-33.

Otegui, M. E. and Bonhomme, R. 1997. Grain yield components in maize. I. Ear growth and kernel set. *Field Crops Res.* 56 : 247-256.

Otegui, M. E. and Melón, S. 1997. Kernel set and flower synchrony within the ear of maize:I. Sowing date effects. *Crop Sci.* 37: 441-447.

Otegui, M. E. 1997. Kernel set and flower synchrony within the ear of maize:II. Plant population effects. *Crop Sci.* 37:448-455.

- O'Toole, N. C., Turner, O., Namuco, P., Dingkuhn, M. and Gomez, K. A. 1984. Comparison of some crop water stress measurement methods. *Crop Sci.* 24: 1121-1128.
- Overman, A. R., Wilson, D. M. and Kamprath, E. J. 1994. Estimation of yield and nitrogen removal by corn. *Agron. J.* 86: 1012-1016.
- Oyarzábal, E., Rebella, C. M. y Frutos, E. 1980. Influencia del clima sobre la producción de maíz del partido de Pergamino. In: Congreso Nacional del Maíz, 2º. Pergamino, 1980. pp 201 – 210.
- Pandey, R. K., Maranville, J. W. and Admou, A. 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. I. Grain yield and yield components. *Agric. Water Management* 46 :1-13.
- Pandey, R. K., Maranville, J. W. and Chetima, M. M. 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. II. Shoot growth, nitrogen uptake and water extraction. *Agric. Water Manag.* 46 :15-27.
- Papakosta, D. K. and Gagianas, A. A. 1991. Nitrogen and dry matter accumulation, remobilization, and losses for Mediterranean wheat during grain filling. *Agron. J.* 83: 864-870.
- Passioura, J. B. 1996. Simulation models: science, snake oil, education or engineering. *Agron. J.* 88: 704-716
- Pearson C. J. and Jacobs, B. C. 1987. Yield components and nitrogen partitioning of maize in response to nitrogen before and after anthesis. *Aust. J. Agric. Res.* 38: 1001-1009.
- Pecorari, C. A. y Balcaza, L. F. 1988. Influencia de los horizontes B2 sobre el consumo de la reserva de agua útil en los suelos del área maicera típica. INTA. Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. Informe técnico N° 215.
- Pellerin, S. et Tardieru, F. 1990. Variabilité du nombre de racines adventives émises: effet du génotype et des conditions de croissance. In: Colloque sur la Physiologie du Maïs. Pau, France. 1990 Paris, INRA.
- Pereira, L. S., Gilley, J. R. and Jensen, M. E. 1999. Research agenda on sustainability of irrigated agriculture. *J. Irrig. Drain. Eng.* 122: 172-177.
- Perumal, N. K. and Sahota, T. S. 1986. Investigations on growth and tuberization of potato at different planting dates and nitrogen levels. *Int.J. Trop. Agric.* 4(1): 63-72.
- Phene, C. J., Reginato, R. J., Itier, B. and Taschner, B. R. 1990. Sensing irrigation needs. In: Management of farm irrigation Systems, eds. G. J. Hoffman, T. A. Howell and K. H. Solomon. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Pierce, F.J. and Rice, C. W. 1988. Crop rotation and its impact on efficiency of water and nitrogen use. In: Hargrove, W. L. ed. Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen. Madison, Wis., ASA, CSSA, and SSSA, Special Publ. N°51 pp.21-42
- Piovarci, A. and Vidovic, J. 1973. Leaf angle in corn (*Zea mays* L.) breeding. In: Meeting Eucarpia, 7º. Zagreb, Yugoslavia. 1973. Proceedings.
- Plénet, D., Lubet, E., Desvignes, P. and Girardin. 1990a. Effects of splitting of N-applications on N-uptake and grain yield of irrigated maize crop. In: Congress of European Society for Agronomy .Paris, France. 1990. Proceedings. Session 1. p. 34.
- Plénet, D. 1995. Fonctionnement des cultures de maïs sous contrainte azotée. Détermination et application d'un indice de nutrition. Thèse de Docteur, INPL, Nancy, France. Université. 115 pp.

- Plett, S. 1992. Comparaison of seasonal thermal indices for measurement of corn maturity in a prairie environment. *Can. J. Plant Sci.* 72: 1157-1162.
- Pratt, P. F. 1984. Nitrogen use and nitrate leaching in irrigated agriculture. *In*: Hauckced, R. D.. Nitrogen in crop production. Madison, Wis.,ASA,/CSSA/ SSSA, pp.319-333.
- Prince, S. D. 1991. A model of regional primary production for use with course resolution satellite data. *Int. J. Remote Sen.* 12: 1313-1330.
- Prioul, J. L., Reyss, A. et Scweebel-Dugue, N. 1990. Metabolisme carboné dans les feuilles souces lors de la phase de remplissage des grains: recherche de criteres de remobilisation et de senescence. *In*: Colloque sur la Physiologie du Mais. Pau, France, 1990. Paris, INRA
- Radin, J. W. 1983. Control of plant growth by nitrogen: differences between cereals and broadleaf species. *Plant, Cell, and Environ.* 6:65-68.
- Radin, J. W., Mauney, J. R. and Kerridge, P.C. 1991. Effects of nitrogen fertility on water potential of irrigated cotton. *Agron. J.* 83:739-743.
- Radford, P. J. 1967. Growth analysis formulae. Their use and abuse. *Crop Sci.* 7:171-175.
- Rana, G., Mastroilli, M. e Ripa, V. F. 1995. Bilancio radiativo e produttività di una coltura di sorgo zuccherino (*Sorghum vulgare* L. var. *saccharatum*). *Riv. di Agron.* 29(3): 220-227.
- Rao, A. C. S., Smith, J. L., Papendick, R. I. and Parr, J. F. 1991. Influence of added nitrogen interactions in estimating recovery efficiency of labeled nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:1616-1621.
- Rawls, W. L., Brakensiek, D. L. and Saxton, K. E.. 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE* 25:1316-1320.
- Rawls, W. L., Gish, T. J. and Brakensiek, D. L. 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Adv. Soil. Sci.* 16: 213-234.
- Reed, A. J., Below, F.E. and Hageman, R.H. 1980. Grain protein acumulation and the relationship between leaf nitrate reductase and protease activities during grain development in maize (*Zea mays* L). I: Variation between genotypes. *Plant Physiol.* 66: 164-170.
- Reedy, V. H. and Daynard, T. B. 1983. Endosperm characteristics associated with rate of grain filling and kernel size in corn. *Maydica.* 28: 339-355.
- Reddy, K. S., Mills, H. A. and Jones, J. B. Jr. 1991. Corn responses to post tasseling nitrogen deprivation and to various ammonium/nitrate ratios. *Agron. J.* 83: 201-203.
- Reicosky, D. C. and Heatherly, L. G. 1990. Soybean. *Agronomy 1990.* N° 30, 639-674. *In*: Irrigation of agricultural crops. Stewart, B. A., and Nielsenn, D. r. (eds). USDA. ARS. MWA.
- Richards, L. A. 1947. Pressure-membrane apparatus construction and use. *Agri. Engin.* 28: 451-454, 460.
- Richards, L. A. 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Sci.* 66: 105-110.
- Ritchie, S. W. and Hanway, Y. J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. Iowa Special Report N° 48.
- Ritchie, J. T. and NeSmith, D. S. 1991. Temperature and crop development. *In*: Hanks, J. and . Ritchie, J. T. eds.. Modeling plant and soil systems. Madison, Wis.,ASA-CSSA-SSSA. *Agronomy Monograph* 31:5-29.

- Ritter, W. F. 1989. Nitrate leaching under irrigation in the United States- A review. *J. Env. Soil Health* A24: 349-378.
- Robins, J. S. and Domingo, C. E. 1953. Some effects of severe soil moisture deficits at specific growth stages in corn. *Agron. J.* 45: 618-621.
- Romero, R y L. Zúnica. 1993. Estadística. Diseño de experimentos. Modelos de regresión. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Rood, S. B. and Major, D. J. 1980. Response of early corn inbreds to photoperiod. *Crop Sci.* 20: 679-682.
- Rosenthal, W. D., Arkin, G.F., Shouse, P. J. and Jordan, W. R. 1987. Water deficit effects on transpiration and leaf growth. *Agron. J.* 79: 1019- 1026.
- Rosielle, A. A. and Frey, K. J. 1975. Estimates of section parameters associated with harvest index in oat lines derived from a bulk population. *Euphytica* 24: 121-131.
- Ruget, F. 1989. Relations entre matiere seche a la floraison et rendement en grains chez le maïs: importance du rayonnement disponible par plante. *Agronomie* 9:457-465.
- Ruget, F., Bonhomme, R. and Varlet-Grancher, C. 1990. Analyse de la fonction de photosynthese dans CERES-maize. In: Colloque Physiologie et Production de Maïs, Pau, France, 1990. Paris, INRA. pp.445-453
- Ruget, F. 1991. Présentation d'une méthode simple d'estimation de la contribution de réserves pour le remplissage des grains chez le maïs. *Agronomie* 11: 505-510.
- Russelle M. P., Hauck, R. D., Olson, R. A. 1983. Nitrogen accumulation of irrigated maize. *Agron. J.* 75: 593-598.
- Sadler, E. J., Bauer, P. J. and Busscher, W. J. 2000. Site-specific analysis of a droughted corn crop: I. Growth and grain yield. *Agron. J.* 92: 395-402.
- Sadras, V. O. and Villalobos, F.J.. 1993. Floral initiation and leaf appearance in sunflower. *Field Crop Res.* 33: 449-457.
- Sainz Rozas, H. R. 1997. Fertilización nitrogenada del cultivo del maiz en siembra directa: Efecto del inhibidor de la ureasa y del momento de la aplicación del nitrógeno. Tesis. Magister Scientiae. Balcarce, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar de Plata (UNMP)
- Sánchez, L., Díez, J. A, Vallejo, M., Cartagena, M. C. and Polo, A. 1998. Estimate of mineralized organic nitrogen in soil using nitrogen balances and determinig available nitrogen by the electro-ultrafiltration technique. Application to mediterranean climate soils. *J. Agric. Food Chem.* 46: 2036-2043.
- Sánchez, J.; Boluda, R.; Artigao, A.; Morell, C.; Colomer, J.C.; Guardado, R. 1994. Suelos. En: F.J. Martín de Santa Olalla Mañas, Desertificación en Castilla-La Mancha. El Proyecto EFEDA, 106-121. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete. España.
- Santa Cruz, J. 1988. M.Characterización del recurso hídrico subterráneo con miras al riego suplementario en la región NNE maicera típica de la provincia de Buenos Aires. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura. 29 pp.
- SAS Institute. 2000. SAS user's guide: Statistics. Version 8. Cary, NC., SAS Institute
- Satorre, E. 2002. Generación del rendimiento en el cultivo de maíz: efectos de la nutrición nitrogenada. In: Jornada de Actualización Técnica para Profesionales. Rosario, Argentina. INPOFOS Cono Sur. Instituto de la Potasa y el Fósforo.

- Scholander P. F., Hammel, H. T., Bradstreet, E. D. and Hemmingsen, E. A. 1965. Sap pressures in vascular plants. *Science* 148: 339-346.
- Schulsser, J. R. and Westgate, M. E. 1991. Maize kernel set at lower potential:I. Sensitivity to reduced assimilates during early kernel growth. *Crop Sci.* 31: 1196-1203.
- Schulsser, J. R. and Westgate, M. E. 1991. Maize kernel set at lower potential:II. Sensitivity to reduced assimilates at polination. *Crop Sci.* 31: 1189-1195.
- Schulsser, J. R. and Westgate, M. E. 1994. Increased assimilate reserves does not prevent kernel abortion at low water potential in maize. *Crop Sci.* 34: 1569-1576.
- Schulze, E. D. 1986. Whole-plant responses to drought. *Aust. J. Plant Physiol.* 13:127-141.
- Scott, H. D. and Batchelor, J. T. 1979. Dry weight and leaf area production rates of irrigated determinate soybeans. *Agron. J.* 71: 776-782.
- Secker, D., Barker, R. and Anarasinghe, V. 1999. Water scarcity in the twenty-first century. *J. Water Res. Dev.* 15: 29-42.
- Shaykewich, C. F. 1995. An appraisal of cereal crop phenology modeling. *Can. J. Plant Sci.* 75: 329-341.
- Sieling, K., Gunther-Borstel, O. and Hanus, O. 1997. Effect of slurry applications and mineral nitrogen fertilization on N leaching in different crop combinations. *J. Agric. Sci.* 128: 79-86.
- Simmons, S. R. and Jones, R. J. 1985. Contributions of pre-silking assimilate to grain yield in maize. *Crop Sci.* 25: 1004-1006.
- Sinclair, T. R., Tanner, C. B. and Bennet, J. M. 1984. Water-use efficiency in crop production. *BioScience* 34: 36-40.
- Sinclair, T. R. and Horie, T. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: A review. *Crop Sci.* 29:90-98.
- Sinclair, T. R. and Seligman, N. G. 1996. Crop modelling: from infancy to maturity. *Agron. J.* 88 :696 - 704.
- Smith, S. J. and Sharpley, L. 1990. Soil nitrogen mineralization in the presence of surface and incorporates crop residues. *Agron. J.* 82: 112-116.
- SPSS Inc. 1999. SPSS Base 10.0 Syntax Reference Guide. SPSS Inc. (Ed), Chicago, ILL, USA.
- Srinivas, K. and Hegde, D. M. 1984. Growth analysis of capsicum (*Capsicum annuum* L.) cultivars in relation to plant spacing. *Singapore J. Primary Ind.* 12: 152-158.
- Steele, D. D., Stegman, E. C. and Gregor, B. L. 1994. Field comparison of irrigation scheduling methods for corn. *Trans. ASAE.* 37: 1197-1203.
- Swank, J. C., Below, F. E., Lambert, R. J. and Hageman, R. H. 1982. Interaction of carbon and nitrogen metabolism in the productivity of maize. *Plant Physiol.* 70: 1185-1190.
- Swanson, S. P. and Wallace W. W. 1996. Planting date and residue effects on growth, partitioning, and yield of corn. *Agron. J.* 88: 205-210.
- Ta, C. T. and Weiland, R. T. 1992. Nitrogen partitioning in maize during ear development. *Crop Sci.* 32: 443-451.

- Tardieu, F. et Bethenod, O. 1990. Quels indicateurs de fonctionnement hydrique des plantes permettent de rendre compte des variations de rendement du maïs?. *In*: Colloque sur la Physiologie du Maïs. Pau, France. 1990. Paris, INRA.
- Tardieu, F. and Katerji, N. 1991. Plant response to soil water reserve: consequences of the root system environment. *Irrig. Sci.* 12: 145-152.
- Tardieu, F., Zhang, J., Katerji, N., Bbethenod, O., Palmer, S. and Davies, W.J. 1992. Xylem ABA controls the stomatal conductance of field-grown maize subjected to soil compaction or soil drying. *Plant, Cell and Environment.* 15: 193-197.
- Teocharopoulos, S. P., Kasayianni, M., Gatzogiani, P., Afentaki, A. and Aggelides, S. 1993. Nitrogen leaching from soils in the Kopais area of Greece. *Soil Use Mangement* 9: 76-84.
- Tetio-Kagho, F. and Gardner, F. P. 1988. Response of maize to plant population density. I. Canopy development, light relationships, and vegetative growth. *Agron. J.* 80: 930-934.
- Thimann, K. V. 1980. The senescence of leaves. *In*: Thimann, K. V. (ed.) *Senescence in plants*. Boca Raton, Fl., CRC Press. pp.85-116
- Thomas, H. and Stoddart, J. L. 1980. Leaf senescence. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31: 83-111.
- Thorntwaite, C. W. 1948. An approach toward a traditional classification of climate. *Geog. Rev.* 38: 55-94.
- Tisdale, S. L., Nelson, W. L., Beaton, J. D. and Havlin, J. L.. 1993. *Soil fertility and fertilizers*. 5th. Ed. New York, Macmillan Publishing Co.
- Tollenaar, M. 1977. Sink-source relationships during reproductive development in maize: A review. *Maydica* 22:49-75.
- Tollenaar, M. and Daynard, T. B. 1978. Effect of defoliation on kernel development in maize. *Can. J. Plant Sci.* 58:207-212.
- Tollenaar, M., Muldoon, T. B. and Hunter, R. B. 1979. Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. *Crop Sci.* 19:363-366.
- Tollenaar, M. and Hunter, R. B. 1979. A photoperiod and temperature sensitive period for leaf number of maize. *Crop Sci.* 23:457-460.
- Tollenaar, M. and Migus, W. 1984. Dry matter accumulation of maize grown hydroponically under controlled environment and field conditions. *Can. J. Plant Sci.* 64: 475-485.
- Tollenaar, M. 1986. Seeking the upper limit of corn productivity. *Better Crops Plant Food* 70: 6-8.
- Tollenaar, M. and Bruuselma, T. W. 1988. Efficiency of maize dry matter production during periods of complete leaf area expansion. *Agron. J.* 80: 580-585.
- Tollenaar, M. 1990. The influence of developmental patterns on grain yield of maize. *In*: Sinha, S. K. (ed.) *International. Congress of Plant Physiology*. New Delhi, India, 1990. pp181-193.
- Tollenaar, M. 1991. Physiological basis of genetic improvement of maize hybrids in Ontario from 1959 to 1988. *Crop Sci.* 31: 119-124.
- Tollenaar, M., Dwyer, L. M. and Stewart, D. W. 1992. Ear and kernel formation in maize hybrids representing three decades of grain yield improvement in Ontario. *Crop. Sci.* 32:432-438.

- Tollenaar, M. and Aguilera, A. 1992. Radiation use efficiency of an old and new maize hybrid. *Agron. J.* 84: 536-541.
- Tomassone, R., Lesquoy, E., and Miller, C. 1983. La régression. Nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique. INRA, Actualités Scientifiques et technique n°13. Masson, Paris, 180p.
- Totis de Zeljkovich, L. E., Rebella, C. M. y Golberg, A. D. 1980. La evapotranspiración potencial en la región de Pergamino, medición y cálculo. *In: Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo, 9a, Paraná, 1980. Actas. . t.I, pp. 63-71.*
- Totis de Zeljkovich, L. E., Rebella, C. M., y Frutos, E. 1984. Probabilidades de deficiencias y excesos hídricos para el cultivo de maíz en la región de Pergamino. *In: Congreso Nacional de Maíz, 3º. Pergamino, 1984. A.I.A.N.B.A, Pergamino, Argentina.*
- Totis de Zeljkovich, L. E.; Frutos, E., Funston, L. y Améndola, C. 1991. Tendencias de temperaturas máximas y mínimas del aire para la localidad de Pergamino y su relación con la productividad del maíz. *In: Congreso Argentino de Agrometeorología, 6º, Buenos Aires, 1991. Actas.*
- Totis de Zeljkovich, L. E; Zeljkovich, V. J.; Blotta, L. A. Y Hansen, O. M. 1992a. Evaluación de sistemas de manejo continuados. I. Efecto sobre los rendimientos del cultivo de maíz integrando la secuencia maíz-trigo/soja en Pergamino. *In: Congreso Nacional de Maíz, 5º, Reunión Suramericana, 2º, Pergamino, 1992. Actas. Pergamino, A.I.A.N.B.A. t.2, pp. 195-206*
- Totis de Zeljkovich, L. E; Zeljkovich, V. J.; Blotta, L. A. Y Hansen, O. M. 1994. Requerimiento de agua del cultivo de maíz y de la secuencia trigo-soja en la región de Pergamino. Incidencia de las deficiencias hídricas en los rendimientos. *In: Riego Complementario en Cultivos Agrícolas en el norte de la Prov. de Bs. As. INTA. EEA Pergamino.*
- Totis de Zeljkovich, L. E., Zeljkovich, V. J. y Pérez, O. G. 1997b. Programación del riego para el cultivo de maíz en la región pampeana. *In: Congreso Nacional de Maíz, 6º, Pergamino, 1997.*
- Totis de Zeljkovich, L. E. Requerimientos agroclimáticos del cultivo de maíz. Determinación de las necesidades de riego. *In: Eyherabide, G. (ed.) El cultivo del maíz. (en prensa).*
- Tsai, C.Y., Huber, D. M. and Warren, H. L. 1978. Relationship of the kernel sink for N to maize productivity. *Crop Sci.* 18: 399-404.
- Tsai, C. Y, Huber, D. M. and Warren, H. L. 1980. A proposed role of zein and glutelin as N sinks in maize. *Plant Physiol.* 66: 330-333.
- Tuckey J. W. 1974. One degree of freedom for non-additivity. *Biometrics* 5, 232-242.
- Uarth, S. A., and Andrade, F. H. 1995. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. *Crop Sci.* 35: 1376-1383.
- Vallejo, A., Cartagena, M. C., Caballero, R. and Diez, J. A. 1996. Effect of irrigation systems and type of nitrogenous fertilizers in the grain yield and N-uptake on a maize crop. *In: Rodríguez-Barrueco, C. (ed.) Fertilizer and environment. Amsterdam, The Netherlands. Kluwer Academic Publishers. pp.249-251*
- Varlet-Grancher, C. 1982. Analyse du rendement de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. Thèse Docteur Sci. Nat. Orsay. Université Paris-Sud. 144 p.
- Varlet-Grancher, C., Gosse, G., Chartier, M., Sinoquet, H., Bonhomme, R. et Allirand, J. M. 1989. Mise au point; rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie* 9: 419- 439.

- Wang, J. Y. 1969. A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology*. 41: 785-790.
- Wardlaw, I. F. 1990. The control of carbon partitioning in plants. *New Phytol.* 116: 341-381.
- Warrington, I. J. and Kanemasu, E. T. 1983a. Corn growth response to temperature and photoperiod: I. Seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. *Agron. J.* 75:749-754.
- Warrington, I. J. and Kanemasu, E. T. 1983b. Corn growth response to temperature and photoperiod: II. Leaf initiation and leaf appearance rates. *Agron. J.* 75:755-761.
- Watson, D. J. 1952. The physiological basis of variation in yield. *Adv. Agron.* 4: 101-130.
- Watson D. J. 1956. Leaf growth in relation to crop yield. *In:* Milthorpe, F.L. (ed.). *Growth of Leaves*. Butterworths, London, UK. pp.178-191
- Watson, D. J. 1963. Some features of crop nutrient. *In:* Ivisn, J.D. and Milthorpe, F.L. (eds.), *The growth of the potato*. Butterwoths, London, UK. pp.233-247
- Westgate, M. E. and Boyer, J.S. 1985. Carbohydrates reserves and reproductive development at low leaf water potentials in maize. *Crop Sci.* 25: 762-769.
- Westgate, M. E. and Boyer, J.S. 1986a. Silk and pollen water potentials in maize. *Crop Sci.* 26: 946-951.
- Westgate, M. E. and Boyer, J.S. 1986b. Reproduction at low silk and pollen water potentials in maize. *Crop Sci.* 26: 951-956.
- Westgate, M. E. and Thomson Grant, D. 1989. Water deficits and reproduction in maize: Response of the reproductive tissue to water deficits at anthesis and mid-grain fill. *Plant Physiol.* 91: 862-867.
- Wetselaar, R. and Farquhar, G. D.. 1980. Nitrogen losses from ntops of plants. *Adv. Agron.* 33: 263-302.
- Wiegand, C. L., Richardson, A.J., Escobar, D. E. and Gerbermann, A. R. 1991. Vegetation indices in crop assessment. *Remote Sens. Environm.* 35:105-119.
- Wienhold, B. J., Trooien, T. P. and Reichman, G. A. 1995. Yield and nitrogen use efficiency of irrigated corn in the northern great plains. *Agron. J.* 87: 842-846.
- Wiesler, F. and Horst, W. J. 1993. Differences among maize cultivars in the utilization of soil nitrate and the related losses of nitrate through leaching. *Plant Soil* 151: 193-203.
- Wilson, J. H., Clowes, M. and Allison, J. C. S. 1973. Growth and yield of maize at different altitudes in Rhodesia. *Ann. Appl. Biol.* 73: 77-84.
- Wilson, D. R., Muchow, R. C. and Murgatroyd, C. J. 1995. Model analysis of temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in a cool climate. *Field Crop Res.* 43:18-24.
- Williams, W. A., Loomis, R. S. and Lepley, C. R. 1965. Vegetative growth of corn as affected by population density. I. Productivity in relation ti interception of solar radiation. *Crop. Sci.* 5: 211-215.
- Wood, C. W., Peterson, G. A., Westfall, D. G., Cole, C. V. and Willis, W. O. 1991. Nitrogen balance and biomass production of newly established no-till dryland agroecosystems. *Agron. J.* 83: 519-526.

Yusuf, R. I., Siemens, J. C., and Bullock, D. G. 1999. Growth analysis of soybean under no-tillage and conventional tillage systems. *Agron. J.* 91: 928-933.

Zeljkovich, V. J., Totis de Zeljkovich, L. E. y Blotta, L. A. 1980. Calibración de una sonda de neutrones en un suelo serie Pergamino. In: Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo, 9°, Paraná, 1980. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Paraná, Argentina. pp 73-77.

7. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos

Llegado a este momento, quiero agradecer a todas las personas e instituciones que hicieron posible el desarrollo y finalización de esta Tesis.

Este trabajo fue posible gracias a dos instituciones, una en Argentina, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), y otra en España, la Universidad de Castilla-La Mancha, a través del Centro Regional de Estudios de Agua (CREA). Al Proyecto FEDER-CICYT 1FD97-09 21-C02-01, en el marco del cual se realizó la presente Tesis Doctoral. También quiero agradecer al Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Albacete y al Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP), que me brindaron sus instalaciones e instrumental para la realización de este trabajo. A la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina (CNEA), a través de la Lic. Silvia López, quien realizó las determinaciones con ^{15}N .

A mis directores de Tesis en España, Arturo de Juan Valero, por el tiempo, paciencia, y compromiso dedicados a este trabajo, y a José María Tarjuelo por su apoyo permanente para que esta Tesis llegase a fin.

A Edgardo Guevara, mi director de Tesis en Argentina, por su ayuda en todas las etapas de la Tesis, desde sus comienzos, y por haberme transmitido el gusto por la investigación.

Haciendo un recorrido en el tiempo, este trabajo comenzó en abril 1999, en Albacete, España, y en esa etapa de trabajo de campo, y la siguiente del año 2000, gracias a la ayuda de Jesús Checa, Jesús Saiz, Rubén Morata, María Benita del Rey Martínez y Maribel Casanovas, con quienes compartí largas horas de calor, amaneceres y atardeceres en la parcela de ensayo, fue posible reunir parte de los datos que dieron contenido a esta Tesis. A Antonio Calderón, Manuel Benavidez, y Antonio Gordón, quienes colaboraron en la primer cosecha para que pudiera llegar a tiempo para sembrar el ensayo en Argentina.

La historia de esta Tesis sigue en Pergamino, Argentina, en la primavera-verano 1999-2000, donde gracias al trabajo de Gladys Coca, Marcelo Figueroa, Lito Latorre, Edgardo Guevara y Santiago Meira, quienes también me acompañaron y ayudaron en todo momento, pude reunir la otra parte de los datos; pero fundamentalmente, con quienes comencé mis primeros trabajos, y de quienes aprendí gran parte de las metodologías que utilicé en esta Tesis. También en este sentido quiero agradecer a mi compañera Lucía Totis. A Diego, Juan, Néstor, Myriam y Natalia, que de paso por INTA en ese verano de Argentina, también ayudaron en este trabajo.

El riego de la parcela experimental de Argentina fue posible gracias a la colaboración de la empresa española SALEPLAS, que desinteresadamente donó y envió todo el sistema de riego que utilizamos.

También quiero agradecer al proyecto Fertilizar, perteneciente a INTA, y a su coordinador, Ricardo Melgar; y a INPOFOS, a través de Fernando Garcia; quienes hicieron posible que se realizaran los análisis de materia vegetal y suelo en Argentina.

Quiero agradecer especialmente a Iris Ballestrasse, Luján Giannone y Nydia Elliassen, del Centro Documental de la EEA, INTA Pergamino. Iris, gracias por las búsquedas bibliográficas y por ayudarme a resolver tantos problemas que fueron

surgiendo. A Nydia y Luján, por la corrección de la bibliografía; y a todas, por su compañía en una de las etapas de redacción de este trabajo. A Catalina Améndola, del sector de Estadística de la EEA INTA Pergamino, por su ayuda en los análisis de los datos de Argentina.

A mis compañeros de despacho durante la etapa de redacción en Albacete, Helena, Lorenzo, Juan Ignacio, y Fausto. A Richi, Maria José, Roberto, Jaime, Maria, y Mercedes. A todos mis compañeros del Centro Regional de Estudios del Agua.

A mi padre, que aunque ya no esté, es quizá el motivo mas fuerte para que haya comenzado y terminado esta Tesis. A mi madre, por estar y seguir acompañándome en lo que elija. A mi hermana y mis amigos de Argentina, que siempre estuvieron conmigo, a pesar de los mas de 10 000 km.

A todos ellos, muchas gracias.

Tabla 1. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores en la producción de la materia seca total aérea (kg ha^{-1}), en las tres fechas últimas de muestreo.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación
Fecha: 13/01/2000 (R3)			
Programación de riego	Prop	12723.68a	**
	Prpc	11045.83b	
	Sec	8666.04c	
Fertilización nitrogenada	Fn	10593.68	NS
	Fi	10547.74	
	Fa	11294.13	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		
Prop	Fn	12819.43	NS
	Fi	12699.33	
	Fa	12652.26	
Prpc	Fn	10838.33	
	Fi	10391.80	
	Fa	11907.37	
Sec	Fn	8123.29	
	Fi	8552.08	
	Fa	9322.76	
Fecha: 26/01/2000 (R4)			
Programación de riego	Prop	16142.50a	*
	Prpc	15868.90ab	
	Sec	14011.40b	
Fertilización nitrogenada	Fn	13431.68a	**
	Fi	15713.97b	
	Fa	16877.17b	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		
Prop	Fn	13734.30	NS
	Fi	17644.10	
	Fa	17049.10	
Prpc	Fn	13480.10	
	Fi	16212.50	
	Fa	17914.20	
Sec	Fn	13080.60	
	Fi	13285.30	
	Fa	15668.25	

Tabla 1 (continuación). Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores en la producción de la materia seca total aérea (kg ha^{-1}), en las tres fechas últimas de muestreo.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación
Fecha: 08/03/2000 (Cosecha)			
Programación de riego	Prop	20011.54	NS
	Prpc	19696.15	
	Sec	15358.21	
Fertilización nitrogenada	Fn	16878.07	NS
	Fi	17497.11	
	Fa	20690.72	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS
Prop	Fn	17970.61	
	Fi	19947.55	
	Fa	22116.45	
Prpc	Fn	19197.45	
	Fi	18758.41	
	Fa	21132.58	
Sec	Fn	13466.16	
	Fi	13785.36	
	Fa	18823.12	

*: $p < 0.05$ **; $p < 0.01$, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha = 0.05$).
 Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha^{-1} , Fi= 90 kg N ha^{-1} , Fa= 130 kg N ha^{-1} ; R3= grano lechoso, R4= grano pastoso.

Tabla 2. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la acumulación de materia seca total particionada (kg ha^{-1}), en las tres fechas últimas de muestreo.

Factor agronómico	Nivel	Organo			
		Hoja fotosintetizadora (lámina foliar) (kg ha^{-1})	Hoja senescente (lámina foliar) (kg ha^{-1})	Tallo (tallo + vainas foliares) (kg ha^{-1})	Espiga (grano +zuro+bráctas) (kg ha^{-1})
Fecha: 13/01/2000 (R3)					
Nivel de significación		**	**	**	**
Programación de riego	Prop	2528.94 a	46.64 a	4801.88 a	2757.82 a
	Prpc	2243.63 a	64.71 a	4167.26 ab	2353.89 b
	Sec	1825.36 b	323.05 b	3600.51 b	1574.96 c
Nivel de significación		*	**	NS	*
Fertilización nitrogenada	Fn	2038.79 a	275.32 a	4310.31	2461.23 a
	Fi	2147.00 ab	100.88 b	4157.25	2159.29 ab
	Fa	2412.05 b	58.24 b	4102.16	2066.21 b
Interacción	Nivel de significación	NS	*	NS	NS
Programación de riego	Fertilización nitrogenada				
Prop	Fn	2443.27	87.48	5088.30	2639.51
	Fi	2455.09	26.80	4840.03	2711.24
	Fa	2687.59	25.22	4477.48	2923.25
Prpc	Fn	2151.65	140.29	4259.95	2191.06
	Fi	2076.78	33.89	3901.34	2243.86
	Fa	2501.59	19.70	4340.34	2626.90
Sec	Fn	1521.13	597.42	3582.14	1368.23
	Fi	1908.90	241.96	3565.59	1523.49
	Fa	2046.04	130.04	3653.86	1834.03
Fecha: 26/01/2000 (R4)					
Nivel de significación		NS	**	*	*
Programación de riego	Prop	2465.33	141.70 a	4738.36 a	6554.26 a
	Prpc	2351.84	222.26 a	4168.53 ab	6971.97 a
	Sec	2088.60	606.09 b	4025.87 b	5573.80 b
Nivel de significación		*	*	NS	**
Fertilización nitrogenada	Fn	1968.01 a	510.72 a	4136.21	5193.12 a
	Fi	2324.25 ab	247.48 b	4483.00	6443.13 b
	Fa	2615.08 b	212.01 b	4313.54	7462.99 c

Tabla 2 (continuación). Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la acumulación de materia seca total particionada (kg ha^{-1}), en las tres fechas últimas de muestreo.

Fecha: 26/01/2000 (R4)		Hoja fotosintetizadora (lámina foliar) (kg ha^{-1})	Hoja senescente (lámina foliar) (kg ha^{-1})	Tallo (tallo + vainas foliares) (kg ha^{-1})	Espiga (grano +zuro+brácteas) (kg ha^{-1})
Interacción	Nivel de significación	NS	NS	NS	NS
Programación de riego	Fertilización nitrogenada				
Prop	Fn	2131.95	255.36	4535.80	5043.37
	Fi	2697.84	132.41	5166.32	7065.76
	Fa	2567.79	37.04	4511.37	7552.84
Prpc	Fn	1963.28	346.79	3927.35	5361.00
	Fi	2335.29	186.79	4259.95	7246.25
	Fa	2756.16	135.56	4316.70	8307.10
Sec	Fn	1808.02	930.81	3943.90	5175.78
	Fi	1938.85	423.24	4022.72	5017.36
	Fa	2518.14	464.22	4110.99	6529.03
Fecha: 08/03/2000 (Cosecha)		Tallo (tallo + vainas foliares) (kg ha^{-1})		Espiga (grano +zuro+ brácteas) (kg ha^{-1})	
Nivel de significación		NS		*	
Programación de riego	Prop	4568.12		11987.76a	
	Prpc	4502.70		11555.86ab	
	Sec	3830.41		8655.46b	
Nivel de significación		NS		NS	
Fertilización nitrogenada	Fn	3846.17		9961.43	
	Fi	4151.19		10234.92	
	Fa	4903.87		12003.52	
Interacción	Nivel de significación	NS		NS	
Programación de riego	Fertilización nitrogenada				
Prop	Fn	4040.06		10666.03	
	Fi	4573.63		12021.65	
	Fa	5092.24		13276.39	
Prpc	Fn	4110.20		11570.83	
	Fi	4416.00		10854.40	
	Fa	4981.90		12242.33	
Sec	Fn	3389.05		7647.42	
	Fi	3464.71		7828.69	
	Fa	4637.47		10491.85	

*: p 0.05 **; p 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha= 0.05$). Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha^{-1} , Fi= 90 kg N ha^{-1} , Fa= 130 kg N ha^{-1} ; R3= grano lechoso, R4= grano pastoso.

Tabla 3. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el área foliar (cm²), en tres fechas de muestreo.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación	
Fecha: 26/12/1999 (Vt)				
Programación de riego	Prop	5046.70 a	**	
	Prpc	4394.30 b		
	Sec	4351.20 b		
Fertilización nitrogenada	Fn	4495.90	NS	
	Fi	4519.30		
	Fa	4777.00		
Interacción				
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS	
Prop	Fn	4918.00		
	Fi	4957.56		
	Fa	5264.67		
Prpc	Fn	4396.33		
	Fi	4313.00		
	Fa	4473.89		
Sec	Fn	4173.33		
	Fi	4288.11		
	Fa	4592.22		
Fecha: 13/01/2000 (R3)				
Programación de riego	Prop	4628.20 a		**
	Prpc	4162.30 b		
	Sec	3554.60 c		
Fertilización nitrogenada	Fn	3925.10 a	*	
	Fi	4020.60 ab		
	Fa	4399.40 b		
Interacción				
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS	
Prop	Fn	4589.00		
	Fi	4459.44		
	Fa	4836.56		
Prpc	Fn	4016.44		
	Fi	3926.89		
	Fa	4543.33		
Sec	Fn	3169.89		
	Fi	3674.67		
	Fa	3818.67		
Fecha: 26/01/2000 (R4)				
Programación de riego	Prop	4044.20 a		*
	Prpc	3746.00 ab		
	Sec	3404.30 b		
Fertilización nitrogenada	Fn	3280.90 a	**	
	Fi	3777.90 b		
	Fa	4135.80 b		

Tabla 3 (continuación). Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el área foliar (cm^2), en tres fechas de muestreo.

Fecha: 26/01/2000 (R4)		
Interacción		
Programación de riego	Fertilización nitrogenada	Valor medio
Prop	Fn	3483.67
	Fi	4257.11
	Fa	4391.44
Prpc	Fn	3308.22
	Fi	3734.33
	Fa	4195.67
Sec	Fn	3050.67
	Fi	3341.89
	Fa	3820.00

NS

*: $p < 0.05$ **; $p < 0.01$, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha = 0.05$). Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha^{-1} , Fi= 90 kg N ha^{-1} , Fa= 130 kg N ha^{-1} ; R3= grano lechoso, R4= grano pastoso.

Tabla 4. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el índice de área foliar, para las fechas 26/12/1999 , 13/01, y 26/01/2000.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación
Fecha: 26/12/1999 (Vt)			
Programación de riego	Prop	3.99 a	**
	Prpc	3.47 b	
	Sec	3.44 b	
Fertilización nitrogenada	Fn	3.55	NS
	Fi	3.57	
	Fa	3.77	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS
Prop	Fn	3.88	
	Fi	3.92	
	Fa	4.16	
Prpc	Fn	3.47	
	Fi	3.41	
	Fa	3.53	
Sec	Fn	3.30	
	Fi	3.39	
	Fa	3.63	
Fecha: 13/01/2000 (R3)			
Programación de riego	Prop	3.66 a	**
	Prpc	3.29 b	
	Sec	2.81 c	
Fertilización nitrogenada	Fn	3.10 a	*
	Fi	3.18 ab	
	Fa	3.47 b	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS
Prop	Fn	3.62	
	Fi	3.52	
	Fa	3.82	
Prpc	Fn	3.17	
	Fi	3.10	
	Fa	3.59	
Sec	Fn	2.50	
	Fi	3.59	
	Fa	3.02	

Tabla 4 (continuación). Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el índice de área foliar, para las fechas 26/12/1999, 13/01, y 26/01/2000.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación
Fecha: 26/01/2000 (R4)			
Programación de riego	Prop	3.20 a	*
	Prpc	2.96 ab	
	Sec	2.69 b	
Fertilización nitrogenada	Fn	2.59 a	**
	Fi	2.98 ab	
	Fa	3.27 b	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS
Prop	Fn	2.75	
	Fi	3.36	
	Fa	3.47	
Prpc	Fn	2.61	
	Fi	2.95	
	Fa	3.31	
Sec	Fn	2.41	
	Fi	2.64	
	Fa	3.02	

*: p < 0.05 **; p < 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$). Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha⁻¹, Fi= 90 kg N ha⁻¹, Fa= 130 kg N ha⁻¹; R3= grano lechoso, R4= grano pastoso.

Tabla 5. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la tasa de crecimiento del cultivo, expresado en $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, para los siguientes períodos de muestreo: 28/12 -13/01, 13/01-26/01 y 26/01-03/08/2000.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación
Período: 28/12/99 - 13/01/00 (Vt-R3) ; 73-86 DDE			
Programación de riego	Prop	35.84 a	**
	Prpc	30.13 a	
	Sec	13.32 b	
Fertilización nitrogenada	Fn	23.29	NS
	Fi	28.46	
	Fa	27.55	
Período: 28/12/99 - 13/01/00 (Vt-R3) ; 73-86 DDE			
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS
Prop	Fn	37.27	
	Fi	38.21	
	Fa	32.05	
Prpc	Fn	28.65	
	Fi	28.64	
	Fa	33.11	
Sec	Fn	3.94	
	Fi	18.52	
	Fa	17.48	
Período: 13/01/00 -26/01/2000 (R3-R4) 86-100 DDE			
Programación de riego	Prop	24.42	NS
	Prpc	34.45	
	Sec	38.18	
Fertilización nitrogenada	Fn	20.27 a	*
	Fi	36.90 ab	
	Fa	39.8 b	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS
Prop	Fn	6.53	
	Fi	35.32	
	Fa	31.41	
Prpc	Fn	18.87	
	Fi	41.58	
	Fa	42.91	
Sec	Fn	35.41	
	Fi	33.81	
	Fa	45.32	

Tabla 5 (continuación). Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la tasa de crecimiento del cultivo, expresado en $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, para los siguientes períodos de muestreo: 28/12 -13/01, 13/01-26/01 y 26/01-03/08/2000.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación
Período:26/01/2000- 08/03/2000 (R4-Cosecha) 100-144 DDE			
Programación de riego	Prop	8.79	NS
	Prpc	8.70	
	Sec	3.06	
Fertilización nitrogenada	Fn	7.83	NS
	Fi	4.05	
	Fa	8.67	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS
Prop	Fn	9.63	
	Fi	5.23	
	Fa	11.52	
Prpc	Fn	12.99	
	Fi	5.79	
	Fa	7.31	
Sec	Fn	0.88	
	Fi	1.14	
	Fa	7.17	

*: $p < 0.05$ **; $p < 0.01$, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha = 0.05$).

Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha^{-1} , Fi= 90 kg N ha^{-1} , Fa= 130 kg N ha^{-1} ; R3= grano lechoso, R4= grano pastoso.

Tabla 6. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la velocidad relativa de crecimiento del cultivo, RGR, expresada en $\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$, para los siguientes períodos de muestreo: 28/12 -13/01, 13/01-26/01 y 26/01-03/08/2000.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación	
Período: 28/12/99 - 13/01/00 (Vt-R3) ; 73-86 DDE				
Programación de riego	Prop	45.03 a	**	
	Prpc	43.46 a		
	Sec	20.44 b		
Fertilización nitrogenada	Fn	31.58	NS	
	Fi	41.31		
	Fa	36.05		
Interacción				
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS	
Prop	Fn	47.47		
	Fi	49.66		
	Fa	37.96		
Prpc	Fn	40.94		
	Fi	43.34		
	Fa	46.10		
Sec	Fn	6.33		
	Fi	30.92		
	Fa	24.08		
Período: 13/01/00 -26/01/2000 (R3-R4) 86-100 DDE				
Programación de riego	Prop	18.85 a		*
	Prpc	32.25 ab		
	Sec	47.78 b		
Fertilización nitrogenada	Fn	23.40	NS	
	Fi	37.04		
	Fa	39.17		
Interacción				
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS	
Prop	Fn	5.07		
	Fi	29.72		
	Fa	24.75		
Prpc	Fn	19.34		
	Fi	41.31		
	Fa	36.09		
Sec	Fn	45.79		
	Fi	40.88		
	Fa	56.68		
Período:26/01/2000- 08/03/2000 (R4- Cosecha) 100-144 DDE				
Programación de riego	Prop	6.07		NS
	Prpc	5.81		
	Sec	2.13		
Fertilización nitrogenada	Fn	5.86	NS	
	Fi	2.65		
	Fa	5.94		

Tabla 6 (continuación). Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la velocidad relativa de crecimiento del cultivo, RGR, expresada en $\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$, para los siguientes períodos de muestreo: 28/12 -13/01, 13/01-26/01 y 26/01-03/08/2000.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación
Período: 26/01/2000- 08/03/2000 (R4- Cosecha) 100-144 DDE			
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS
Prop	Fn	7.56	
	Fi	3.44	
	Fa	7.21	
Prpc	Fn	9.58	
	Fi	3.97	
	Fa	3.88	
Sec	Fn	0.45	
	Fi	0.55	
	Fa	5.39	

*: $p < 0.05$ **; $p < 0.01$, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha = 0.05$). Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha^{-1} , Fi= 90 kg N ha^{-1} , Fa= 130 kg N ha^{-1} ; R3= grano lechoso, R4= grano pastoso.

Tabla 7. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la tasa de asimilación neta (NAR), expresada en $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, para los siguientes períodos de muestreo: 15/12 -28/12/1999, 28/12/1999-13/01/2000, y 13/01-26/01/2000.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación	
Período 15/12- 28/12/1999 (V9-Vt) 60-73 DDE				
Programación de riego	Prop	12.22	NS	
	Prpc	11.52		
	Sec	10.10		
Fertilización nitrogenada	Fn	11.37	NS	
	Fi	11.20		
	Fa	11.27		
Interacción				
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS	
Prop	Fn	12.34		
	Fi	13.12		
	Fa	11.20		
Prpc	Fn	11.18		
	Fi	11.00		
	Fa	12.37		
Sec	Fn	10.59		
	Fi	9.47		
	Fa	10.25		
Factor agronómico	Nivel	Valor medio		Nivel de significación
Período: 28/12-13/01/2000 (Vt-R3) 73-86 DDE				
Programación de riego	Prop	9.40 a	**	
	Prpc	8.89 a		
	Sec	4.16 b		
Fertilización nitrogenada	Fn	6.58	NS	
	Fi	8.31		
	Fa	7.55		
Interacción				
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS	
Prop	Fn	9.96		
	Fi	10.20		
	Fa	8.04		
Prpc	Fn	8.37		
	Fi	8.83		
	Fa	9.47		
Sec	Fn	1.42		
	Fi	5.90		
	Fa	5.15		

Tabla 7 (continuación). Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la tasa de asimilación neta (NAR), expresada en $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$, para los siguientes períodos de muestreo: 15/12 -28/12/1999, 28/12/1999-13/01/2000, y 13/01-26/01/2000.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación
Período: 13/01-26/01/2000 (R3-R4) 86-100 DDE			
Programación de riego	Prop	7.09 a	**
	Prpc	11.02 ab	
	Sec	13.94 b	
Fertilización nitrogenada	Fn	7.88	NS
	Fi	12.16	
	Fa	12.01	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS
Prop	Fn	2.08	
	Fi	10.62	
	Fa	8.57	
Prpc	Fn	6.88	
	Fi	13.82	
	Fa	12.36	
Sec	Fn	14.67	
	Fi	12.04	
	Fa	15.11	

*: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha = 0.05$).

Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha^{-1} , Fi= 90 kg N ha^{-1} , Fa= 130 kg N ha^{-1} ; R3= grano lechoso, R4= grano pastoso.

Tabla 8. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el índice LAR, expresado en $\text{dm}^2 \text{g}^{-1}$, para los siguientes períodos de muestreo: 28/12 -13/01, 13/01-26/01 y 26/01-03/08/2000.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación
Período: 28/12/99 - 13/01/00 (Vt-R3) ; 73-86 DDE			
Programación de riego	Prop	0.39	NS
	Prpc	0.39	
	Sec	0.42	
Fertilización nitrogenada	Fn	0.38	NS
	Fi	0.42	
	Fa	0.40	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS
Prop	Fn	0.39	
	Fi	0.39	
	Fa	0.40	
Prpc	Fn	0.39	
	Fi	0.41	
	Fa	0.38	
Sec	Fn	0.38	
	Fi	0.45	
	Fa	0.43	
Período: 13/01/00 -26/01/2000 (R3-R4) 86-100 DDE			
Programación de riego	Prop	0.24	NS
	Prpc	0.24	
	Sec	0.26	
Fertilización nitrogenada	Fn	0.24	N:S
	Fi	0.25	
	Fa	0.25	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS
Prop	Fn	0.24	
	Fi	0.23	
	Fa	0.25	
Prpc	Fn	0.24	
	Fi	0.24	
	Fa	0.24	
Sec	Fn	0.25	
	Fi	0.27	
	Fa	0.26	

Tabla 8 (continuación). Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el índice LAR, expresado en $\text{dm}^2 \text{g}^{-1}$, para los siguientes períodos de muestreo: 28/12 -13/01, 13/01-26/01 y 26/01-03/08/2000.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación
Período:26/01/2000- 08/03/2000 (R4- Cosecha) 100-144 DDE			
Programación de riego	Prop	0.0099	NS
	Prpc	0.0093	
	Sec	0.0096	
Fertilización nitrogenada	Fn	0.0096	NS
	Fi	0.0095	
	Fa	0.0097	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS
Prop	Fn	0.1010	
	Fi	0.0010	
	Fa	0.1020	
Prpc	Fn	0.0097	
	Fi	0.0091	
	Fa	0.0092	
Sec	Fn	0.0091	
	Fi	0.0099	
	Fa	0.0096	

*: $p < 0.05$ **; $p < 0.01$, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha = 0.05$).

Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha^{-1} , Fi= 90 kg N ha^{-1} , Fa= 130 kg N ha^{-1} ; R3= grano lechoso, R4= grano pastoso.

Tabla 9. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el índice de crecimiento de la espiga, expresado en $\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$, para los siguientes períodos de muestreo: 15/12 -28/12/1999 , 28/12/1999-13/01/2000, y 13/01-26/01/2000.

Factor agronómico	Nivel	Valor medio	Nivel de significación	
Período: 28/12/99 - 13/01/00 (Vt-R3) ; 73-86 DDE				
Programación de riego	Prop	20.55 a	**	
	Prpc	17.35 b		
	Sec	11.46 b		
Fertilización nitrogenada	Fn	15.23 a	*	
	Fi	15.91 ab		
	Fa	18.22 b		
Interacción				
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS	
Prop	Fn	19.71		
	Fi	20.18		
	Fa	21.76		
Prpc	Fn	16.25		
	Fi	16.24		
	Fa	19.57		
Sec	Fn	9.73		
	Fi	11.30		
	Fa	13.34		
Factor agronómico	Nivel	Valor medio		Nivel de significación
Período: 13/01/00 -26/01/2000 (R3-R4) 86-100 DDE				
Programación de riego	Prop	27.12	NS	
	Prpc	33.12		
	Sec	28.56		
Fertilización nitrogenada	Fn	22.34 a	**	
	Fi	30.73 b		
	Fa	35.73 b		
Interacción				
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS	
Prop	Fn	17.17		
	Fi	31.10		
	Fa	33.07		
Prpc	Fn	22.64		
	Fi	36.14		
	Fa	40.58		
Sec	Fn	27.20		
	Fi	24.96		
	Fa	33.53		

Tabla 9 (continuación). Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el índice de crecimiento de la espiga, expresado en $\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$, para los siguientes períodos de muestreo: 15/12 -28/12/1999 , 28/12/1999-13/01/2000, y 13/01-26/01/2000.

Período:26/01/2000- 08/03/2000 (R4- Cosecha) 100-144 DDE			
Programación de riego	Prop	12.35	NS
	Prpc	10.42	
	Sec	7.00	
Fertilización nitrogenada	Fn	10.84	NS
	Fi	8.62	
	Fa	10.32	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		NS
Prop	Fn	12.78	
	Fi	11.26	
	Fa	13.01	
Prpc	Fn	14.11	
	Fi	8.20	
	Fa	8.94	
Sec	Fn	5.62	
	Fi	6.39	
	Fa	9.01	

*: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$). Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha^{-1} , Fi= 90 kg N ha^{-1} , Fa= 130 kg N ha^{-1} ; R3= grano lechoso, R4= grano pastoso.

Tabla 10. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la tasa de llenado de granos.

Factor agronómico	Nivel		Tasa de llenado (mg d ⁻¹)	Nivel de significación
Programación de riego	Prop		5.75 ab	*
	Prpc		6.05 a	
	Sec		5.10 b	
Fertilización nitrogenada	Fn		5.60	NS
	Fi		5.61	
	Fa		5.60	
Interacción	Programación de riego	Fertilización nitrogenada		
	Prop	Fn	5.60	NS
		Fi	5.69	
		Fa	5.97	
	Prpc	Fi	6.05	
Sec	Fi	5.10		

*: p 0.05 **; p 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$). Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= seco; Fn= 36 kg N ha⁻¹, Fi= 90 kg N ha⁻¹, Fa= 130 kg N ha⁻¹

Tabla 11. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el rendimiento y sus componentes.

Factor agronómico	Nivel	NG m ⁻²	Nivel de significación	PUG (mg)	Nivel de significación	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Nivel de significación
Programación de riego	Prop	5434 a	**	215.90 a	*	11765 a	**
	Prpc	4755 b		212.80 a		10135 b	
	Sec	3858 c		163.10 b		6327 c	
Fertilización nitrogenada	Fn	4130 a	**	202.50	NS	7957 a	**
	Fi	4938 b		199.60		10019 b	
	Fa	4980 b		202.50		10250 b	
Interacción							
Programación de riego	Fertilización nitrogenada	NG m ⁻²	Nivel de significación	PUG (mg)	Nivel de significación	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Nivel de significación
Prop	Fn	4771	NS	206	NS	9850	NS
	Fi	5729		221		12670	
	Fa	5802		220		12770	
Prpc	Fn	4163		209		8698	
	Fi	4968		211		10500	
	Fa	5134		218		11210	
Sec	Fn	3455		154		5324	
	Fi	4116		166		6886	
	Fa	4005		169		6771	

*: p 0.05 **; p 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$). Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= seco; Fn= 36 kg N ha⁻¹, Fi= 90 kg N ha⁻¹, Fa= 130 kg N ha⁻¹

Tabla 12. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el consumo por etapas: siembra-V6; V6-15DDFF; y 15 DDFF-MF

Factor agronómico	Nivel	Consumo (mm)	Nivel de significación
Período siembra-V6			
Programación de riego	Prop	40.72 ab	*
	Prpc	42.85 a	
	Sec	39.10 b	
Fertilización nitrogenada	Fn	41.99	NS
	Fi	40.61	
	Fa	40.07	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		
Prop	Fn	42.22	NS
	Fi	39.94	
	Fa	40.01	
Prpc	Fn	45.08	
	Fi	42.81	
	Fa	40.67	
Sec	Fn	38.66	
	Fi	39.10	
	Fa	39.53	
Período V6-15 DDFF			
Programación de riego	Prop	363.22 a	**
	Prpc	279.43 b	
	Sec	232.53 c	
Fertilización nitrogenada	Fi	285.76 ab	*
	Fn	314.41 a	
	Fa	275.00 b	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		
Prop	Fn	359.83	NS
	Fi	394.91	
	Fa	334.93	
Prpc	Fn	265.00	
	Fi	300.73	
	Fa	272.54	
Sec	Fn	232.47	
	Fi	247.59	
	Fa	217.55	

Tabla 12 (continuación). Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el consumo por etapas: siembra-V6; V6-15DDFF; y 15 DDFF-MF

Período 15 DDFF-MF			
Programación de riego	Prop	225.94 a	**
	Prpc	181.69 b	
	Sec	42.00 c	
Fertilización nitrogenada	Fi	143.46	NS
	Fn	144.57	
	Fa	161.59	
Interacción			
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		
Prop	Fn	211.20	NS
	Fi	225.33	
	Fa	241.28	
Prpc	Fn	183.07	NS
	Fi	166.45	
	Fa	195.55	
Sec	Fn	36.11	
	Fi	41.94	
	Fa	47.94	

*: p 0.05 **; p 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$).

Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha⁻¹, Fi= 90 kg N ha⁻¹, Fa= 130 kg N ha⁻¹

V6= sexta hoja expandida; DDFF= días desde la floración femenina

Tabla 13. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el consumo total.

Factor agronómico	Nivel	Consumo (mm)	Nivel de significación
Programación de riego	Prop	629.88 a	**
	Prpc	503.97 b	
	Sec	313.63 c	
Fertilización nitrogenada	Fi	471.21	NS
	Fn	499.60	
	Fa	476.67	
Interacción			Nivel de significación
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		
Prop	Fn	613.24	NS
	Fi	660.18	
	Fa	616.22	
Prpc	Fn	493.15	
	Fi	509.99	
	Fa	508.76	
Sec	Fn	307.24	
	Fi	328.62	
	Fa	305.02	

*: p 0.05 **; p 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$). Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha⁻¹, Fi= 90 kg N ha⁻¹, Fa= 130 kg N ha⁻¹

Tabla 14. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la eficiencia en el uso del agua en el período crítico (EUA Pc).

Factor agronómico	Nivel	EUA Pc (kg m ⁻³)	Nivel de significación
Programación de riego	Prop	3.43	NS
	Prpc	3.53	
	Sec	3.60	
Fertilización nitrogenada	Fn	3.65 ab	*
	Fi	2.78 a	
	Fa	4.15 b	
Interacción			Nivel de significación
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		
Prop	Fn	2.28	NS
	Fi	3.10	
	Fa	4.06	
Prpc	Fn	3.60	
	Fi	2.98	
	Fa	4.01	
Sec	Fn	4.20	
	Fi	2.24	
	Fa	4.37	

*: p 0.05 **; p 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$). Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha⁻¹, Fi= 90 kg N ha⁻¹, Fa= 130 kg N ha⁻¹

Tabla 15. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la eficiencia en el uso del agua en la producción de materia seca total (EUA MST).

Factor agronómico	Nivel	EUA Pc (kg m ⁻³)	Nivel de significación
Programación de riego	Prop	3.18 a	*
	Prpc	3.92 ab	
	Sec	4.94 b	
Fertilización nitrogenada	Fn	3.66	NS
	Fi	3.76	
	Fa	4.64	
Interacción			Nivel de significación
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		
Prop	Fn	2.95	NS
	Fi	3.01	
	Fa	3.60	
Prpc	Fn	3.93	
	Fi	3.69	
	Fa	4.14	
Sec	Fn	4.39	
	Fi	4.27	
	Fa	6.17	

*: p < 0.05 **; p < 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$). Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha⁻¹, Fi= 90 kg N ha⁻¹, Fa= 130 kg N ha⁻¹

Tabla 16. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en la eficiencia en el uso del agua para la producción de grano (EUA gr).

Factor agronómico	Nivel	EUA gr (kg m ⁻³)	Nivel de significación
Programación de riego	Prop	1.87	NS
	Prpc	2.01	
	Sec	2.04	
Fertilización nitrogenada	Fn	1.71 a	**
	Fi	2.03 b	
	Fa	2.18 b	
Interacción			Nivel de significación
Programación de riego	Fertilización nitrogenada		
Prop	Fn	1.60	NS
	Fi	1.92	
	Fa	2.08	
Prpc	Fn	1.78	
	Fi	2.06	
	Fa	2.20	
Sec	Fn	1.76	
	Fi	2.12	
	Fa	2.25	

*: p < 0.05 **; p < 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$). Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha⁻¹, Fi= 90 kg N ha⁻¹, Fa= 130 kg N ha⁻¹

Tabla 17. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el contenido de N por órgano aéreo (kg ha⁻¹), para las cuatro últimas fechas de muestreo.

Fecha 28/12/1999							
Factor agronómico	Nivel	Hoja	Nivel de significación	Resto	Nivel de significación	Grano	Nivel de significación
Programación de riego	Prop	98.92 a	**	85.45 a	*		
	Prpc	85.84b		74.91 ab			
	Sec	77.83 b		64.92 b			
Fertilización nitrogenada	Fn	80.97 a	*	62.41 a	**		
	Fi	83.07ab		77.38 ab			
	Fa	98.54 b		85.50 b			
Fecha 13/01/2000							
Factor agronómico	Nivel	Hoja	Nivel de significación	Resto	Nivel de significación	Grano	Nivel de significación
Programación de riego	Prop	87.79 a	**	100.93 a	*	20.53 a	**
	Prpc	74.34 b		87.55 ab		26.81 b	
	Sec	54.40 c		64.13 b		21.44 a	
Fertilización nitrogenada	Fn	60.78 a	**	72.84 a	*	19.57 a	**
	Fi	72.39 b		75.38 a		24.78 b	
	Fa	83.36 c		104.40 b		24.44 b	
Interacción							
Nivel Programación de riego	Fertilización nitrogenada						
Prop	Fn	NS	NS			12.84 a	**
	Fi					25.46 b	
	Fa					23.29 b	
Prpc	Fn					25.53 a	
	Fi					27.35 a	
	Fa					27.56 a	
Sec	Fn					20.34 a	
	Fi					21.52 a	
	Fa					22.47 a	

Tabla 17 (continuación). Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el contenido de N por órgano aéreo (kg ha⁻¹), para las cuatro últimas fechas de muestreo.

Fecha 26/01/2000							
Factor agronómico	Nivel	Hoja	Nivel de significación	Resto	Nivel de significación	Grano	Nivel de significación
Programación de riego	Prop	70.61	NS	64.48	NS	82.56 a	**
	Prpc	64.92		75.18		58.65 b	
	Sec	57.46		61.91		72.39 c	
Fertilización nitrogenada	Fn	47.04a	**	45.37 a	**	58.85 a	**
	Fi	66.02b		69.69 ab		74.11 b	
	Fa	79.94b		86.52 b		80.63 c	
Interacción							
Programación de riego	Fertilización nitrogenada						
Prop	Fn	38.68	NS	30.33	NS	57.78 a	**
	Fi	65.40		52.18		93.81 b	
	Fa	66.50		47.17		96.08 b	
Prpc	Fn	37.67		36.33		54.28 a	
	Fi	51.04		48.70		57.15 a	
	Fa	67.14		77.71		64.51 a	
Sec	Fn	35.08		27.17		64.50 a	
	Fi	43.75		42.82		71.38 ab	
	Fa	57.89		58.39		81.29 b	
Fecha 08/03/2000							
Factor agronómico	Nivel	Hoja	Nivel de significación	Resto	Nivel de significación	Grano	Nivel de significación
Programación de riego	Prop	20.71	NS	61.89	NS	147.25 a	**
	Prpc	23.58		70.12		136.27 a	
	Sec	18.27		61.31		96.44 b	
Fertilización nitrogenada	Fn	18.36	NS	62.30	NS	98.32 a	**
	Fi	19.43		48.88		133.12 b	
	Fa	24.77		82.14		148.51 c	

*: p < 0.05 **; p < 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey α= 0.05).

Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha⁻¹, Fi= 90 kg N ha⁻¹, Fa= 130 kg N ha⁻¹

Tabla 18. Efectos de las estrategias de programación de riego, de la fertilización nitrogenada y de la interacción de ambos factores agronómicos en el tenor de N por órgano (% MS), para las cuatro últimas fechas de muestreo.

Fecha 28/12/1999							
Factor agronómico	Nivel	Hoja	Nivel de significación	Resto	Nivel de significación	Grano	Nivel de significación
Programación de riego	Prop	2.82 a	*	1.27	NS		
	Prpc	2.72 ab		1.27			
	Sec	2.45 b		1.22			
Fertilización nitrogenada	Fn	2.44 a	*	1.00 a	**		
	Fi	2.68 ab		1.39 b			
	Fa	2.87 b		1.36 b			
Fecha 13/01/2000							
Factor agronómico	Nivel	Hoja	Nivel de significación	Resto	Nivel de significación	Grano	Nivel de significación
Programación de riego	Prop	2.70 a	**	0.84	NS	2.30	NS
	Prpc	2.54 a		0.88		2.41	
	Sec	2.00 b		0.88		2.51	
Fertilización nitrogenada	Fn	2.06 a	**	0.75 a	*	2.27	NS
	Fi	2.53 b		0.80 ab		2.49	
	Fa	2.65 b		1.04 b		2.46	
Fecha 26/01/2000							
Factor agronómico	Nivel	Hoja	Nivel de significación	Resto	Nivel de significación	Grano	Nivel de significación
Programación de riego	Prop	2.12 a	*	0.56	NS	1.39 a	**
	Prpc	1.97 ab		0.58		1.39 a	
	Sec	1.67 b		0.62		1.53 b	
Fertilización nitrogenada	Fn	1.51 a	**	0.48 a	**	1.30 a	**
	Fi	2.01 b		0.60 b		1.44 b	
	Fa	2.24 b		0.68 b		1.58 c	
Fecha 08/03/2000							
Factor agronómico	Nivel	Hoja	Nivel de significación	Resto	Nivel de significación	Grano	Nivel de significación
Programación de riego	Prop	0.82	NS	0.55	NS	1.24 a	**
	Prpc	0.90		0.57		1.33 a	
	Sec	0.81		0.56		1.52 b	
Fertilización nitrogenada	Fn	0.90 a	*	0.56	NS	1.28 a	*
	Fi	0.80 ab		0.50		1.34 ab	
	Fa	0.93 b		0.62		1.48 b	

*: p < 0.05 **; p < 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$).

Prop= aplicación de riego durante todo el ciclo del cultivo, Prpc= aplicación de riego durante el período crítico, Sec= secano; Fn= 36 kg N ha⁻¹, Fi= 90 kg N ha⁻¹, Fa= 130 kg N ha⁻¹

Tabla 19. Efecto del nitrógeno en la producción de materia seca total (MST) en las cinco últimas fechas de muestreo del año 2000. (Tuckey $\alpha= 0.05$).

Tratamiento	MST (kg ha ⁻¹)	Nivel de significación
27/07/2000		
Nop	8774.89 a	*
NC	8331.57 ab	
T	6405.51 b	
03/08/2000		
Nop	11769.46 a	**
NC	11429.44 a	
T	7569.80 b	
21/08/2000		
Nop	18313.52 a	*
NC	16442.70 ab	
T	9311.92 b	
07/09/2000		
Nop	25708.00 a	*
NC	25590.79 a	
T	10718.60 b	
20/10/2000		
Nop	28857.85 a	**
NC	26691.16 a	
T	14558.46 b	

*: p 0.05 **; p 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha= 0.05$).
 Nop= 150 (año 2000) kg N ha⁻¹; NC= 300 kg N ha⁻¹; T= 0 kg N ha⁻¹

Tabla 20. Efecto del nitrógeno en el área foliar y las cuatro últimas fechas de muestreo en el ciclo 2000.

Día desde emergencia	Tratamiento	AF (cm ² pl ⁻¹)	Nivel de significación
60	NOp	6349.67 a	**
	NC	6920.11 a	
	T	4826.56 b	
67	NOp	6347.44 a	*
	NC	6374.67 a	
	T	4420.00 b	
85	NOp	6059.91 a	**
	NC	6367.08 a	
	T	2787.00 b	
102	NOp	5237.59 a	**
	NC	6301.66 a	
	T	2668.66 b	

*: p 0.05 **; p 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha= 0.05$).
 Nop= 150 (año 2000) kg N ha⁻¹; NC= 300 kg N ha⁻¹; T= 0 kg N ha⁻¹

Tabla 21. Efecto del nitrógeno en el índice de área foliar y las cuatro últimas fechas de muestreo en el ciclo 2000.

Día desde emergencia	Tratamiento	IAF (cm cm ⁻²)	Nivel de significación
60	NOp	4.98 a	**
	NC	5.48 a	
	T	3.85 b	
67	NOp	5.03 a	*
	NC	5.00 a	
	T	3.53 b	
85	NOp	4.76 a	*
	NC	5.04 a	
	T	2.23 b	
102	NOp	4.10 a	**
	NC	4.99 a	
	T	2.14 b	

*: p 0.05 **; p 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$).

Nop= 150 (año 2000) kg N ha⁻¹; NC= 300 kg N ha⁻¹; T= 0 kg N ha⁻¹

Tabla 22. Efecto del nitrógeno en el crecimiento diario del cultivo (CGR, g m⁻² d⁻¹) para los períodos comprendidos entre los días 81-93, 93-109, y 109-145 DE para el ciclo 1999 y los períodos comprendidos entre los días 40-60, 60-67, 67-85, y 85-102 DE en el ciclo 2000.

Ciclo 1999			
Día desde emergencia	Tratamiento	CGR (g m ⁻² d ⁻¹)	Nivel de significación
81-93	NOp	49.38	NS
	NC	41.66	
	T	41.55	
93-109	NOp	38.59	NS
	NC	37.89	
	T	38.59	
109-145	NOp	10.57	NS
	NC	10.87	
	T	13.01	
Ciclo 2000			
Día desde emergencia	Tratamiento	CGR (g m ⁻² d ⁻¹)	Nivel de significación
40-60	NOp	27.24 a	*
	NC	24.97 a	
	T	15.27 b	
LSD		10.50	
60-67	NOp	42.78	NS
	NC	44.26	
	T	16.63	
67-85	NOp	36.36 a	*
	NC	27.85 a	
	T	9.68 b	
LSD		26.55	
85-102	NOp	43.50	NS
	NC	41.37	
	T	8.27	

*: p 0.05 **; p 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$).

Nop= 175 (año 1999), kg N ha⁻¹; 150 (año 2000) kg N ha⁻¹; NC= 300 kg N ha⁻¹; T= 0 kg N ha⁻¹

Tabla 23. Efecto del nitrógeno en el crecimiento relativo del cultivo (RGR, $\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$) para los períodos comprendidos entre los días 52-61 y 61-75 DE para el ciclo 1999 ; y 40-60, 60-67, 67-85, y 85-102 DE en el ciclo 2000.

Ciclo 1999			
Día desde emergencia	Tratamiento	RGR ($\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$)	Nivel de significación
52-61	Nop	138.59	NS
	NC	115.03	
	T	143.10	
61-75	Nop	94.52	NS
	NC	86.40	
	T	71.40	
Ciclo 2000			
Día desde emergencia	Tratamiento	RGR ($\text{mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$)	Nivel de significación
40-60	Nop	81.77	NS
	NC	75.94	
	T	48.48	
60-67	Nop	50.22	NS
	NC	54.01	
	T	26.48	
67-85	Nop	31.70	NS
	NC	23.31	
	T	13.04	
85-102	Nop	24.63	NS
	NC	37.71	
	T	9.12	

*: $p < 0.05$ **; $p < 0.01$, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha = 0.05$).

Nop= 175 (kg N ha^{-1} año 1999), 150 (kg N ha^{-1} año 2000); NC= 300 kg N ha^{-1} ; T= 0 kg N ha^{-1}

Tabla 24. Efecto del nitrógeno en la tasa de asimilación neta (NAR, $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) para los períodos comprendidos entre los días 61-75, 75-82, 82-93, 93-109, y 109-145 para el ciclo 1999 y 40-60, 60-67, 67-85, y 85-102 DE en el ciclo 2000.

Ciclo 1999			
Día desde emergencia	Tratamiento	NAR ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	Nivel de significación
61-75	NOp	8.68	NS
	NC	8.10	
	T	6.98	
75-82	NOp	10.04	NS
	NC	11.27	
	T	9.06	
82-93	NOp	9.24	NS
	NC	7.68	
	T	8.16	
93-109	NOp	7.87	NS
	NC	7.80	
	T	6.76	
109-145	NOp	4.66	NS
	NC	3.89	
	T	6.39	

Tabla 24 (continuación). Efecto del nitrógeno en la tasa de asimilación neta (NAR, $g\ m^{-2}\ d^{-1}$) para los períodos comprendidos entre los días 61-75, 75-82, 82-93, 93-109, y 109-145 para el ciclo 1999 y 40-60, 60-67, 67-85, y 85-102 DE en el ciclo 2000.

Ciclo 2000			
Día desde emergencia	Tratamiento	NAR ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	Nivel de significación
40-60	NOp	7.04	NS
	NC	5.93	
	T	4.34	
60-67	NOp	8.55	NS
	NC	8.45	
	T	4.54	
67-85	NOp	7.42	NS
	NC	5.48	
	T	3.50	
85-102	NOp	9.32	NS
	NC	10.74	
	T	3.81	

*: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha = 0.05$).
 Nop= 175 (año 1999), $kg\ N\ ha^{-1}$; 150 (año 2000) $kg\ N\ ha^{-1}$; NC= 300 $kg\ N\ ha^{-1}$; T= 0 $kg\ N\ ha^{-1}$

Tabla 25. Efecto del nitrógeno en la tasa de crecimiento de la espiga (EGR, $g\ m^{-2}\ d^{-1}$) para los períodos comprendidos entre los días 67-85, y 85-102 DE en el ciclo 2000.

Día desde emergencia	Tratamiento	EGR ($g\ m^{-2}\ d^{-1}$)	Nivel de significación
67-85	NOp	24.31 a	**
	NC	25.97 a	
	T	8.89 b	
LSD $\alpha = 0.05$		9.15	
85-102	NOp	44.37 a	*
	NC	42.59 a	
	T	13.07 b	
LSD $\alpha = 0.05$		27.35	

*: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha = 0.05$).
 Nop= 150 (año 2000) $kg\ N\ ha^{-1}$; NC= 300 $kg\ N\ ha^{-1}$; T= 0 $kg\ N\ ha^{-1}$

Tabla 26. Efecto del nitrógeno en la tasa de llenado de granos en los ciclos agrícolas.

Año 1999		
Tratamiento	Tasa de llenado ($mg\ d^{-1}$)	Nivel de significación
Nop	7.52	NS
NC	7.62	
T	7.10	
Año 2000		
Nop	7.05 a	*
NC	7.06 a	
T	6.33 b	
LSD $\alpha = 0.05$		0.550823

*: $p < 0.05$ **: $p < 0.01$, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha = 0.05$).
 Nop= 175 (año 1999), $kg\ N\ ha^{-1}$; 150 (año 2000) $kg\ N\ ha^{-1}$; NC= 300 $kg\ N\ ha^{-1}$; T= 0 $kg\ N\ ha^{-1}$

Tabla 27. Efecto del nitrógeno en el rendimiento y sus componentes, para los dos ciclos agrícolas y las tres últimas fechas de muestreo.

Año 1999						
Tratamiento	NG m ⁻²	Nivel de significación	PUG (mg)	Nivel de significación	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Nivel de significación
Nop	5036	NS	310	NS	15568	NS
NC	4955		320		15872	
T	5113		310		15851	
Año 2000						
Nop	5560 a	**	300 a	**	16550 a	**
NC	5175 b		320 b		17061 a	
T	3228 c		250 c		8082 b	
LSD $\alpha=0.05$	207.58		13.3		1607.7	

*: p < 0.05 **; p < 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$).

Nop= 175 (año 1999), kg N ha⁻¹; 150 (año 2000) kg N ha⁻¹; NC= 300 kg N ha⁻¹; T= 0 kg N ha⁻¹

Tabla 28. Efecto del nitrógeno en la eficiencia en el uso del agua para la producción de materia seca total (EUA MS, kg m⁻³) y en de grano (EUA gr, kg m⁻³) para los dos ciclos agrícolas.

Año 1999						
Tratamiento	EUA MS (kg m ⁻³)	Nivel de significación	EUA gr (kg m ⁻³)	Nivel de significación	EUA Pc MST (kg m ⁻³)	Nivel de significación
Nop	3.60	NS	2.10	NS	3.93	NS
NC	3.24		1.98		3.98	
T	3.21		2.04		3.55	
Año 2000						
Tratamiento	EUA MS (kg m ⁻³)	Nivel de significación	EUA gr (kg m ⁻³)	Nivel de significación	EUA Pc MST (kg m ⁻³)	Nivel de significación
Nop	3.79 a	**	2.18 a	**	4.47 a	**
NC	3.47 a		2.22 a		4.23 a	
T	1.89 b		1.05 b		1.56 b	
LSD $\alpha=0.05 = 0.0523$						

*: p < 0.05 **; p < 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha=0.05$).

Nop= 175 (año 1999), kg N ha⁻¹; 150 (año 2000) kg N ha⁻¹; NC= 300 kg N ha⁻¹; T= 0 kg N ha⁻¹

Tabla 29. Efecto de la disponibilidad de nitrógeno en su acumulación en hoja, tallo, grano y resto.

	Hoja (Kg N ha ⁻¹)	Tallo (Kg N ha ⁻¹)	Grano (Kg N ha ⁻¹)	Resto (Kg N ha ⁻¹)
Fecha 27/07/2000				
Tratamiento				
Nop	73.68	70.61 b		
NC	54.54	56.99 ab		
T	25.57	22.73 a		
Nivel de significación	NS	*		
LSD α= 0.05		29.25		
Fecha 03/08/2000				
Tratamiento				
Nop	70.60 b	34.08 b		23.91 ab
NC	84.83 b	32.63 b		32.57 b
T	22.59 a	10.69 a		11.55 a
Nivel de significación	**	**		*
LSD α= 0.05	12.07	7.38		13.59
Fecha 21/08/2000				
Tratamiento				
Nop	56.69 ab	32.95 b	46.93 b	45.98 b
NC	119.09 b	64.73 b	30.40 a	66.70 b
T	20.57 a	12.97 a	18.30 a	12.73 a
Nivel de significación	*	**	**	**
LSD α= 0.05	53.31	15.68	11.66	20.17
Fecha 07/09/2000				
Tratamiento				
Nop	69.36 b	18.41 a	136.08 b	27.03 b
NC	74.40 b	34.95 b	149.73 b	30.50 b
T	16.39 a	10.46 a	51.65 a	9.29 a
Nivel de significación	**	**	*	**
LSD α= 0.05	22.36	12.70	97.09	5.14
Fecha 20/10/2000				
Tratamiento				
Nop	21.19 b	16.65 ab	239.97 b	7.49 b
NC	20.11 b	22.28 b	242.27 b	7.03 b
T	9.09 a	10.97 a	79.20 b	1.41 a
Nivel de significación	**	**	*	**
LSD α= 0.05	5.23	8.11	135.187	1.53

*: p 0.05 **; p 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey α= 0.05).

Nop= 175 kg N ha⁻¹ ; 150 (año 2000) kg N ha⁻¹; NC= 300 kg N ha⁻¹ ; T= 0 kg N ha⁻¹

Tabla 30. Efecto de la disponibilidad nitrogenada en el porcentaje de N en hoja, tallo, grano y resto.

Fecha 03/08/2000				
Tratamiento	Hoja	Tallo		Resto
Nop	1.87 a	0.55 a		1.33
NC	2.35 b	0.57 b		1.50
T	0.87 c	0.24 b		1.16
Nivel de significación	**	**		NS
LSD $\alpha= 0.05$	0.36	0.11		
Fecha 21/08/2000				
Tratamiento	Hoja	Tallo	Grano	Resto
Nop	1.56 ab	0.46 a	2.11	0.86
NC	3.07 b	0.96 a	1.90	1.04
T	0.84 a	0.26 b	1.89	0.71
Nivel de significación	*	*	NS	NS
LSD $\alpha= 0.05$	1.56	0.53		
Fecha 07/09/2000				
Tratamiento	Hoja	Tallo	Grano	Resto
Nop	1.90 a	0.25 a	1.44 ab	0.51
NC	1.85 b	0.47 b	1.56 b	0.65
T	0.75 b	0.24 a	0.99 a	0.53
Nivel de significación	**	*	*	NS
LSD $\alpha= 0.05$	0.41	0.18	0.37	
Fecha 20/10/2000				
Tratamiento	Hoja	Tallo	Grano	Resto
Nop	0.88 a	0.27 a	1.45 a	0.20 a
NC	0.84 a	0.41 b	1.42 a	0.39 b
T	0.49 b	0.28 a	0.98 b	0.20 a
Nivel de significación	**	**	**	**
LSD $\alpha= 0.05$	0.16	0.10	0.22	0.089

*: p 0.05 **; p 0.01, NS = no significativo

Las letras minúsculas iguales indican diferencias no significativas entre tratamientos (Tuckey $\alpha= 0.05$).

Nop= 175 (año 1999), kg N ha⁻¹; 150 (año 2000) kg N ha⁻¹; NC= 300 kg N ha⁻¹; T= 0 kg N ha⁻¹