

**"FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN MAÍZ EN LA REGIÓN CHAQUEÑA.
ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DEL CULTIVO MEDIANTE UN BALANCE DE
NITRÓGENO".**

Intensificando: Geraldine Bush

Director: Ricardo A. Ruiz

Consultor: Federico G. Micucci

Fecha de entrega: 10 de noviembre de 2005

INDICE

• Resumen	1
• Introducción	2
Planteo del problema y revisión de los antecedentes	
Efectos del nitrógeno sobre la generación de biomasa y el rendimiento	
Requerimientos de nitrógeno del cultivo	
Determinación de la necesidad de fertilización	
Objetivos e hipótesis del trabajo	
• Materiales y Métodos	12
Manejo general	
Mediciones del cultivo	
Balance de nitrógeno	
Caracterización meteorológica	
Descripción climática de la campaña	
• Resultados	23
En emergencia – vegetativo	
En floración	
En madurez fisiológica	
Nitrógeno a cosecha	
Relación entre rendimiento y absorción de nitrógeno	
Eficiencia del uso de nitrógeno	
Balance de nitrógeno. Aporte neto	
Mineralización	
Eficiencia en el uso del agua	
Cálculo económico	
• Discusión	44
Niveles de rendimiento alcanzados	
Efectos del nitrógeno sobre el crecimiento y la determinación del rendimiento	
Absorción y balance de nitrógeno	
Eficiencias de uso del nitrógeno	
• Conclusiones	54
• Bibliografía	56
• Apéndice	59
Determinación de las dosis de fertilizante a aplicar	
Resultado del balance de nitrógeno	

AGRADECIMIENTOS

Por su gran ayuda en el desarrollo de este trabajo, me gustaría agradecer al Ing. Agr. Ricardo A. Ruiz, y a Carlos Livingston, quien brindó su apoyo y cooperación en el ensayo a campo. Finalmente, deseo expresar mi gratitud a mi familia, por su incondicional ayuda.

RESUMEN

En la Región chaqueña existe escasa información disponible acerca de la respuesta del cultivo de maíz a la fertilización nitrogenada en seco. Esta práctica requiere comprender mejor el funcionamiento del sistema suelo - planta - ambiente. Se analizó la respuesta al agregado de nitrógeno (N) al cultivo de maíz en Campo del Cielo, Santiago del Estero (27° 52' S, 61° 50' W), en un lote de más de 17 años de agricultura continua con antecesor soja de segunda. El híbrido AX888 se sembró el 12 de noviembre de 2003, a razón de 70.000 plantas/ha, bajo siembra directa y en seco. Se ensayaron 4 tratamientos: testigo (sin aplicación) y tres dosis crecientes de N a la siembra (30 – 60 – 90 kg/ha de N). Se utilizó un DBCA con 3 repeticiones. El rendimiento respondió a la fertilización. El testigo rindió 6184 kg/ha y la dosis más alta 7955 kg/ha. La respuesta fue de 1771 kg, con una eficiencia de uso de 18.4 kg grano/kg N aplicado. El agregado de N maximizó la cobertura a floración y el número de granos/m². El peso del grano no se modificó significativamente. El rendimiento se maximizó con 60 kg/ha de N. La mayor dosis aumentó la absorción de N y el porcentaje de proteína en grano (hasta 11.1%). El aporte neto del suelo resultó de 218 kgN/ha y la mineralización neta fue de 3.6 %. La eficiencia de uso de N del testigo fue 31.5 kg grano/kgN absorbido equivalente a un requerimiento de 3.2 kgN/kg grano. La condición del ambiente favoreció la absorción a floración pero restringió el crecimiento de los granos (por altas temperaturas), provocando una baja eficiencia en el uso de N y un bajo índice de cosecha de N con elevada absorción a madurez. La respuesta resultó rentable para la mayor dosis frente a la relación de precios nitrógeno/maíz para un año considerado normal o medio para la zona.

PALABRAS CLAVES: maíz, rendimiento, fertilización, balance de nitrógeno, región chaqueña.

INTRODUCCIÓN

Planteo del problema y revisión de los antecedentes

En la región chaqueña existe escasa información disponible acerca de la respuesta del cultivo de maíz a la fertilización nitrogenada. La difusión de esta práctica requiere comprender mejor el funcionamiento del sistema para agricultura extensiva en seco.

La región natural Chaco Subhúmedo, se encuentra en forma de franja al este de la provincia de Santiago del Estero, limitando con la provincia del Chaco (entre los paralelos 27° y 28°) (Vargas Gil, 1990). El patrón de vegetación fue el de bosques y abras netamente separados. Los bosques, de quebracho colorado, santiagueño y blanco y algarrobales. Las abras, que eran espartillares, hoy están totalmente ocupadas por la agricultura. La porción central y norte de la subregión está surcada por antiguos cauces con vegetación gramínea (Anónimo 2000).

Climáticamente corresponde al tipo subhúmedo seco. En razón de la disminución de las precipitaciones, la sección de control de humedad de los suelos se encuentra húmeda entre 90 – 120 días al año (Vargas Gil, 1990).

La región natural del Chaco subhúmedo corresponde a la región Climática II que se encuentra en el este de la provincia y abarca la posición este de los departamentos: Moreno, Juan Felipe Ibarra, General Taboada y Aguirre. Las unidades de suelos agrícolas presentes son Argiustoles, Haplustoles y Argiudoles (Vargas Gil, 1990).

Según la serie 1930/98, (Angeloni, 1999) el valor medio de temperaturas del mes más cálido (enero) es de 27.2° C y el del mes más frío (julio) de 15.3 ° C. La temperatura máxima media de enero alcanza valores de 34° C y la mínima media es

de 21° C. La temperatura máxima media de julio llega a 22.5° C y la mínima media 8.9° C.

El período libre de heladas es inferior a 300 días (Vargas Gil, 1990). Se espera la ocurrencia de las mismas en los meses de junio, julio y agosto. En el mes de mayo, hay un probabilidad de helada en uno de cada dos años; y en septiembre, se espera un día con helada cada tres años (Angeloni, 1999). Del volumen promedio de lluvias anuales (836 mm), el 82% cae en primavera y verano. La característica del régimen de lluvias se manifiesta por su efecto sobre el drenaje, escurrimiento superficial y erosión, que constituye el paisaje, con el aspecto de una llanura tendida, muy suavemente ondulada.

La unidad del chaco subhúmedo se caracteriza por la predominancia de llanuras estabilizadas de origen loésico, con reciente expansión de la frontera agrícola. Los suelos son bien drenados y desarrollados. El 73% tiene aptitud ganadero - agrícola y el 27% agrícola - ganadero. Las actividades agrícolas predominantes son algodón, soja, maíz, sorgo; en algunas áreas se cultiva también girasol (Volante et al., 2003).

El maíz es un cultivo de importancia económica en la región del Noroeste Argentino. Sobre un total de 1.760.000 ha sembradas con cultivos de verano en la región, aproximadamente 130.000 corresponden a maíz (7.4%). Sin embargo está muy lejos de la superficie sembrada con soja (1.400.000 ha, 78.8%) (Volante et al., 2003).

En Santiago del Estero se repite este esquema regional ya que la provincia aporta el 51.4% del área sembrada de soja y el 36,6% del total de maíz cultivado en

la región del NOA. Por tal motivo las 47.460 ha de maíz sembradas en la provincia parecen relegadas frente a las 715.000 ha adjudicadas a soja (Volante et al., 2003).

La región del Chaco Subhúmedo se caracteriza además por presentar una superficie importante destinada al sorgo (aprox. 60.000 ha) que prácticamente duplica a la superficie cultivada con maíz (28.500 ha), igualmente relegadas por soja (590.000 ha) (Volante et al., 2003).

El rendimiento promedio de maíz para la provincia de Santiago del Estero fue de 3860 kg/ha y 3500 kg/ha para las campañas 1991/2000 (SAGPyA 2000), y 2001/2002 respectivamente (SAGPyA 2002), valores muy cercanos al promedio nacional de 4000 kg/ha. El rinde promedio para cultivo de maíz en el Establecimiento La Guasuncha, es de aproximadamente 4800 kg/ha. Los rendimientos históricos han sido muy variables, pudiendo obtenerse rendimientos entre un rango de 3000 a 8000 kg/ha.

Efectos del nitrógeno sobre la generación de biomasa y el rendimiento.

El nitrógeno (N) afecta marcadamente la dinámica del área foliar del cultivo de maíz. El número final de hojas no se ve afectado y la tasa de aparición de hojas se reduce sólo ligeramente. Sin embargo el efecto del nitrógeno es mucho mayor sobre el área individual de las hojas. Se han observado reducciones significativas en el área de las hojas superiores, incluso de hasta un 60% en tratamientos con deficiencias de N (Uhart y Andrade 1995). El N absorbido se localiza como N en hojas y N en tallos. El índice de área foliar comienza a reducirse por senescencia cuando el N foliar resulta insuficiente para mantener el área foliar verde (Muchow, 1998).

La producción de biomasa depende de la radiación solar incidente, de la fracción de radiación interceptada y de la eficiencia de uso de la radiación (EUR). El efecto de la disponibilidad de N sobre la fracción de radiación interceptada se produce a través del índice de área foliar verde, ya que existe un contenido mínimo de N en hojas en expansión en el cultivo de maíz (0.55 g N m^{-2}) (Muchow, 1988 y 1994). El coeficiente de extinción, en cambio, es relativamente conservativo.

Bajo condiciones de déficit hídrico la EUR se reduce, pero además es fuertemente dependiente de la concentración de N en hojas (Muchow, 1998). Se han observado relaciones lineales y altamente significativas entre la EUR y la tasa de crecimiento del cultivo, ambas en floración, con la concentración de N en hojas (Muchow y Davis, 1988; Uhart y Andrade, 1995).

La disponibilidad de N aumenta la tasa de crecimiento del cultivo en floración y ésta se asocia con el número de granos m^{-2} siguiendo una función lineal más plateau. Se estableció un valor umbral de $25 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, por encima del cual el número de granos se maximiza (Uhart y Andrade, 1995). La tasa de crecimiento del cultivo durante los 30 días alrededor de floración resulta un buen estimador del estado fisiológico del cultivo y, por lo tanto, del establecimiento de granos, habiendo una relación común para situaciones de disponibilidad hídrica, nitrogenada y radiativa variables (Andrade et al., 2002). Andrade et al. (1999) también demuestran una relación curvilínea entre el número de granos por planta y la tasa de crecimiento por planta durante el período crítico que resulta robusta cuando dicha tasa varía por densidad, variabilidad planta a planta, radiación incidente, temperaturas nocturnas o años.

A pesar que el maíz produce granos con relativamente bajo porcentaje de proteína, el requerimiento de nitrógeno para sostener el crecimiento del grano es importante. La concentración de N en grano puede fluctuar entre un mínimo valor de 11 mg N g⁻¹ y un máximo de 16 mg N g⁻¹ (Muchow, 1994).

El peso final del grano de maíz depende de la duración del llenado, de la tasa de crecimiento y de su peso potencial. El máximo contenido de agua que almacena el grano durante su llenado ha sido asociado con el máximo volumen que este puede lograr y en consecuencia con el peso potencial (Egli 1998).

En condiciones de baja fertilidad la concentración en el grano es mantenida, mediante la reducción de la tasa de crecimiento del grano sin modificaciones en la duración del llenado. Durante el llenado de los granos, el nitrógeno es movilizado desde las hojas y tallos hacia el grano (Muchow, 1994), con la consiguiente reducción de la EUR debido a que disminuye el contenido de N en hoja (Muchow y Sinclair, 1994). La magnitud de la disminución de la EUR y su efecto sobre el rendimiento dependerá de la contribución relativa de la absorción de nitrógeno y la movilización del N foliar hacia los granos, moduladas por la concentración de N en estos últimos. En condiciones de baja fertilidad esta característica sería la que definiría el nivel de rendimiento alcanzable por el cultivo (Sinclair y Muchow, 1995).

En experiencias llevadas a cabo en Paraná, Entre Ríos, la fertilización nitrogenada incrementó el rendimiento del cultivo de maíz, a través de aumentos en el número y en el peso de los granos. El efecto del nitrógeno sobre el peso de los granos modificó la duración del llenado y el volumen potencial de los mismos (Melchiori et al., 2004).

Requerimientos de nitrógeno del cultivo.

Suponiendo una adecuada disponibilidad hídrica, producto de una correcta articulación de los requerimientos del cultivo con la oferta del ambiente, el logro de elevados rendimientos sólo podrá concretarse si existe también una adecuada provisión de nitrógeno.

Una metodología propuesta para cuantificar la demanda de nitrógeno (Otegui, 1992), supone la definición de un “rendimiento objetivo” (R), en función del rendimiento promedio de la región considerada.

Para calcular el requerimiento de nitrógeno se tiene en cuenta: el contenido de proteína del grano, el coeficiente de conversión de proteína en nitrógeno y el índice de cosecha del nitrógeno que se refiere a la proporción del nitrógeno total absorbido por el cultivo, que se encuentra en el grano en madurez fisiológica; con estas tres variables se calculan los kilogramos (kg) de N que se necesitan para producir un quintal de maíz o coeficiente "b".

Otegui (1992), estimó este coeficiente considerando 10% de proteína en grano, un coeficiente de conversión de proteína en N de 6.25 kg proteína / kg N y un índice de cosecha de nitrógeno de 0.70. Según este cálculo, el maíz requiere acumular en la parte aérea aproximadamente 2.28 kg N por quintal de grano producido. El rango generalmente varía entre 1.6 y 2.3 kg N por quintal de rendimiento (Andrade et al, 1995).

Osmond y Riha (1996) compararon diferentes métodos de recomendación de fertilización con nitrógeno en maíz en la zona tropical. Para los métodos que analizaron estimaron el requerimiento de N en la parte aérea para alcanzar un rendimiento objetivo de la siguiente forma:

$$N_{abs} = (N_{frac} * \text{Rendimiento objetivo}) / ICN$$

donde N_{abs} : es el nitrógeno absorbido presente en la parte aérea a madurez.

N_{frac} : es la fracción de N en grano

ICN: índice de cosecha de nitrógeno.

Los autores recomiendan utilizar los siguientes valores en caso de no poseer datos precisos de las variables: N_{frac} : 0.015 e ICN: 0.75 para híbridos y 0.60 para variedades locales, ya que consideran que éste es un atributo determinado principalmente por el genotipo.

El rango establecido para el requerimiento resultaría entre 20 y 25 kg N absorbido por tonelada producida respectivamente, lo cual coincide con la estimación anterior.

Determinación de la necesidad de fertilización

De acuerdo al rendimiento objetivo que se haya definido quedará determinada la demanda de nitrógeno del cultivo y ello definirá la oferta que deberá existir para abastecerla.

La determinación de la cantidad aportada por cada fuente de N que contribuye al abastecimiento u oferta del suelo resulta dificultosa (Huggins y Pan, 1993). Sin embargo se puede realizar una aproximación para cada sistema de cultivo con datos obtenidos de análisis de suelo y planta. De esta manera se define a la oferta de nitrógeno como:

$$N_s = N_i + N_m + N_f$$

Dicha oferta (Ns) proviene de tres fuentes de nitrógeno:

- i) Ni: nitrógeno inorgánico residual en el suelo presente antes del crecimiento del cultivo. Estimado como el $N-NO_3^-$ en el suelo a la siembra;
- ii) Nm: el proveniente de la mineralización del N orgánico del suelo durante el ciclo;
- iii) Nf: el que puede ser necesario adicionar vía fertilizante (Huggins y Pan, 1993).

Se podrían resumir ambos términos de este balance en la siguiente expresión:

$$R * b = (Ni + Nm + Nf) * e$$

donde “e” permite igualar ambos miembros del balance. Representa la eficiencia de absorción (kg N absorbido / kg N ofertado).

Este balance representa en forma estática a la nutrición mineral del cultivo y no considera las pérdidas que pueden existir (p. ej. drenaje). Notoriamente tiene sus mayores incógnitas en Nm y “e”, debido a su gran variabilidad.

Otegui (1992) propone un valor de eficiencia de absorción de 0.70 para situaciones de buena disponibilidad hídrica. Osmond y Riha (1996) establecen que el el rango de variación del valor de "e" en los trópicos resulta entre 35 y 60% según el sitio, clima y condiciones de manejo, así como de las dosis aplicadas.

Otegui (1992) establece para el cultivo de maíz en el N de Buenos Aires y sur de Santa Fe, tasas de mineralización de la materia orgánica entre 3.2% y 2.1% para condiciones hídricas no restrictivas y en seco respectivamente. Ruiz et al (1997)

en la misma región estableció en cultivos de maíz en secano para suelos con pH cercano a 6.2, valores de tasa de mineralización entre 3.22% y 1.98% en lotes con una historia agrícola inferior a 5 años o con más de 5 años respectivamente. En la zona tropical Osmond y Riha citan valores de 3 %.

La disponibilidad hídrica puede limitar el crecimiento y modificar la demanda de nitrógeno del cultivo de maíz en secano en la región chaqueña. La cuantificación de la respuesta al agregado de nitrógeno al cultivo y su interpretación en términos de un balance de nitrógeno es una aproximación factible de utilizar para un manejo racional y una aplicación de fertilizantes más eficiente.

Objetivos e hipótesis del trabajo

Objetivo general:

- Cuantificar la respuesta a la fertilización nitrogenada del cultivo de maíz en secano en la región chaqueña.
- Interpretar los resultados en términos del balance de nitrógeno y caracterizar una curva de respuesta.

Objetivos particulares:

- Caracterizar la generación del rendimiento del cultivo.
- Cuantificar un balance de nitrógeno para diferentes niveles de disponibilidad.
- Establecer relaciones entre variables de cultivo y la respuesta a la fertilización que permitan entender el funcionamiento del maíz en dicho ambiente.

Hipótesis:

La disponibilidad hídrica determina el crecimiento del maíz en la región chaqueña. El nivel de rendimiento alcanzable establecerá la demanda de nitrógeno y las componentes del balance nitrogenado en el sistema suelo-cultivo. En este sentido, se plantean dos escenarios posibles:

- Una condición hídrica favorable permitirá una alta demanda de nitrógeno, observándose un aporte neto del suelo elevado y alta eficiencia de absorción del cultivo que se sostienen con altas dosis de fertilización.
- Una condición hídrica menos favorable limitará la demanda de nitrógeno, observándose un aporte neto del suelo y una eficiencia de absorción más bajos con altas dosis de fertilización.

El nivel de fertilidad inicial y la condición hídrica durante el desarrollo del cultivo determinarán evidencias de limitación de nitrógeno en etapas tempranas o tardías en el cultivo.

- si la deficiencia es temprana, la respuesta a la fertilización modificará el área foliar en floración y aumentará el número de granos.
- si la deficiencia es tardía, la respuesta a la fertilización modificará el peso de los granos o el porcentaje de nitrógeno en granos con valores elevados de peso del grano.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se desarrolló en el Establecimiento “La Guasuncha”, situado en la provincia de Santiago del Estero, en las cercanías al pueblo de Campo del Cielo (latitud 27° 52´ S, longitud 61° 50´ W), limitando hacia el este con la provincia del Chaco.

Los suelos presentes corresponden a la unidad cartográfica denominada MOtc-14. Es una asociación compuesta por Ustifluentes mólicos (50%) y Natrustoles típicos (50%). Sus limitantes son erosión hídrica actual y susceptibilidad a erosión hídrica, respectivamente. Esta asociación ocupa en la provincia de Santiago del Estero una superficie total de 38.351 hectáreas, representando el 0.28%. (Vargas Gil, 1990)

Los Ustifluentes mólicos, con una capacidad de uso III_{es}, se encuentran en posiciones del paisaje de llanura tendida y media loma baja. Tienen como característica una secuencia de horizontes de capas aluviales, que varían en textura y espesor. La capa superior es oscura y bien estructurada. Son suelos de aptitud agrícola pero con deficiencias de drenaje.

Los Natrustoles típicos de capacidad de uso IV_e, ocupan posiciones del paisaje de media loma. Son suelos profundos, bien desarrollados, con el horizonte superficial oscuro, bien estructurado y bien provisto de materia orgánica (mólico). Le sigue un horizonte subsuperficial B_{2t}, con contenidos mayores al 15% de sodio intercambiable que definen el horizonte nátrico. Las limitaciones son debidas a la presencia de sales solubles, alcalinidad sódica, períodos de exceso de humedad en el sector de raíces, produciendo asfixia radicular y limitando el laboreo oportuno.

Previo a la siembra del cultivo y a madurez se extrajeron muestras de suelo del lote para caracterizar la condición inicial y final del mismo. Con un barreno se obtuvieron muestras a dos profundidades (0-20 cm y 20-40 cm). Cada muestra se compuso de varias submuestras obtenidas al azar dentro del lote al inicio y en cada tratamiento al final del ciclo.

Se determinó: pH, fósforo extractable (Kurtz y Bray), nitrógeno total, carbono oxidable, conductividad eléctrica y sulfatos en la muestra inicial. Al comienzo y al final del ciclo se determinó el contenido de nitratos. Las condiciones iniciales evaluadas se observan en la Tabla 1.

Tabla 1: Resultados del análisis de suelo presiembra. Muestras tomadas de 0 a 20 cm y 20 a 40 cm. de profundidad. pH; fósforo extractable (P, Kurtz y Bray); porcentaje de nitrógeno total (% Nt, microKjeldhal); porcentaje de carbono oxidable (% Cox Walkely Black); nitrógeno en forma de nitratos (NO₃); conductividad eléctrica en pasta (CE); sulfatos (SO₄).

Profundidad (cm)	pH	P (ppm)	Nt (%)	Cox (%)	NO ₃ (ppm)	C.E. (dS/m)	SO ₄ (ppm)
0 - 20	6.42	26.05	0.14	1.13	21.52	0.28	8.08
20 - 40	6.46	16.07	0.09	0.78	14.08	0.33	6.45

Se seleccionó el híbrido simple de maíz Nidera AX 888 MG como material genético para el ensayo. La implantación se realizó en siembra directa el 12 de noviembre de 2003, con una sembradora de 10 surcos con un distanciamiento entre hileras de 70 cm. La densidad de siembra buscada fue de 70000 plantas/ha.

Se implementaron 4 tratamientos con diferentes dosis de aplicación de nitrógeno:

- T0: testigo (sin aplicación de N)
- T1: aplicación de 62,5 kg/ha urea granulada = 29,1 kg/ha N
- T2: aplicación de 130,4 kg/ha urea granulada = 60,8 kg/ha N
- T3: aplicación de 195,7 kg/ha urea granulada = 91,2 kg/ha N

La urea granulada se aplicó a la siembra en cada uno de los tratamientos.

La determinación de las dosis de fertilizante aplicadas se fundamentó en la elección de dos niveles de rendimiento objetivo: I) 6000 kg/ha en condiciones ambientales favorables y II) 3000 kg/ha basado en experiencias previas en el establecimiento y rendimientos medios zonales (ver Apéndice).

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con 3 repeticiones. Dentro del lote se demarcaron franjas de 40 surcos de ancho (28m) por 200 m de largo. Cada tratamiento se asignó a una franja y se repitió este esquema tres veces, totalizando 12 franjas (4 tratamientos x 3 repeticiones).

Dentro de cada franja se localizó una zona representativa de la situación general del cultivo y se halló la densidad objetivo. En este lugar se realizaron las mediciones destructivas y no destructivas a lo largo del ciclo.

Manejo general

El lote tiene una historia de más de 17 años de agricultura continua. A partir del año 1999, se implementó la siembra directa. Se practica la rotación agrícola de Maíz - Soja -Trigo/Soja de 2da. El cultivo de Maíz se implantó sobre antecesor soja de segunda. El control de malezas y plagas se efectuó mediante la aplicación de herbicidas e insecticidas (para el control de cogollero).

Mediciones del cultivo

Mediciones no destructivas:

A estado ontogénico temprano (al mes de la siembra) se determinó en cada franja (cada tratamiento y repetición):

Densidad lograda: se contó el número de plantas presentes en 14.2 m de surco en 4 hileras (40 m²).

Uniformidad: se registró la distancia entre 15 plantas consecutivas, completando 60 determinaciones por franja.

Cobertura: Se estimó la cobertura del cultivo mediante la utilización de una regla de 1 m de longitud por un cm de ancho. Esta se ubicó en el suelo en forma diagonal en el entresurco con sus extremos sobre la línea de siembra. Se contaron los centímetros sombreados y se expresó el resultado en porcentaje. La medición se efectuó en las horas próximas al mediodía. Se realizaron 10 mediciones por franja.

A floración se determinó en cada franja:

Area foliar: Se estimó a partir de la medición del largo y ancho de las hojas verdes presentes en ese estado de desarrollo sobre 5 plantas consecutivas.

Senescencia: Se registró el número de hojas verdes totales y el número de hojas verdes bajo la primera espiga sobre 5 plantas consecutivas.

Cobertura: Se estimó con la misma metodología que en estado temprano. Se realizaron 5 mediciones por franja.

Altura: Se midió la altura de 5 plantas consecutivas, desde el nivel del suelo hasta la base de la panoja (primera ramificación).

Mediciones destructivas:

A madurez

Rendimiento y componentes (kg/ha): Se contó con dos estimaciones del rendimiento:

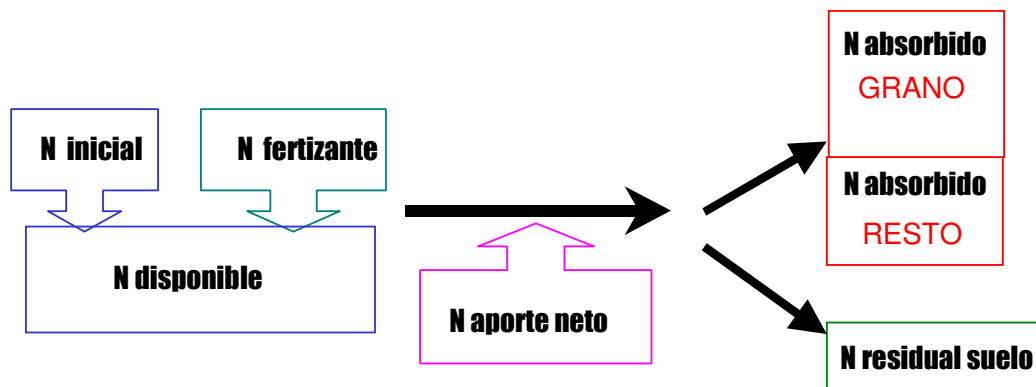
Rendimiento de la franja (rendimiento mecánico): a partir de la cosecha mecánica de una franja (5,6 m por 97m) en cada tratamiento y repetición.

Rendimiento manual: Se recogieron las espigas de plantas consecutivas en 1 m² en cada repetición. Se trillaron las mismas y se determinó el peso total de los granos (rendimiento) y sobre alícuotas se midió el peso individual de grano para estimar el número de granos/m².

Muestreo de material vegetal: En cada repetición se cosecharon 2 plantas enteras y se fraccionaron en grano y resto para medir el índice de cosecha y estimar la producción de biomasa a madurez. A partir de dichas fracciones, se determinó de contenido de nitrógeno en grano y en rastrojo.

Balance de nitrógeno

Se realizó un balance de nitrógeno para cada tratamiento a partir de la siguiente información:



donde:

- nitrógeno inicial: $N-NO_3^-$ a la siembra del lote
- nitrógeno fertilizante: N-urea aplicado en las diferentes dosis
- nitrógeno residual en el suelo: $N-NO_3^-$ en el suelo a madurez para cada tratamiento
- nitrógeno absorbido en grano y en resto: calculado a partir de la biomasa de grano (rendimiento) y de resto a madurez y el % de nitrógeno de dichas fracciones para cada tratamiento.
- nitrógeno de aporte neto: representa el balance de los procesos de pérdida de N mineral (volatilización, lixiviación, inmovilización) y de ganancia de N mineral (mineralización) durante el ciclo del cultivo (Huggins y Pan, 1993).

Análisis de datos:

Los resultados se analizaron mediante las técnicas de análisis de varianza y análisis de regresión. Se utilizaron modelos no lineales para caracterizar las respuestas. Los ajustes se realizaron mediante el uso del programa TBLCurve versión 3.0 (Jandel, 1992).

Caracterización meteorológica

El maíz se sembró el 12 de noviembre. Para esta época del año, la **radiación global** se está acercando a los valor máximos ($18.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), los cuales son alcanzados al corto tiempo, coincidiendo con el período de floración. Durante el llenado de grano, la radiación continúa siendo elevada, disminuyendo en marzo después de madurez fisiológica, con valores promedio de $14.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figura 1).

La **temperatura** no limita el crecimiento en ninguna de sus etapas. Las temperaturas mínimas medias son superiores a los 15 °C durante el crecimiento del cultivo. Las temperaturas alcanzan valores medios máximos, cercano al momento de determinación del número de granos (período crítico), durante el mes de enero con temperaturas de 34 °C y la temperatura media 27.2 °C para este mismo momento.

No hay riesgo de ocurrencia de **heladas** durante el desarrollo del cultivo de maíz. Se espera la ocurrencia de heladas en los meses de junio, julio y agosto, alejados de las fechas para la siembra del maíz; y en septiembre, se espera un día con helada cada tres años. En el mes de mayo, hay probabilidad de helada en uno de cada dos años (Figura 1).

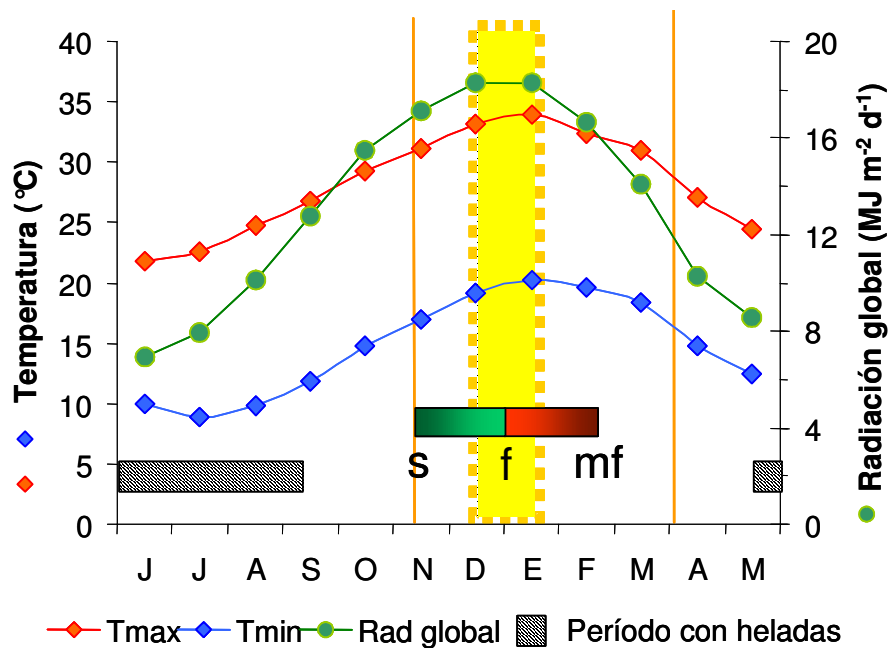


Figura 1: Registros climáticos del observatorio climatológico INTA - Saenz Peña. Series de 1930 – 1998. Los símbolos cuadrados indican las temperaturas máximas y mínimas. Los símbolos circulares indican la radiación global. La barra rayada indica el período con heladas. La barra verde y roja indica el estado de desarrollo del cultivo. Las líneas marcan el período que explora el cultivo, y la barra vertical demarca el período crítico para la determinación del rendimiento.

Descripción climática de la campaña

La precipitación total durante el período de cultivo desde octubre de 2003 a marzo de 2004 fue de 661 mm. El total llovido está en valores medios con respecto a promedios históricos para el período considerado. Las precipitaciones medias anuales, tomando el período de referencia 1987-2003, oscilan entre 460 y 1100 mm presentando variaciones interanuales apreciables (Figura 2).

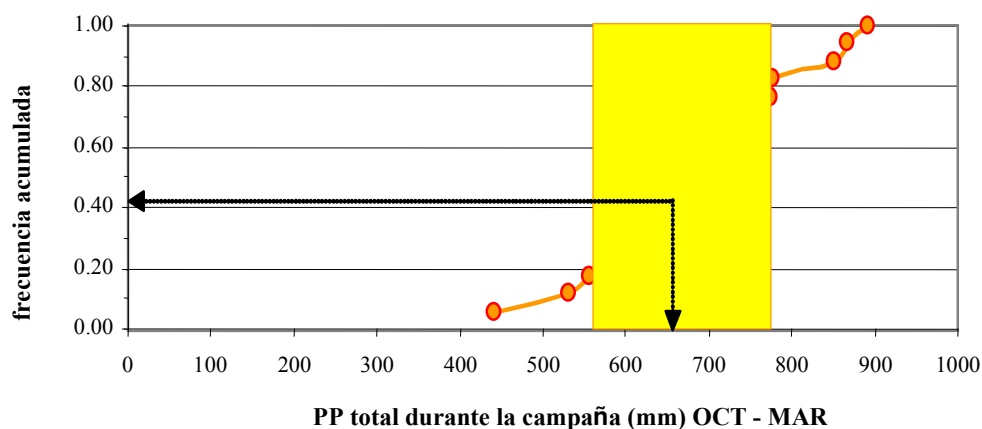


Figura 2: Frecuencia acumulada de precipitaciones del período octubre - marzo en el Establecimiento “La Guasuncha”. Registros correspondientes al período 1987-2004. Las flechas señalan los valores del año del experimento. El rectángulo encierra los valores de precipitaciones esperables en el 60% de los años alrededor de la mediana histórica.

Durante el primer trimestre de crecimiento (estado vegetativo, antes de floración), el cultivo se desarrolló bajo condiciones de menores precipitaciones (248 mm), cuya frecuencia de ocurrencia es del 30 % (Figura 3a). Esta condición mejoró durante el segundo trimestre del cultivo (posterior a la floración y durante el período de llenado y maduración del grano) ya que se registraron 413 mm, valor por encima de la media histórica (Figura 3b). En resumen, nos encontramos en esta campaña bajo condiciones de precipitaciones medias para la región evaluada.

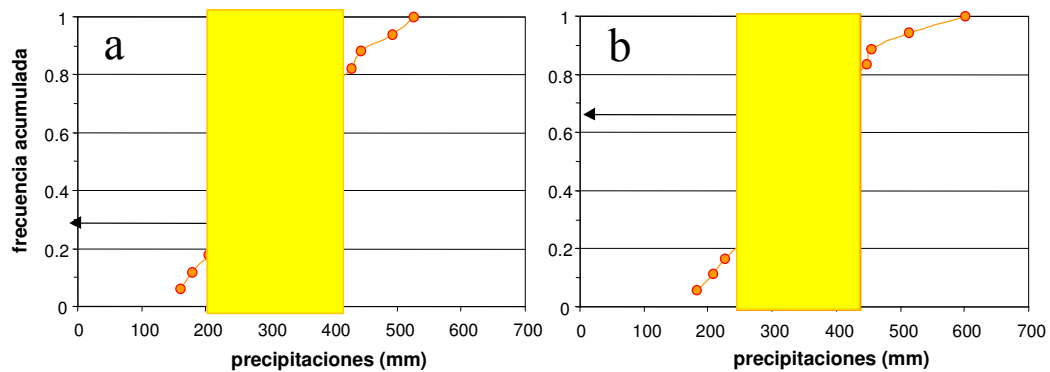


Figura 3: Frecuencia acumulada de precipitaciones a: del período siembra a floración y b: del período floración a madurez fisiológica, para el cultivo de maíz en el Establecimiento La Guasuncha. Registros correspondientes al período 1987-2004. Las flechas señalan los valores del año experimental. El rectángulo encierra valores de precipitaciones esperables en el 60% de los años alrededor de la mediana histórica de cada período analizado.

Considerando el balance entre las precipitaciones, temperaturas, la evapotranspiración real media mensual y la evapotranspiración potencial media mensual, la situación media histórica presenta una situación hídrica deficitaria para los meses de diciembre, enero y febrero. Este momento coincide con el cultivo plenamente desarrollado (Figura 4).

Como se comentó anteriormente, las precipitaciones durante la temporada de crecimiento del cultivo habían sido muy escasas hasta el segundo tercio del mes de diciembre. Esta situación se revirtió unos 20 días antes del momento de floración (Figura 5) con lluvias frecuentes. Sin embargo, se evidenció un período de un mes (entre el 8 de enero y el 6 de febrero) sin lluvias coincidiendo con el final del período crítico y cuaje de los granos (Figura 5). A partir de mediados del mes de febrero, no ocurrieron grandes períodos sin lluvias.

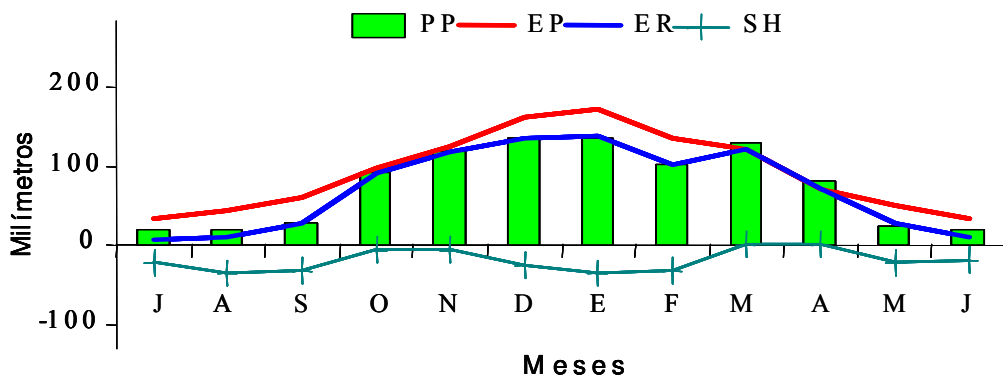


Figura 4: Balance hidrológico climático de “La Guasuncha”. Precipitación media mensual (PP) para la serie 1987 – 2003 en “La Guasuncha”; evapotranspiración potencial media mensual (EP); evapotranspiración real media mensual (ER); y situación hídrica (excesos y deficiencias) (SH). Las temperaturas utilizadas corresponden a los registros climáticos del observatorio climatológico INTA - Saenz Peña. Series de 1930 – 1998.

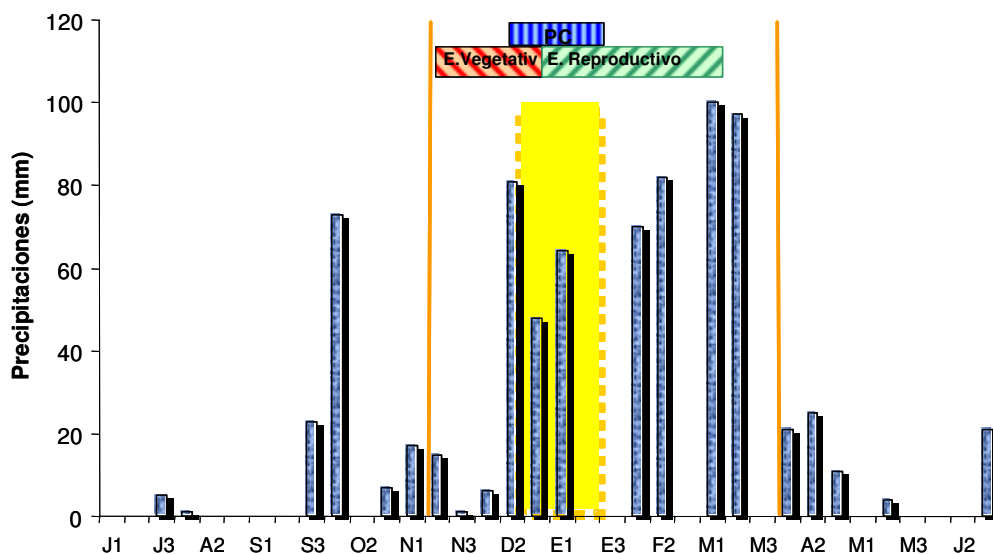


Figura 5: Precipitaciones cada 10 días en la campaña 2003 – 2004 en el establecimiento “La Guasuncha”. Las barras azules llenas indican la precipitación acumulada cada 10 días. La estación de crecimiento del cultivo esta marcada por las líneas verticales amarillas. La barra punteada indica el período crítico para la determinación del rendimiento en maíz.

Analizando el balance hídrico obtenido con las precipitaciones de la campaña, en el mes de noviembre aconteció una situación hídrica desfavorable (Figura 6), lo que posicionó a esta campaña por debajo de la media histórica para este trimestre (octubre a diciembre). Al relacionarlo con el desarrollo del cultivo, éste se encontraba en la etapa de implantación luego de un barbecho, con una baja cobertura del canopeo y menor evapotranspiración que la potencial. Otra situación hídrica desfavorable ocurrió en enero, al final del período crítico, al combinarse alta demanda atmosférica con la ausencia de lluvias durante casi un mes.

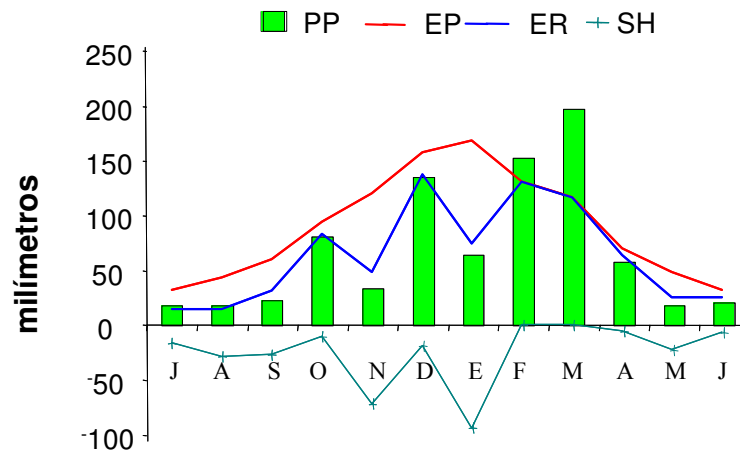


Figura 6: Balance hidrológico climático de “La Guasuncha”. Precipitación mensual (PP) para la campaña 2003 – 2004 en La Guasuncha; evapotranspiración potencial media mensual (EP); evapotranspiración real media mensual (ER); y situación hídrica (excesos y deficiencias) (SH). Las temperaturas utilizadas corresponden a los registros climáticos del observatorio climatológico INTA - Saenz Peña. Series de 1930 – 1998.

RESULTADOS

En emergencia - vegetativo

El 10 de diciembre, a los 28 días desde la siembra el cultivo presentaba, en promedio, 6.67 **hojas expandidas** (rango: 6.53 - 6.73; ee: 0.117) sin diferencias entre tratamientos. El número de hojas visibles fue significativamente ($p < 0.05$) menor en el testigo que en los fertilizados (T0: 10.83; fertilizados: 11.36; ee: 0.121). La senescencia no presentó diferencias entre los tratamientos, que en promedio presentaron valores de 0.78 hojas senescentes (rango: 0.71 - 0.83, ee: 0.152)

La **cobertura** resultó significativamente menor ($p < 0.05$) en el testigo, que presentó un valor de 26.13% frente al 34.13% promedio para los fertilizados (ee: 1.74%).

La **densidad** objetivo de 70000 plantas por hectárea fue alcanzada prácticamente en todos los tratamientos. La densidad lograda fue en promedio de 67900 pl/ha (rango: 66400-68750 pl/ha, ee: 960) sin diferencias significativas entre tratamientos.

El **distanciamiento entre plantas** en la hilera no difirió entre los tratamientos ni entre repeticiones. Las plantas se encontraban separadas a 21 cm. en promedio (rango: 20.67 - 21.36 cm; ee: 0.256 cm). En términos de uniformidad, el 60 % de las plantas presentaron un distanciamiento en la hilera entre 15 y 25 cm. con un valor mediano de 20 cm. (Figura 7). Esto se repitió en cada una de las repeticiones y tratamientos.

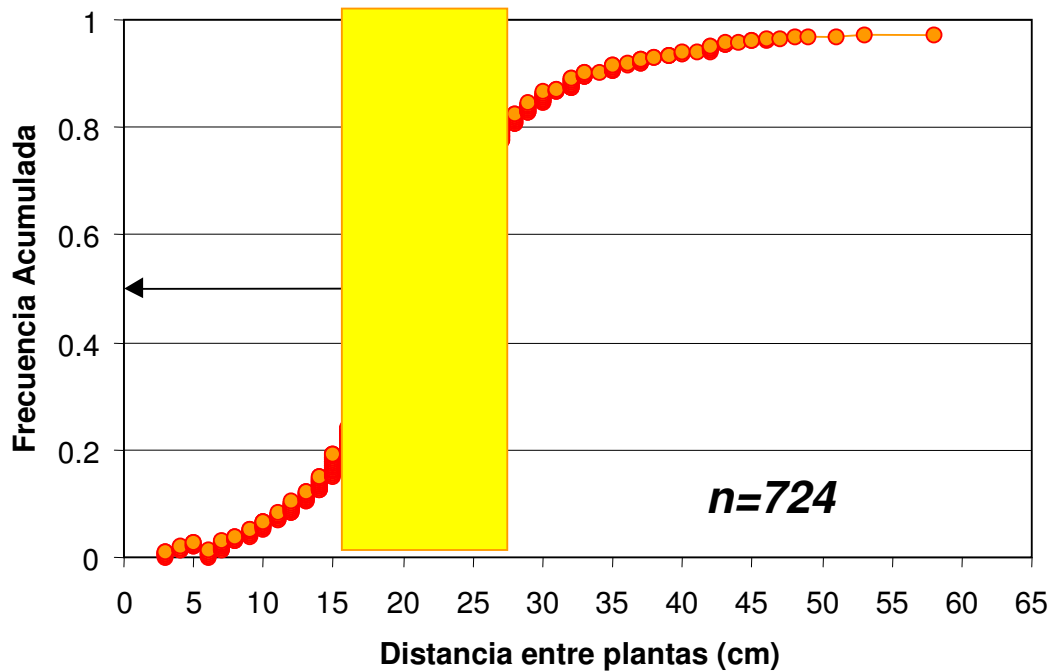


Figura 7: Frecuencia acumulada de distancia entre plantas en la hilera para un cultivo de maíz a los 28 días desde la siembra en el Establecimiento La Guasuncha. Valores correspondientes a todos los tratamientos y repeticiones ($n=724$). Las flechas señalan el valor mediano. El rectángulo encierra los valores de distancia entre plantas esperables en el 60% de los casos alrededor del valor de la mediana.

En floración

El 24 de enero, a los 73 días desde la siembra, el cultivo ya había florecido. La **altura de las plantas** desde el nivel del suelo hasta la base de la panoja (primera ramificación) no presentó diferencias significativas entre los tratamientos, tomando un valor medio de 205.7 cm (Tabla 2).

Las plantas contaban con un **área foliar** promedio de 5590 cm² por planta (Tabla 2). Hubo diferencias significativas entre tratamientos ($p<0.06$).

El **índice de área foliar** en floración se incrementó significativamente con la dosis de nitrógeno. La mayor dosis aumentó un 20% el área foliar respecto del testigo hasta alcanzar un valor máximo de 4.29 (Tabla 2)

Parte del efecto del nitrógeno se manifestó en un aumento **del área individual de las hojas**. Esto se observó significativamente ($p < 0.10$) en las hojas 9 y 12 por debajo de la panoja donde el testigo presentó un menor tamaño que las dosis más altas (H9: T0: 619 cm² vs T2 y T3: 676 cm², ee: 22.2 cm²; H12: T0 305 cm²; T1, T2 y T3: 432 cm², ee: 35.6 cm²) (Figura 8 b). Las posiciones más próximas o por encima de la espiga no difirieron entre tratamientos. También el nitrógeno afectó la supervivencia de las hojas.

El **área verde** actual promedio, fotosintéticamente activa, fue mayor en T2 y T3 en las hojas 11 y 12, mayor en el T3 en la hoja 13 y en la hoja 14 éste fue el único tratamiento que presentó hojas verdes (Figura 8a).

El **número de hojas verdes bajo la espiga** fue en promedio de 4.28 hojas y las diferencias fueron significativas entre tratamientos ($p < 0.05$) siendo mayor el número en las dosis más altas (Tabla 2).

Al comparar los registros de **cobertura**, se observan dos grupos que difieren significativamente ($p < 0.05$): testigo 90.7 % y tratamientos fertilizados 95.4 % siendo los valores similares para las dosis analizadas (Tabla 2).

Tabla 2: Area foliar por planta (AF), altura, número de hojas verdes bajo la espiga (NHVBE), cobertura e índice de área foliar (IAF) para los cuatro tratamientos analizados. Valores correspondientes a floración. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias $p < 0.05$ (salvo en AF donde $p < 0.06$).

	AF (cm ² /pl)	Altura (cm)	N H V B E	Cobertura (%)	IAF
T0	5161 ^{bc}	201 ^a	4.0 ^{bc}	91 ^b	3.53 ^b
T1	5040 ^c	207 ^a	3.5 ^c	95 ^a	3.42 ^b
T2	5956 ^{ab}	208 ^a	4.7 ^{ab}	95 ^a	3.97 ^{ab}
T3	6211 ^a	207 ^a	5.0 ^a	96 ^a	4.29 ^a
Valor Promedio	5591.7	205.7	4.3	94.2	3.803
ee	277.7	0.33	0.267	0.75	0.172

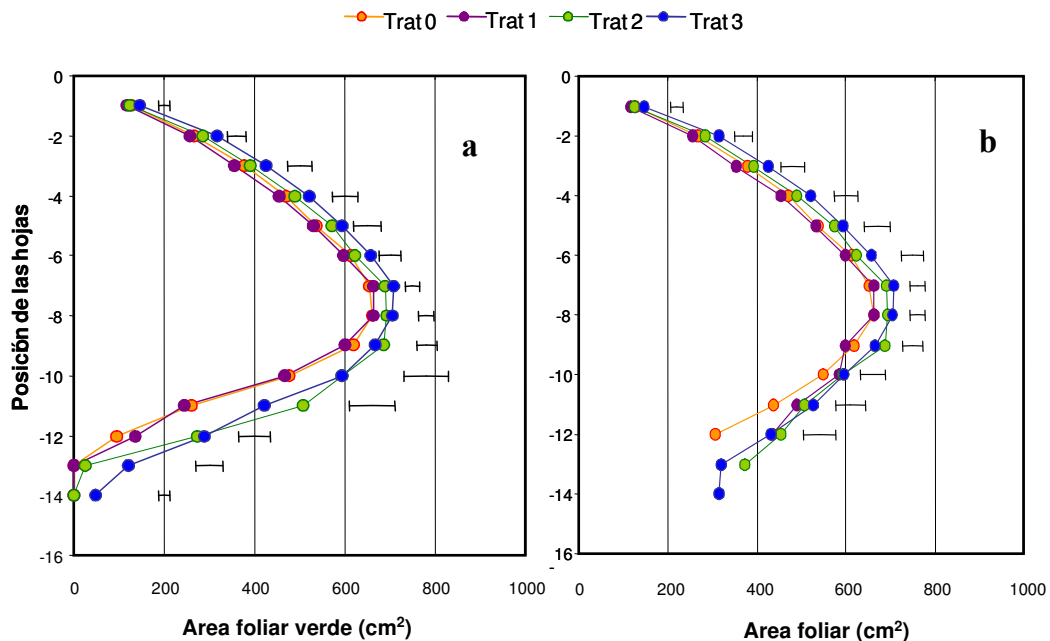


Figura 8: Área foliar del cultivo de maíz a los 73 días de la siembra. **a** Área foliar verde actual promedio en cm^2 , **b** Valores promedio del tamaño máximo de las hojas del cultivo para el testigo y los tres tratamientos fertilizados en función de la posición de las hojas. El valor 0 en el eje de la posición de las hojas indica la ubicación de la panoja. La barra indica el error estándar.

En madurez fisiológica

El 19 de marzo, a los 128 días desde la siembra, el cultivo ya había alcanzado la **madurez fisiológica**. Se realizó la cosecha mecánica y cosecha manual de las plantas y espigas.

El **rendimiento** obtenido cuantificado mediante la **cosecha mecánica** de las franjas presentó diferencias altamente significativas entre los tratamientos ($p < 0.001$). Los testigos rindieron 5682 kg/ha en promedio (Tabla 3). La respuesta a la fertilización nitrogenada varió entre 800 y 1675 kg/ha para T1 y T3, respectivamente. (respuesta relativa: 14.1% y 29.5%). Los rendimientos de las dos dosis más elevadas no resultaron diferentes entre sí (Figura 9). La eficiencia de aplicación

disminuyó con las mayores dosis resultó de 27.4 kg grano/kg N aplicado para T1, 24.2 kg grano/kg N aplicado para T2 y 18.4 kg grano/kg N aplicado para T3.

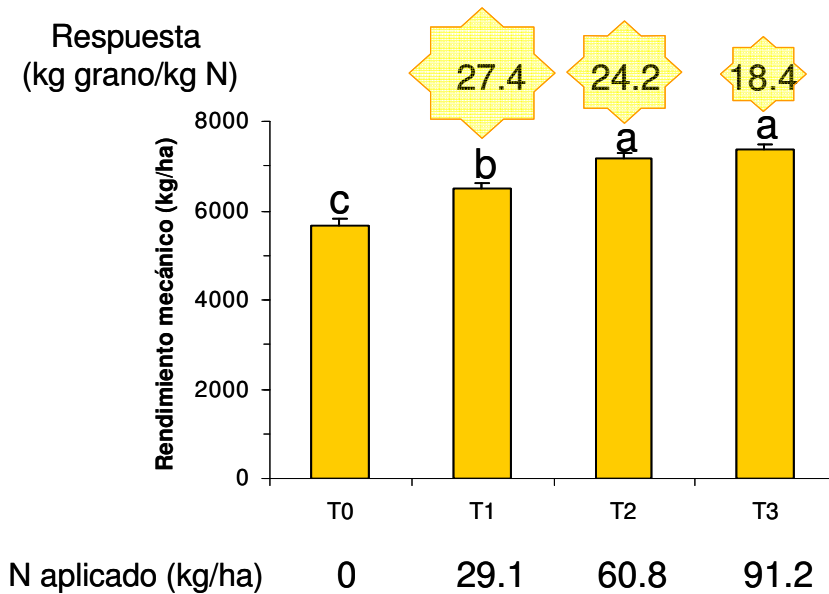


Figura 9: Rendimiento mecánico de los tratamientos. Las barras llenas indican el rendimiento medio alcanzado en cada tratamiento. La barra indica el error estándar de la medición. Las letras indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos. Respuesta: incremento en kg de grano por kg de nitrógeno aplicado en relación al testigo.

Los valores de rendimiento (Tabla 3) estimados a partir de la cosecha manual en áreas más reducidas tuvieron una muy buena correspondencia con los valores observados en las franjas (Figura 10). En general resultaron ligeramente mayores, lo cual es esperable por no considerarse pérdidas debidas a la captación.

Tabla 3: Rendimiento de la cosecha manual. Rendimiento de la cosecha mecánica. Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias $p < 0.05$ para el rendimiento manual, y $p < 0.001$ para el rendimiento mecánico.

	R Manual (kg/ha)	R mec. (kg/ha)
T0	6183.6 ^c	5682.4 ^c
T1	6924.7 ^{bc}	6480.1 ^b
T2	7304.9 ^{ab}	7155.1 ^a
T3	7955.4 ^a	7357.6 ^a
Valor Promedio	7092.15	6668.80
ee	371.761	119.740

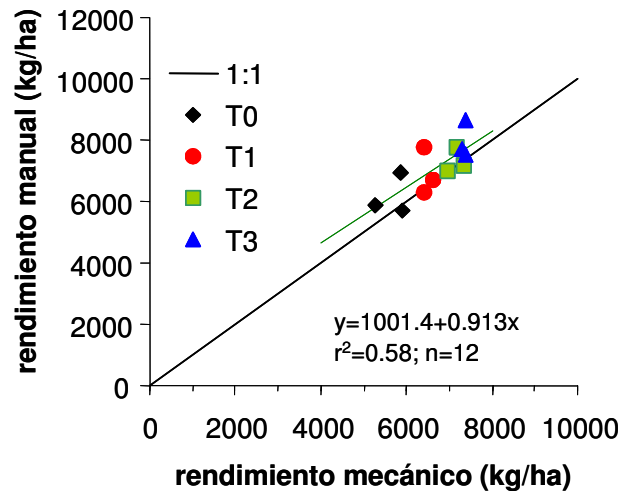


Figura 10: Relación entre el rendimiento mecánico y el rendimiento manual expresado en kg/ha para cada una de las franjas (tratamiento x repetición). Se indica el ajuste obtenido y la relación 1:1.

El **rendimiento manual** fue significativamente ($p < 0.05$) menor en el testigo que en los fertilizados (Tabla 4).

La cantidad de plantas **quebradas en 10 m²** fue en promedio 0.46 plantas, sin diferencias significativas entre tratamientos. El valor más alto se encontró en el tratamiento 1 (Tabla 4).

La **prolificidad** del cultivo presentaba en promedio 1.01 espigas por planta, sin diferencias significativas entre tratamientos. Los valores más altos se presentaron en los tratamientos de dosis más altas: T2 y T3.

Tabla 4: Rendimiento manual (R manual); Número de granos por m² (N G m²); Peso individual de los granos (P G); plantas quebradas en 10 m²; Prolificidad (número de espigas/planta). Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias p<0.05.

	R Manual (kg/ha)	N G / m ²	P G (g)	pl queb.en 10 m ²	Prolificidad
T0	6183.6 ^c	2993.3 ^a	0.2080 ^a	0.4523 ^a	1.012 ^a
T1	6924.7 ^{bc}	3133.3 ^a	0.2207 ^a	0.6830 ^a	0.999 ^a
T2	7304.9 ^{ab}	3434.7 ^a	0.2152 ^a	0.2500 ^a	1.016 ^a
T3	7955.4 ^a	3439.7 ^a	0.2318 ^a	0.4711 ^a	1.016 ^a
Valor Promedio	7092.15	3250.25	0.21893	0.46408	1.0106
ee	371.7	197.764	0.01598	0.28	0.0013

El valor promedio del **número de granos/m²** fue de 3250 sin diferencias significativas entre tratamientos. Los valores más altos lo presentaban los tratamientos T2 y T3 respectivamente, siendo un aumento del 14.83 % en base al testigo; el T1 presentó un aumento del 4.67 % con respecto al testigo (Tabla 4).

El **peso** promedio individual de los granos fue de 0.219 g, sin diferencias significativas entre tratamientos. Los granos más pesados se encontraron en el tratamiento 3, representando un 11.1 % de aumento con respecto al tratamiento testigo (Tabla 4). El rango de pesos varió entre 0.208 y 0.232 g.

Ambos componentes (número de granos y peso individual de granos), explican las variaciones en el rendimiento. Sin embargo, el número de granos solamente explica el 22.7% de la variación del rendimiento frente al 42.9 % que explica del peso individual (Figura 11 a y b).

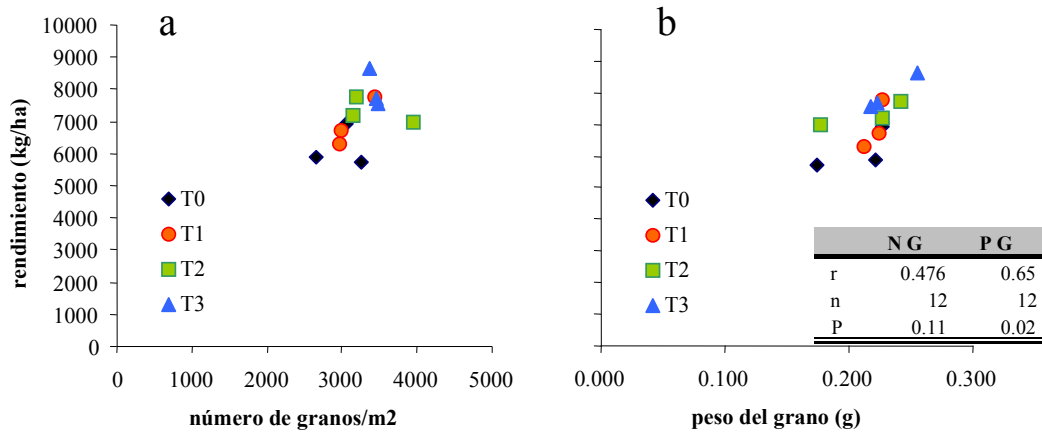


Figura 11: Relación entre el rendimiento manual y **a:** el número de granos por m², **b:** el peso individual del grano. La tabla señala los valores del coeficiente de correlación (r), el número de datos (n) y la probabilidad (P) para las relaciones anteriores.

En general, el aumento en número de granos en un mismo tratamiento, se traduce en una caída del peso de los mismos, manteniendo un mismo nivel rendimiento (Figura 12). Por lo tanto los aumentos en el rendimiento al incrementar las dosis se logran por incremento en el número de granos, en el peso de los granos o por una combinación de ambos.

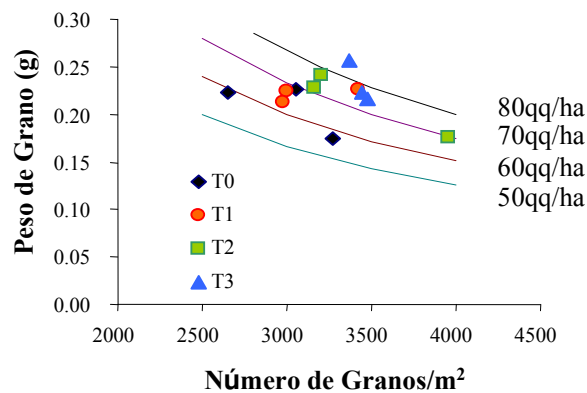


Figura 12: Relación entre el peso del grano y número de granos por m². Las líneas representan curvas de isorendimiento.

La **biomasa aérea** a madurez presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$; Tabla 5). El valor mayor correspondió al tratamiento 3 que incrementó la biomasa en un 35.4 % respecto del testigo.

El **índice de cosecha** (IC) promedio fue de 38.5 %, sin diferencias significativas entre tratamientos. El tratamiento 3, que había presentado el mayor valor de biomasa, mostró el menor valor de IC. Debido a la estabilidad observada en el IC entre tratamientos, la variación en los rendimientos fue explicada en gran proporción ($r^2 = 0.78$) por los valores de biomasa alcanzados a madurez por el cultivo (Figura 13).

Tabla 5: Índice de cosecha (IC); Biomasa aérea a madurez (B); Letras distintas indican diferencias significativas entre las medias $p < 0.05$.

	IC	B (g/m ²)
T0	38.6 ^a	1598.2 ^b
T1	38.4 ^a	1807.4 ^{ab}
T2	40.0 ^a	1827.4 ^{ab}
T3	36.9 ^a	2164.4 ^a
Valor Promedio	38.5	1849.4
ee	1.22	112.25

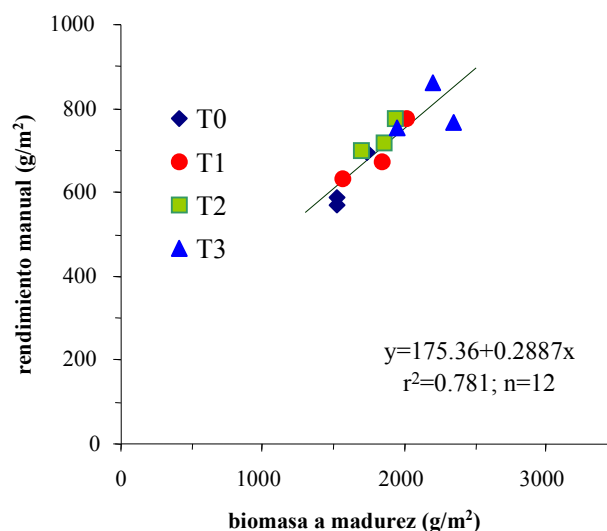


Figura 13: Relación entre el rendimiento y la biomasa aérea a madurez del cultivo de maíz para 4 tratamientos.

En estado vegetativo, el tratamiento testigo (T0) no alcanzó el 30% de cobertura del suelo, y esto se asoció con una menor cobertura respecto de los tratamientos fertilizados, al momento de floración. Los tratamientos fertilizados (T1, T2, T3), presentaron una mayor cobertura con respecto al testigo en estadios más tempranos, y éstas fueron cada vez mayores a medida que se incrementaron las dosis. Todos los tratamientos fertilizados alcanzaron valores del 95 % de cobertura o lo superaron en floración (Figura 14).

Una situación similar se observó con los valores de índice de área foliar (IAF), en los que el testigo no llega a superar valores de 3.61 en floración. Los tratamientos fertilizados, muestran valores de IAF más elevados. El T3 alcanza valores entre 4 y 4.5, lo que indicaría que se alcanzó la cobertura máxima antes de floración.

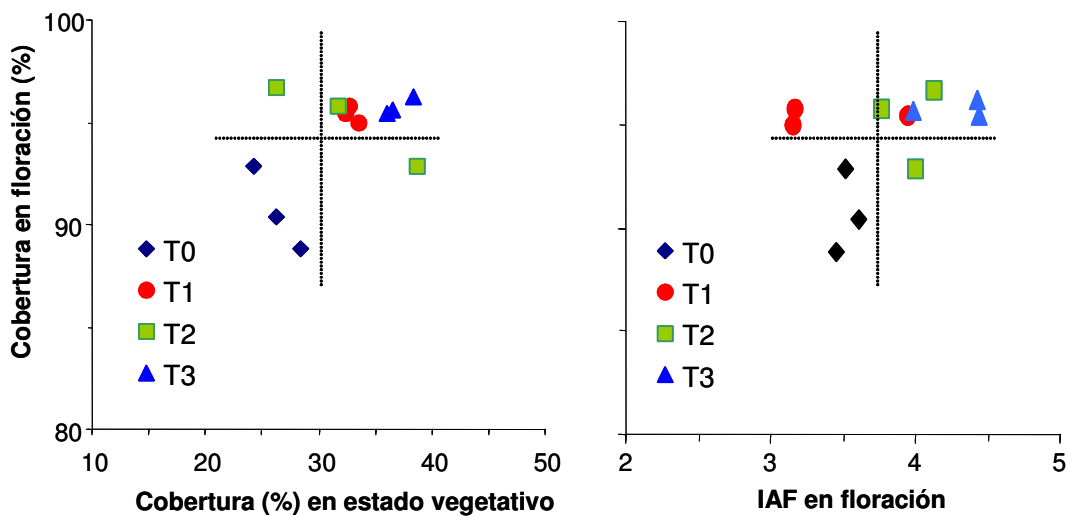


Figura 14: Cobertura en floración en función de la cobertura en estado vegetativo y IAF en floración para los cuatro tratamientos. La agrupación en cuadrantes muestra la separación de los valores del testigo en el cuadrante inferior izquierdo.

Se observó una tendencia ($p < 0.16$) a que a mayores valores de IAF en floración, asociados a las dosis crecientes de N, aumentó el número de granos/m² (Figura 15).

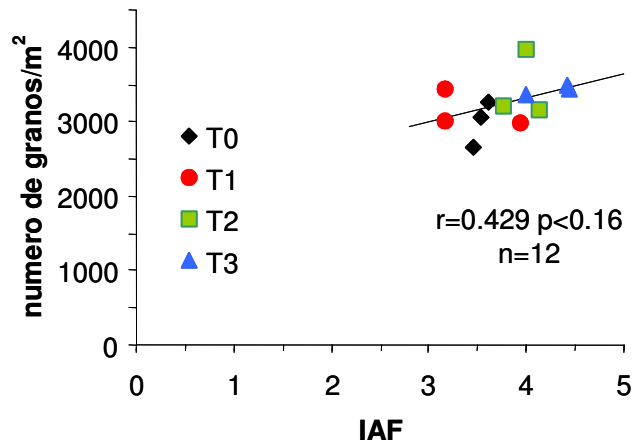


Figura 15: Relación entre el índice de área foliar y el número de granos/m².

La cobertura al momento de floración tuvo mayor asociación con el rendimiento ($r^2=0.69$) que con el peso del grano ($r^2=0.49$) (Figura 16). No se encontraron asociaciones significativas entre el NHVBE y el rendimiento y sus componentes (Tabla 6).

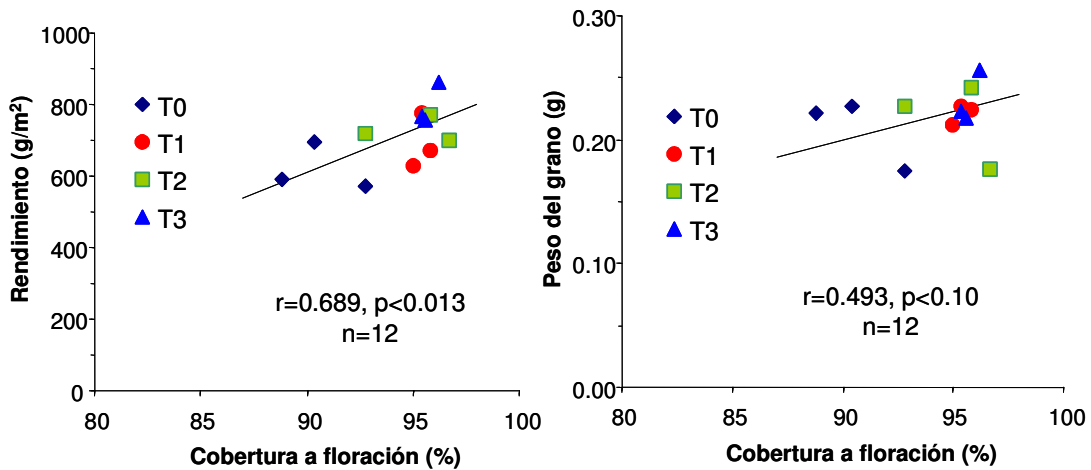


Figura 16: Relación entre la Cobertura a floración y el rendimiento y Peso del grano.

Tabla 6: Valores de r. Coeficiente de correlación.

	IAF	Cob Flo	NHVBE
Rto	0.340	0.691	0.283
N G	0.430	0.267	0.268
P G	0.017	0.493	0.071

Nitrógeno a cosecha

A cosecha, el nivel de nitrógeno residual del suelo era de 20 kg N/ha, en promedio. Sólo el tratamiento 3 mostró niveles de N más altos a cosecha, con un valor cercano a los 30 kg N/ha (28.9) en los primeros 40 cm de profundidad. Este rango de valores fue similar a la situación inicial, en que se contaba con 19.3 kg N/ha.

La acumulación de N en la biomasa aérea caracteriza la oferta de N. La **absorción de N** difirió significativamente entre los tratamientos. Para los niveles más altos (T2 y T3) la absorción fue mayor que para el testigo. El rango de valores fue de 198.3 kg N/ha para el T0, a 324.8 kg N/ha para el T3 (ee: 12.77, Figura 17). La diferencia de absorción de N entre el T3 y el T0 es de 126.4 kg/ha que resultó superior a la dosis más alta aplicada (91.2 kgN/ha) y representa un incremento de 64% en la absorción a cosecha.

Se observa una respuesta creciente a la aplicación de nitrógeno en contenido de N en grano y en resto vegetal. El **contenido de N en grano** difirió significativamente entre los tratamientos. El rango de valores medido en kg de N/ha, va desde 140.6 para el T3, a 86.8 para el T0 (ee: 7.01, Figura 17). La diferencia entre el T0 y el T3 es de 53.8 kg/ha, lo que representa un 60% de incremento. Los T2 y T3 difieren del testigo en 34.89 y 53.79 kgN/ha, respectivamente.

El aumento en contenido de N en grano no se debió solamente al aumento del rendimiento (Tabla 4) sino también a un incremento en el porcentaje de N en grano, éste toma valores de 1.39% (T0) a 1.77% (T3) equivalentes a 8.71% y 11.06% de proteína para el T0 y T3 (+27% de variación. Tabla 7. Figura 18).

El **contenido de N en el resto vegetal** presenta diferencias significativas entre tratamientos, como también lo hace el porcentaje de N en resto. Los valores de los tratamientos se encuentran en una rango de 111.5 a 184.1 kg/ha para el contenido de N en resto (ee: 8.51, +65% incremento, Figura 17) y de 1.14% a 1.36% para el porcentaje de N en resto (+19% incremento, Figura 18a).

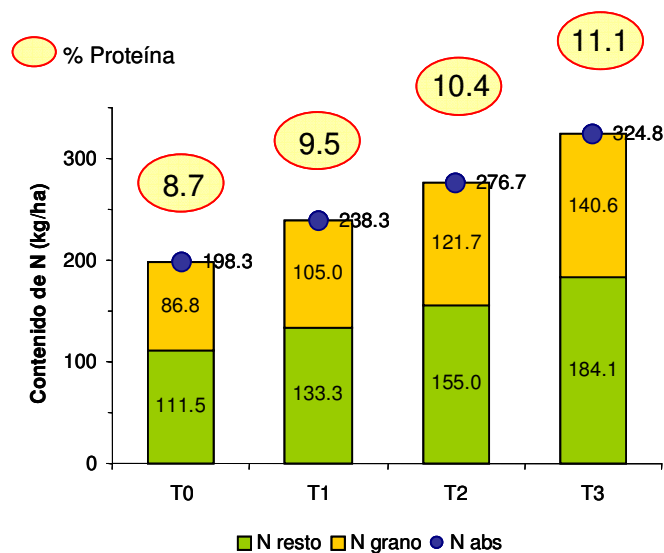


Figura 17: Las barras representan el contenido de nitrógeno promedio (kgN/ha) en el resto vegetal y en grano, para cada tratamiento. El círculo lleno muestra la absorción total de N (kgN/ha), (contenido de N resto + N grano). Los círculos superiores indican el porcentaje de proteína.

La relación entre el contenido de N en grano y N absorbido (grano + resto), determina el **ICN**. El **ICN** resultó estadísticamente igual, no presentando diferencias significativas entre los tratamientos. Los valores se encontraron entre 44.18 (para el

T0) y 43.32 (para el T3). $ee:1.817$ (Figura 18a; Tabla 7). El valor promedio para los tratamientos fue de 43.73, que resulta en un valor más bajo que el esperado. Al aumentar la dosis aplicada, del total de nitrógeno absorbido, se destinó una mayor proporción a resto vegetal (Figura 18b) que a grano en todos los tratamientos, lo que determina un ICN bajo.

Tabla 7: Contenido de N en resto vegetal, Contenido de N en grano, Porcentaje de proteína en grano, Índice de Cosecha (ICN), Nitrógeno absorbido por el cultivo, para los cuatro tratamientos analizados. Letras distintas indican diferencias significativas $p < 0.05$.

	T0	T1	T2	T3
N resto (kg/ha)	111.49 ^a	133.27 ^{ab}	155.02 ^{bc}	184.14 ^c
N grano (kg/ha)	86.83 ^a	105.01 ^{ab}	121.72 ^{bc}	140.62 ^c
Prot grano %	8.71 ^a	9.5 ^b	10.4 ^c	11.06 ^c
ICN	43.45 ^a	44.18 ^a	43.95 ^a	43.32 ^a
N abs (kg/ha)	198.32 ^a	238.28 ^{ab}	276.75 ^b	324.76 ^c

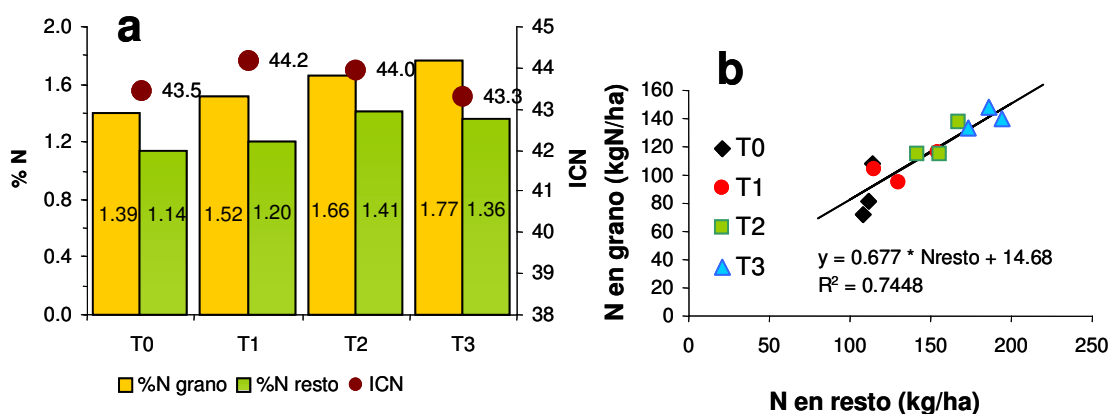


Figura 18: (a) % de nitrógeno en grano y en resto vegetal para cada tratamiento. El círculo representa el ICN para cada tratamiento. (b) Relación entre N en grano y N en resto, para los cuatro tratamientos.

Relación entre rendimiento y absorción de nitrógeno

El rendimiento en grano se relacionó con la absorción de N por parte del cultivo, con un ajuste del 85%. Se observa que las franjas que obtuvieron un mayor rendimiento, también absorbieron más nitrógeno (en planta y grano) durante su ciclo (Figura 19a).

Para el rango de dosis más bajas (T0 y T1) existe una relación lineal entre el rendimiento y la absorción de nitrógeno. Para la dosis más alta (T3) se insinúa un plateau que indicaría la falta de respuesta en rendimiento para absorciones superiores a ca. 295 kgN/ha. El rendimiento alcanzado corresponde a 7900 kg/ha. Los rendimientos correspondientes a las dosis T2 se ubicarían en los límites de la respuesta lineal.

La relación entre el nitrógeno aplicado y el nitrógeno absorbido representa el valor de eficiencia de absorción. Para el promedio de los tratamientos, ésta eficiencia resultó en 1.37. La eficiencia de absorción (N_{abs}/N_{apl}) para los tratamientos T1, T2 y T3, fue de 1.37, 1.29, 1.39 respectivamente (Figura 19b).

Se observa una respuesta lineal y creciente del N absorbido en función del N aplicado. El observar una respuesta lineal, implica que no estaría saturada la absorción de N, por lo que podría continuar aumentando la absorción. La ordenada al origen, indica la absorción del cultivo en ausencia de aplicación de fertilizantes; ésta resultó en 197,6 kg N/ha (Figura 19b).

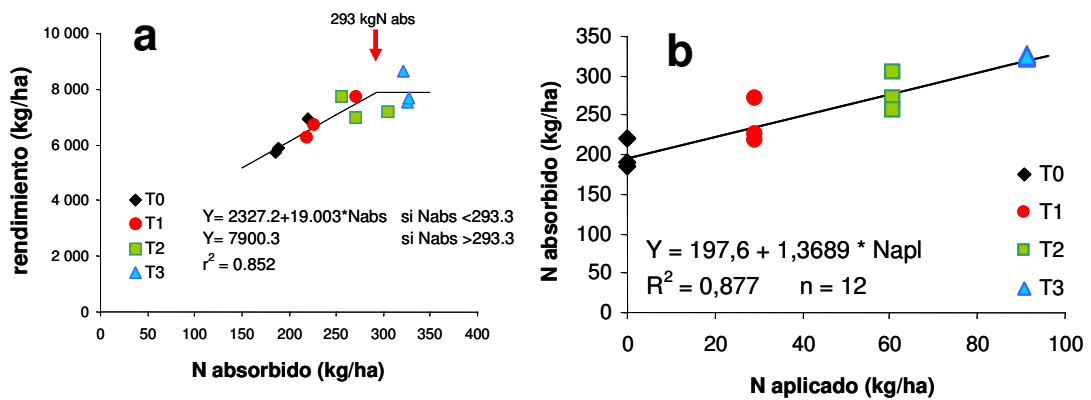


Figura 19: Relación entre: **(a)** Rendimiento y nitrógeno absorbido en planta entera (grano + resto) para los cuatro tratamientos. **(b)** N absorbido y N aplicado con el fertilizante.

Hay una respuesta positiva en el **porcentaje de N en grano**, al incrementar el nivel de **N absorbido** (Figura 20), con un ajuste del 74%. Al incrementar la absorción de N más allá de 293 kg N/ha absorbidos, se mejora la calidad del grano por el aumento en el contenido de proteína en grano, sin obtener mejoras en el nivel de rendimiento.

La relación entre **rendimiento y la concentración de N en grano** fue ajustada mediante una función lineal ($R^2 = 0.54$), sin observar un plateau de rendimiento para las dosis de N probadas.

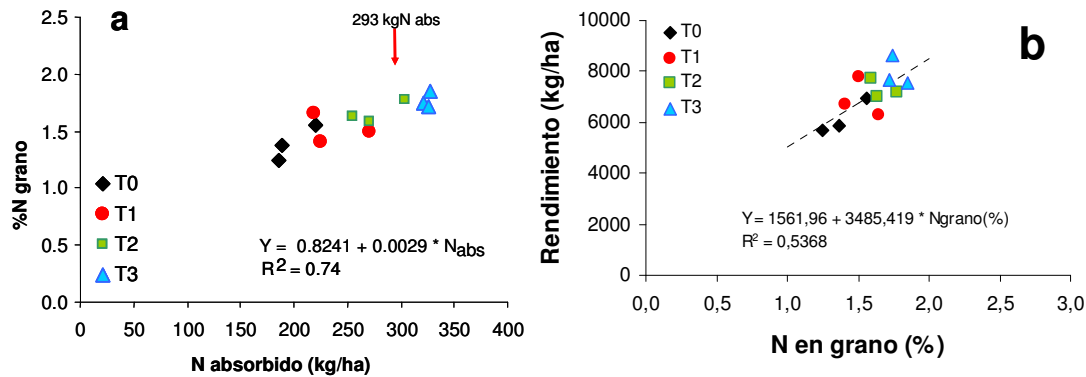


Figura 20: (a) Concentración de nitrógeno en grano en función de la oferta de nitrógeno, evaluada a través del nitrógeno absorbido, para los cuatro tratamientos. (b) Relación entre el rendimiento y porcentaje de N en grano.

Eficiencia del uso de Nitrógeno

La eficiencia del uso del N (EUN) puede expresarse como kg grano/ kg N absorbido (EUNgrano). La EUNgrano se incrementó linealmente a medida que la oferta de N disminuyó (ésta última evaluada a través de N absorbido, Figura 21) con un ajuste del 83%. Los valores de EUNgrano variaron entre 23.2 (para el T3) y 31.5 kg de grano producido por kg de N acumulado en biomasa aérea (para T0).

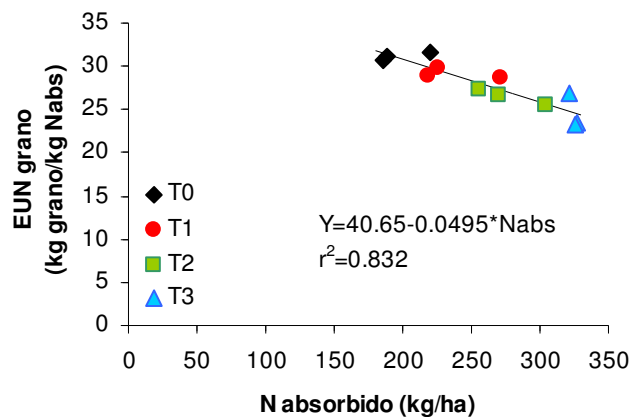


Figura 21: Eficiencia del uso del Nitrógeno (EUN grano), expresada como kg de grano por kg de nitrógeno absorbido, en función de la oferta de nitrógeno, evaluada a través del nitrógeno acumulado en biomasa aérea, para los cuatro tratamientos.

Al expresar la EUN como kg de biomasa total / kg de N absorbido (EUN biomasa), se observa la misma tendencia que para la EUNgrano. La EUNbiomasa se incrementó linealmente a medida que la oferta de N disminuyó (Figura 22). El ajuste es del 63%. Los valores de EUNbiomasa variaron entre un valor máximo de 82.1 kg de biomasa producida por kg de N absorbido para el T0, a 59.8 como valor mínimo para el T3. (*medias: 80.7 y 66.6*).

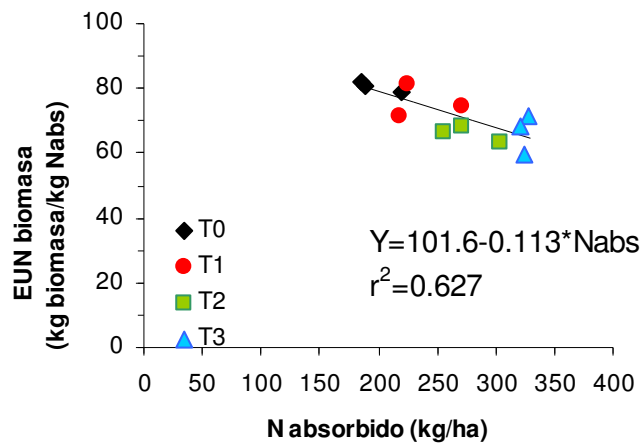


Figura 22: Eficiencia del uso del nitrógeno (EUN biomasa), expresada como kg de biomasa total por kg de nitrógeno absorbido, en función de la oferta de nitrógeno, para los cuatro tratamientos.

Los requerimientos de absorción del nutriente por quintal de grano producido (coeficiente b) calculados resultaron entre 3.2 a 4.1 kgN/qq, para el T0 y T3 respectivamente, que se encuentran muy por encima de lo esperado.

Balance de Nitrógeno

Aporte Neto

El aporte neto de N durante el ciclo del cultivo no difirió entre los tratamientos. El valor medio fue de 217.8 Kg de N/ha, ee: 12.78. La diferencia entre el T3 y el T0 fue de 44 kgN/ha, lo que representa un 22% de incremento (Figura 23). Analizando el aporte neto de suelo en función del rendimiento obtenido, se encuentra que por cada quintal de grano producido, aumenta en 2.5 kg el N aportado por el suelo ($r^2 = 0.754$). El mejor desempeño del cultivo permitiría incrementar el aporte extra del suelo.

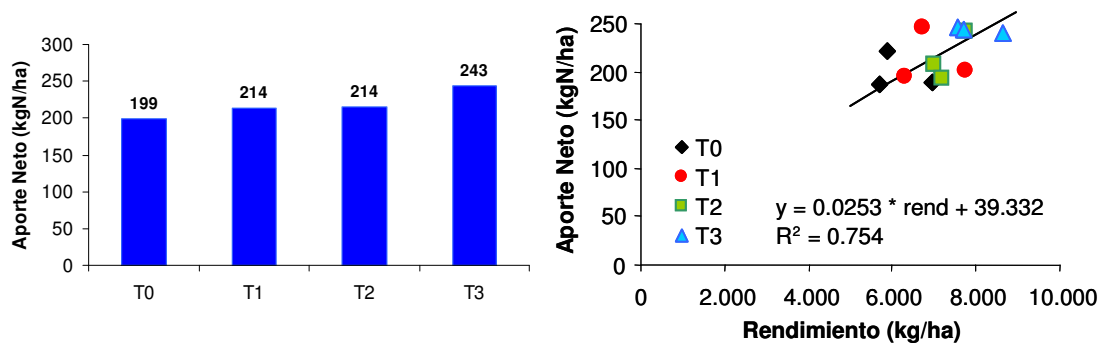


Figura 23: Aporte Neto de N (kg/ha) para cada tratamiento, y en función del rendimiento en grano.

Mineralización

La estimación de la **mineralización neta** de nitrógeno se efectuó a partir de las franjas sin agregado de nitrógeno (T0), de acuerdo a la fórmula propuesta por Huggins and Pan (1993):

$$N_{\min} = N_{\text{absorbido por parcela sin fertilizar}} + N\text{-NO}_3_{\text{final}} - N\text{-NO}_3_{\text{inicio}}$$

La mineralización de N durante el ciclo del cultivo resultó, en promedio 200 kgN/ha. La **tasa de mineralización** calculada para las condiciones dadas fue de 3.61%. Al comparar los valores con aquellos esperados ambos están más cercanos a las estimaciones más altas.

Cálculo Económico

El precio promedio para el año 2004 de la tonelada de urea granulada fue de 335 U\$S y el precio del maíz en dársena en el mismo período fue de 69.49 U\$S/tonelada de grano (Márgenes agropecuarios, 2004). Con estos valores la relación de precios nitrógeno/grano fue de 10.4. De tal forma si se compara esta relación con la respuesta a la fertilización, se observa que resultó económicamente rentable incluso la aplicación de la dosis más alta de fertilizante. (Figura 24).

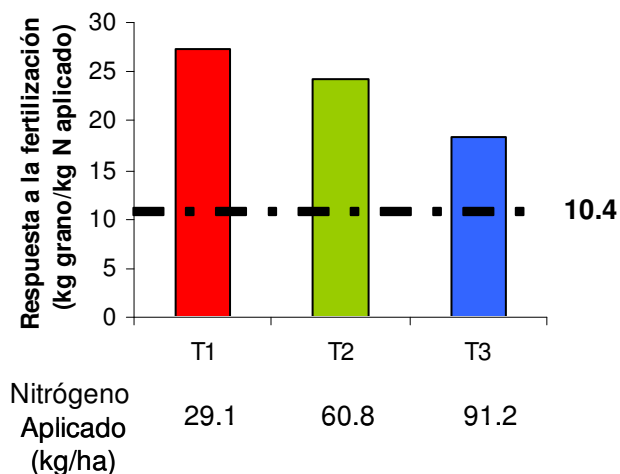


Figura 24: Respuesta a la fertilización para las dosis aplicadas. La línea horizontal representa la relación de precios nitrógeno/grano para el año 2004

DISCUSION

Niveles de rendimiento alcanzados

El año de la experiencia resultó representativo respecto a las medias históricas, en relación a la condición hídrica. Aunque el período previo a la floración presentó registros menores a la media, la ocurrencia de lluvias frecuentes 20 días antes de floración no habría condicionado seriamente el establecimiento del número de granos, ya que se alcanzó la cobertura total en los tratamientos fertilizados, la cual se sostuvo hasta el final del período crítico.

Los rendimientos máximos logrados (ca 7400 kg/ha en las franjas y 8000 kg/ha en las parcelas), se ubican próximos a los valores más altos citados para lotes de producción de la región (Mercau, Livingston -productor del establecimiento- , comunicación personal). Los rendimientos son inferiores a los observados comúnmente en regiones templadas en nuestro país. Cassina et al. (2004) registraron para el genotipo AX888MG en la zona Norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe rendimientos promedio de 9888 kg/ha en la Campaña 2003/2004.

Muchow (1994) observó que bajo condiciones de altas disponibilidad de N, los rendimientos de maíz fueron mayores en condiciones ambientales subtropicales que en tropicales debido al menor régimen térmico, lo que permite extender la duración del ciclo del cultivo. Muchow (1990) explicó variaciones en el potencial de rendimiento en maíz en diferentes localidades en términos del régimen de temperatura y radiación, obteniendo máximos rendimientos en aquellos ambientes con bajas temperaturas y alta radiación incidente.

En la zona en estudio, las **temperaturas** alcanzan valores muy elevados cerca del momento de determinación del número de granos. En el período crítico,

durante el mes de enero, se registran temperaturas máximas medias de 34° C y temperatura media de 27.2° C para este mismo momento.

Efectos del nitrógeno sobre el crecimiento y la determinación del rendimiento

Con el nivel de fertilidad inicial (tratamiento T0), se evidenció una limitación de N ya desde etapas tempranas del cultivo. Con *ca.* 7 hojas expandidas (al mes de la siembra y previo al período de rápido crecimiento del cultivo), ya se manifestaron variaciones de **cobertura** entre tratamientos. No se detectaron diferencias en la senescencia y tampoco en el número de hojas, lo que indicaría una menor expansión foliar en el testigo, en concordancia con lo propuesto por Muchow (1988), quien señala un efecto mayor ante la deficiencia de N sobre la expansión foliar y no sobre el ritmo de aparición de hojas. Uhart y Andrade (1995) ya habían descrito estos efectos y además lo observaron desde estadíos tempranos (V6-V7).

La tendencia anterior se sostuvo hasta floración. El IAF resultó menor en el testigo, principalmente por una menor área de las hojas ubicadas por debajo de la posición de la espiga y una mayor senescencia. El menor valor de IAF del testigo condicionó la posibilidad de alcanzar la cobertura total, ya que no se superaron los valores críticos. Para el maíz se citan valores de IAF próximos a 4 o ligeramente superiores como requisito para lograr la plena intercepción (Uhart y Andrade, 1995). Solamente las dosis T2 y T3 lograron alcanzarlo.

Sin embargo, a diferencia de lo citado por Uhart y Andrade (1995), no se observó una reducción significativa del área de las hojas superiores en el testigo respecto de los tratamientos fertilizados. Esto podría evidenciar una atenuación en la restricción nitrogenada previo a la floración debido a un aporte importante de la

mineralización registrada en los testigos, probablemente regulada por la mejora de la condición hídrica.

Aunque el **número de granos/m²** no presentó diferencias significativas, hubo un 15% de incremento en las dosis mayores frente al testigo. Posiblemente la menor disponibilidad de nitrógeno redujo la tasa de crecimiento del cultivo en el período crítico (parcialmente por una menor interceptación). Esta circunstancia o bien una menor tasa de acumulación de nitrógeno en floración pudieron determinar un menor establecimiento de granos en el testigo (Uhart y Andrade, 1995).

El número de granos/m² obtenido, parece saturarse en una cantidad de 3250 granos/m² al agregar nitrógeno. Basado en experiencia de Ferraris y Couretot (2004) en Pergamino, el número de granos/m² de referencia para el genotipo utilizado es de 3132 granos/m², valor comparable al promedio obtenido en las dosis más elevadas. Esta observación confirmaría que las dosis más altas maximizaron el número de granos y, por otra parte, que la falta de lluvias en las primeras etapas del cultivo no constituyeron una restricción severa ya que no comprometieron seriamente la generación de área foliar.

Tomando en consideración los valores de este experimento y los registrados en otras zonas, el genotipo utilizado se caracterizaría como un híbrido de bajo número de granos (entre 2800 y 4000 granos/m²). Este tipo de híbridos generalmente también presenta un peso de grano elevado, superior a 300 mg (Maddonni et al., 1998). En este ensayo los valores máximos de peso observados no superan 235 mg, aunque tienden a ser más pesados (no significativamente) en las mayores dosis. Para este genotipo Ferraris y Couretot (2004), señalan un peso de referencia de 294 mg para Pergamino, lo que concordaría con las características

generales descritas por Maddonni et al (1998) para híbridos de bajo número de granos.

Si se considera la relación entre el área foliar luego de floración y el número de granos como una estimación de la relación fuente/destino durante el llenado, el rango de variación fue estrecho (entre 11.3 y 12.6 cm²/grano). Sin embargo como este valor sólo refleja el punto de partida al comienzo del llenado, una disponibilidad mayor de N pudo haber contribuido a sostener el área foliar. De hecho el número de hojas verdes bajo la espiga fue mayor en las dosis más altas.

Parecería que hubo un efecto general del ambiente sobre la determinación del peso final de los granos que no pudo revertirse por el agregado de nitrógeno, aun cuando hubo efectos moderados sobre las variables que componen la relación fuente destino posfloración.

Durante el final del período crítico hubo falta de precipitaciones, coincidiendo con elevadas temperatura propias de la región. Si un déficit hídrico o un golpe de calor se superponen con la fase temprana del llenado de granos (fase "lag") puede quedar comprometido el tamaño final del grano. El número de células endospermáticas es un factor limitante en el tamaño potencial del grano de maíz como destino, el cual está mediado por la tasa y la duración de la actividad mitótica en el endosperma. Este número está genéticamente determinado (Jones et al, 1996). Genotipos de peso elevado poseen altas tasas de llenado y elevado número de células endospermáticas (Reddy and Daynard, 1983).

Las variaciones ambientales durante la fase de llenado efectivo modulan el peso final de los granos. La tasa de crecimiento, es función directa de la temperatura, con un aumento de 0,3 mg día⁻¹ por cada grado de incremento en la temperatura media

entre 15 y 26° C. La duración del período de llenado es función de la fuente fotosintética disponible y de la temperatura que determina la tasa con la que dicha fuente es demandada (Cirilo y Andrade, 1996). Aumentos de temperatura por encima de 23° C durante esta fase promueven un incremento en la tasa de llenado que no compensa la disminución en la duración del período (Westgate, 1995), creando reducciones en el peso final del grano.

En las dosis más elevadas no se manifestó un significativo aumento del rendimiento por un mayor **peso de los granos**. Sin embargo se mejoró la calidad de los mismos, por el incremento en el porcentaje de N. Los valores observados superaron el mínimo valor de contenido de 11 mgN g⁻¹ (Muchow, 1994) requerido para sostener el crecimiento del grano en todas las dosis ensayadas. Además en las dosis más altas se superó el valor máximo generalmente observado en maíz de 16 mg N g⁻¹, ya que se lograron valores de 17.7 mgN g⁻¹. Muchow (1998), encontró resultados similares en situaciones de alta disponibilidad de N o déficit hídrico. En un estudio que se realizó durante 70 años en la zona núcleo maicera de los Estados Unidos de América, se observó que los veranos que tienen al mes de julio (floración – comienzo de llenado de grano) con temperaturas mayores a 25° C, el contenido relativo de proteína aumentaba por arriba de los valores normales. También se observó que el contenido de proteína está inversamente relacionado con la cantidad de lluvias del mismo mes (Earle, 1977). En las condiciones experimentales de este ensayo, una combinación de estos efectos pudo haber determinado los niveles altos de nitrógeno en grano.

No se pudo identificar un valor umbral definido de contenido de N por encima del cual ya no hay incrementos en el rendimiento. La dosis más alta coincidió con el

rendimiento mayor y el más alto valor de nitrógeno en grano. Uhart y Andrade (1995) establecieron un valor crítico para la relación nitrógeno grano / rendimiento del maíz, para determinar la existencia de déficit o exceso de nitrógeno. El límite es 12 g kg^{-1} por debajo del cual el rendimiento se encuentra afectado por deficiencias de nitrógeno en suelo. Lahitte et al (1997) señala que en híbridos de maíz de diferente año de liberación (desde 1982 a 1993) los mínimos valores de N en grano que aseguraban alcanzar el rendimiento máximo se ubicaban entre 12 mg N g^{-1} y 14.9 mgN g^{-1} para el híbrido más nuevo y el más antiguo respectivamente. Las condiciones ambientales probablemente provocaron una distorsión en esta relación. La ausencia de este umbral pudo deberse a que se afectó en forma diferencial la generación del rendimiento y la absorción de nitrógeno, desplazando el rango de contenidos de N obtenidos hacia valores mayores que los citados en otros experimentos.

Absorción y balance de nitrógeno

La acumulación de N en la biomasa aérea caracterizó la oferta de N. Según Otegui (1992), el maíz requiere acumular en la parte aérea aproximadamente 2.28 kg N absorbido por qq de grano producido, y las variaciones esperables se encuentran dentro de un rango de 1.6 a 2.3. El valor observado para el testigo de $3,2 \text{ kgN/qq}$ superó ampliamente dicho requerimiento. En los tratamientos donde se aplicó nitrógeno el aumento de este coeficiente (de 3.44 a 4.08 kgN/qq) sugiere una restricción para incrementar el rendimiento en grano que, no obstante, no impidió una mayor absorción de nitrógeno por el cultivo.

Las eficiencias de absorción para el nitrógeno inicial en la siembra y el proveniente del fertilizante son similares, y generalmente oscilan entre 0,4 y 0,6; mientras que la eficiencia para el nitrógeno mineralizado durante el ciclo del cultivo es mayor (0,7 a 0,8; Meisinger, 1984). Otegui (1992) propone un valor de eficiencia de 0.70 para situaciones de buena disponibilidad hídrica. Macdonald et al. (1997), encontraron que la recuperación del fertilizante aplicado fluctuaba entre el 26 y el 60%, dependiendo del cultivo y las condiciones ambientales. Echeverría y Sainz Rozas (2001), observaron recuperación del 64 al 52% del nitrógeno aplicado al maíz, dependiendo de la dosis utilizada. Rimski-Korsakov et al (2004) encontraron en un ensayo de maíz que la recuperación del fertilizante por la planta entera varió entre 48 y 61%, siguiendo una relación inversa con la dosis de nitrógeno aplicado.

En este ensayo, la eficiencia observada superó en un 196 % al valor estimado según Otegui (1992). Según Osmond y Riha (1996) los valores de eficiencia de absorción pueden verse incrementados por situaciones tales como texturas más finas, pH más altos, menores precipitaciones, tierras de desmonte y un mayor número de aplicaciones de fertilizante. A su vez, la aplicación de nitrógeno puede actuar promoviendo la exploración del perfil del suelo por parte de las raíces, permitiendo así una mayor absorción de nitrógeno. Algunos autores encontraron incrementos en la absorción de nitrógeno edáfico cuando se fertilizaba. Esto puede estar originado en dos causas: I) incrementos en la biomasa radical que generen una mayor absorción a partir del pool edáfico (Yoshida et al, 1977). II) efecto “priming”, el incremento de la mineralización de la materia orgánica con la fertilización (Kuzyakov et al, 2000). Sin embargo, los estudios realizados por Rimski-Korsakov et al (2004)

encontraron que la fertilización no influyó el aporte de nitrógeno a la planta generado por el suelo.

El valor de mineralización próximo a 200 kgN/ha resultó más alto que lo esperado. Mercau (comunicación personal), obtuvo valores de mineralización aparente en un rango que va desde 0 a 75 kg/ha para un cultivo de maíz, en la misma zona (en suelos de Ceres y Villa Minetti). Para suelos de Balcarce en condiciones de agricultura continua y labranza de tipo convencional con buena disponibilidad hídrica (aunque con temperaturas habitualmente no tan altas como en este experimento), Echeverría y Bergonzi (1995) citan que se liberarían por mineralización aproximadamente 150 kg N ha⁻¹ durante el ciclo del cultivo de maíz. En condiciones de disponibilidad hídrica menor, la estimación del N mineralizado disminuye a 90 kg ha⁻¹. En el Norte de la provincia de Buenos Aires la oferta media de nitrógeno por mineralización sería cercana a los 120 kg N ha⁻¹ (mínimo: 19 kg N ha⁻¹; máximo: 230 kg N ha⁻¹) para el período siembra – madurez, explicando el 80% de la variabilidad en la absorción de nitrógeno por los cultivos (Di Nápoli y Maddonni, 1996). La fracción de nitrógeno mineralizada en el Norte de la provincia de Buenos Aires y Sur de Santa Fe en cultivos de maíz sin fertilizar en dos campañas resultó en 153 y 82 kg N ha⁻¹ (Maddonni et al, 2003).

Estos valores ponen de manifiesto la importancia del aporte de N por este proceso. En cultivos de verano el N mineralizado durante la estación de crecimiento puede representar la mayor parte del requerimiento de N del cultivo. En lotes de producción de maíz, Alvarez et al (1992) observaron que aproximadamente 70% del N absorbido a madurez correspondió a la mineralización de N desde los

componentes orgánicos del suelo (humus + residuos) en la región de la Pampa Ondulada.

La **tasa de mineralización** calculada para las condiciones dadas fue de 3.61%. Al compararlo con valores esperados, está más cercano a los valores más altos. En la zona tropical Osmond y Riha citan valores de 3 %, mientras que Otegui (1992) establece para el cultivo de maíz en el Norte de Buenos Aires y Sur de Santa Fe, tasas de mineralización de la materia orgánica entre 3.2% y 2.1% para condiciones hídricas no restrictivas y en secano respectivamente. Ruiz et al (1997) en la misma región estableció en cultivos de maíz en secano para suelos con pH cercano a 6.2, valores de tasa de mineralización entre 3.22% y 1.98% en lotes con una historia agrícola inferior a 5 años o con más de 5 años respectivamente. En suelos más ácidos (pH = 5.6) y con más de 5 años de agricultura continua la tasa se redujo a 1.67%.

El nitrógeno residual en el suelo a madurez fue similar al observado inicialmente. Hubo una tendencia a presentar valores mayores con la dosis más alta. Además fue mayor el contenido en el horizonte 20-40 cm. La ocurrencia de precipitaciones intensas en los últimos quince días del ciclo coincidiendo con la madurez fisiológica (figura 5) podría haber generado algún principio de lixiviación, lo que llevaría a subestimar este nitrógeno residual.

Eficiencias de uso del nitrógeno

Para el caso del cultivo de maíz, es frecuente considerar valores EUNgrano de 40 - 50kg grano/kg N absorbido (Uhart, 1990; Daniel *et al.* 1984), por lo que el valor obtenido en el testigo (ca. 32 kg grano/kg N absorbido) es inferior a lo esperado. A

medida que la disponibilidad de N se eleva, la EUNgrano tiende a caer debido a un consumo de lujo de N que aumenta la concentración de N en grano (Uhart y Andrade, 1995). Muchow (1998) encontró que en situaciones de alta disponibilidad de N o déficit hídrico, la absorción de N fue mayor que el mínimo requerimiento para un determinado rendimiento, y la EUNgrano, por lo tanto, fue menor. Las mayores EUN que halló se asociaron con un mayor rendimiento y menor concentración de N en grano. Para absorciones similares al testigo (ca. 180 kgN/ha), Lahitte et al (1997) encontraron EUNgrano superiores (50-55kg grano/kgN) a la de este ensayo.

Si expresamos la EUNgrano como el cociente entre el ICN y la concentración de N en grano, podemos observar que la distorsión se explica por un valor muy bajo del ICN (0.44). Valores comúnmente encontrados de ICN se aproximan a 0.70 (Muchow, 1994). Osmond y Riha (1996) obtuvieron valores de ICN para maíces en la zona tropical de 61 a 75%. En este ensayo los bajos valores de ICN se explicaron por una elevada concentración de nitrógeno en la biomasa, ya que los valores de IC fueron similares a los observados en ambientes tropicales o subtropicales (0.44-0.49; Muchow, 1994).

CONCLUSIONES

La caracterización de la respuesta del cultivo de maíz a la fertilización nitrogenada en la localidad de Campo del Cielo, Santiago del Estero, se obtuvo en una campaña que se puede clasificar como favorable o de rendimientos medios/altos en términos de los registros zonales.

Hubo una restricción hídrica moderada inicial pero que se recompuso antes de floración. Durante el llenado hubo déficit moderado al final del período crítico y altas temperaturas típicas zonales.

En estados tempranos el agregado de nitrógeno mejoró la cobertura inicial, incrementó el área foliar en floración y maximizó el número de granos/m². El peso de los granos no respondió al agregado de nitrógeno a pesar de incrementos moderados en la relación fuente/destino, mostrando una restricción ambiental. La respuesta al rendimiento se saturó. Sin embargo, el porcentaje de nitrógeno en granos aumentó con las dosis más altas.

Hubo respuesta en rendimiento a la aplicación de N. La provisión inicial de N del suelo, no cubrió las necesidades del cultivo, y este respondió con incrementos en el rendimiento a medida que aumentó la absorción de N. Esta última se tradujo además en una mejora en la calidad del grano por una mayor concentración proteica.

Se afectó en forma diferencial la generación del rendimiento y la partición de N en el cultivo, ya que las condiciones ambientales distorsionaron la relación rendimiento/absorción de nitrógeno. Antes de floración se favoreció la absorción de nitrógeno y ésta se manifestó en un incremento del área foliar y número de granos.

Después de floración no se incrementó el rendimiento, pero se aumentó tanto el porcentaje de nitrógeno en grano como el nitrógeno en biomasa vegetativa.

Los ICN bajos generados por la combinación de alta absorción de N y una restricción en el rendimiento explicaron los bajos valores de eficiencia en el uso del nitrógeno.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, C.R., Alvarez, R., Steinbach, H.S., Salas, J.M., Grigera, S., 2002. Materia orgánica y fertilidad en la Pampa Ondulada. *Informaciones Agronómicas*. 14:11-14
- Andrade, F.H., Echarte, L., Rizzalli, R., Della Maggiora, A. y Casanovas, M. 2002. Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Sci*. 42: 1173-1179.
- Andrade, F.H., Echeverría, H., González, H., Uhart, S. y Darwich, N. 1995. Requerimientos de N y P de los cultivos de maíz, girasol y soja en el partido de Balcarce, Buenos Aires, Argentina. *Boletín Técnico No 134*. Estación Experimental Agropecuaria Balcarce (INTA). Balcarce, Buenos Aires, Argentina. 11 pp.
- Andrade, F.H., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A., Cantarero, M. y Valentinuz, O. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci*. 39: 453-459.
- Angeloni M.A. 1999. Medias seriadas del observatorio agrometeorológico INTA - Saenz Peña. <http://www.saenzpe.inta.gov.ar>
- Anónimo. 2000. Panorama acerca de la actividad. Caracterización de los bosques espontáneos. <http://www.cfired.org.ar/esp2/sectores/forest/chaco.htm>
- Cassina, E., Couretot, L., Ferraris, G., Martín, A., Mousegne, F., Paganini, A., Solá, R. 2004. Evaluación comparativa de híbridos de Maíz en el área de influencia de la EEA Pergamino. Campaña 2003-04. INTA
- Cirilo, A.G., y Andrade, F.H. 1996. Sowing date and Kernel weight in Maize. *Crop Science*, 36:325-331
- Daniel, P.E., Alvarez, E., Lemcoff, J.H., y Zourarakis, D. 1984. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre maíz cultivado bajo riego. II. Determinación del grado de aprovechamiento del fertilizante y de su distribución en la planta usando la metodología del nitrógeno-15. En: AIANBA, INTA, CIMMYT (ed.). *Actas III Congreso Nacional de Maíz*, Pergamino, Buenos Aires, Argentina. 6-9 Nov. 1984
- Di Nápoli, M.R. y Maddonni, G.A. 1996. Evolución del contenido de nitrógeno en el sistema suelo-planta en híbridos y líneas de maíz. *Ciencia del Suelo* 14:69-73
- Earle, F.R. 1977. Protein and oil content in corn: variation by crop years from 1907 to 1972. *Cereal Chem*. 54: 70 – 79
- Echeverría, H.E. y Bergonzi, R. 1995. Estimación de la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste bonaerense. *Boletín Técnico 135*. Est. Exp. Agrop. INTA Balcarce. 20 p.
- Echeverría, H.E. y Sainz Rosas, H.R. 2001. Eficiencia de recuperación del nitrógeno aplicado al estadio de seis hojas del maíz bajo riego en siembra directa y labranza convencional. *Ciencia del Suelo* 19 (1):57-66.
- Egli, D.B. 1998. *Seed Biology and the Yield of Grain Crops*. CAB International, United Kingdom, New York. 178 pp.
- Ferraris, G. y Couretot, L. 2004. Ensayo comparativo de híbridos comerciales de Maíz en el área de Colón - Wheelwright. Campaña 2003/04. INTA Pergamino.
- Huggins, D.R., Pan, W.L. 1993. Nitrogen Efficiency Component Analysis: An Evaluation of Cropping System Differences in Productivity. *Agron. J.* 85: 898-905.
- Jandel TBLCurve, 1992. Table Curve. Curve fitting software. Jandel Scientific Corte Madera, CA.
- Jones, R.J., Schreiber, B.M.N., Roessler, J. 1996. Crop physiology & Metabolism. Kernel Sink Capacity in Maize: Genotypic and maternal Regulation. *Crop. Sci.* 36: 301-306

- Kuzyakov, Y., Friedel, J.K., Stahr, K. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming affects. *Soil Biology & Chemistry* 32: 1485-1498.
- Lahitte, J.M., Uhart, S.A., y Andrade, F.H. 1997. Eficiencia de uso de nitrógeno en híbridos de maíz liberados en distintas épocas en Argentina. *Actas VI Congreso Nacional de Maíz*. Pergamino. III: 129-136.
- Macdonald, A.J., Poultron, P.R., Powlson, D.S., Jenkinson, D.S. 1997. Effects of season, soil type and cropping on recoveries residues and losses of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to arable crops in spring *J. of Agric. Sci.* 129:125-154.
- Maddonni, G.A., Otegui M.E., Bonhomme R. 1998. Grain yield components in Maize II. Postsilking growth and Kernel weight. *Field Crops Research* 56: 257 – 264.
- Maddonni, G.A., Vilariño, P., García de Salamone, I. 2003. Dinámica de los nutrientes en el sistema suelo-planta. *En: Satorre, E.H., Benech-Arnold, R.L., Slafer, G.A., de la Fuente, E.B., Miralles, D.J., Otegui, M.E. y Savin, R. (Eds). Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo. Capítulo 17. pp 441-477. Editorial Facultad de Agronomía. Univ. de Buenos Aires. Buenos Aires. Argentina. Primera Edición.*
- Márgenes agropecuarios. 2004. Secciones fijas, precios actuales e históricos. *Márgenes Agropecuarios. Año 20. N° 234, 14.*
- Meisinger, J.J. 1984. Evaluation plant available nitrogen in soil crop systems. *En: R. D. Hauck (ed.) Nitrogen in Crop Production. Págs. 391-416. ASA-CSSA-SSSA. Madison, USA.*
- Melchiori, R. J. M., Caviglia, O. P., Valentinuz, O. R, Liendo G., Rodríguez, P. 2004. Efecto del nitrógeno sobre el peso de grano de maíz en el centro – oeste de Entre Ríos. *Actas XIX Congreso Argentino de la ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos. Comisión 3 Fertilidad de suelos y nutrición vegetal. p 226. Disponible en CD.*
- Muchow, R.C. 1988. Effect of nitrogen supply on comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. I Leaf growth and leaf nitrogen. *Field Crops Res.* 18: 1-16
- Muchow, R.C. 1990. Effect of high temperature on grain-growth in field-grown maize. *Field Crops Res.*, 23: 145-158.
- Muchow, R.C. 1994. Effect of nitrogen on yield determination in irrigated maize in tropical and subtropical environments. *Field Crops Res.* 38: 1-13.
- Muchow, R.C. 1998. Nitrogen utilization efficiency in maize and grain sorghum. *Field Crops Research.* 56: 209-216.
- Muchow, R.C. y Davis, R. 1988. 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. y Sinclair, T.R. 1994. Nitrogen response of leaf photosynthesis and canopy radiation use efficiency in field-grown maize and sorghum. *Crop Sci.* 34: 721-727.
- Osmond, D.L., Riha, S.J. 1996. Nitrogen Fertilizer Requirements for Maize Produced in the Tropics: a Comparison of Three Computer-based Recommendation Systems. *Agricultural Systems.* 50: 37-50.
- Otegui, M.E.1992. El agua y el nitrógeno como determinantes del rendimiento en maíz. Un análisis sencillo para cuantificar los requerimientos y tomar decisiones. *Proceder Agrotecnológico.* 4: 24 -31.
- Reddy, V.M., Daynard, T. B., 1983. Endosperm characteristics associated with rate of grain filling and kernel size in corn. *Maydica* 28, 339 - 355.

- Rimski-Korsakov, H., Rubio, G., y Lavado, R.S., 2004. Absorción y partición del nitrógeno aportado por fertilización en maíz. Actas XIX Congreso Argentino de la ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos. Comisión 3 Fertilidad de suelos y nutrición vegetal. p 141. Trabajo completo disponible en CD.
- Ruiz, R.A., Satorre, E.H., Maddonni, G.A., Calderini, D.F., Miralles, D.J., Carcova, J. y Di Napoli, M.R. 1997. Bases funcionales de la respuesta a la fertilización nitrogenada de cultivos de maíz en el norte de la Provincia de Buenos Aires. Actas VI Congreso Nacional de Maíz. Pergamino. III: 121-128.
- SAGPyA. 2000. Maíz en Argentina. Area Sembrada, Cosechada, Producción y Rinde por Provincias. Campaña 1999/2000. <http://www.elsitioagricola.com/maiz/articulos/Maiz%20-%20Area%20Sembrada%20Produccion%20Rinde%201999-2000.asp>
- SAGPyA. 2002. Maíz en Argentina. Area Sembrada, Cosechada, Producción y Rinde por Provincias. Campaña 2001/2002. <http://www.elsitioagricola.com/maiz/articulos/Maiz%20-%20Area%20Sembrada%20Produccion%20Rinde%202001-02.asp>
- Sinclair, T.R. y Muchow, R.C. 1995. Effect of nitrogen supply and maize yield: I. modeling physiological responses. Agron J. 87: 632-641.
- Uhart, S.A. 1990. Relación entre fuente de asimilatos y destinos reproductivos en maíces de diferente ciclo. Tesis *Magíster Scientiae*. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce, Buenos Aires, Argentina. 227 Págs.
- Uhart, S.A. y Andrade, F.H. 1995. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. Crop Science 35: 1376 - 1383
- Vargas Gil, J. 1990. Santiago del Estero. En: Moscatelli, G. (Ed). Atlas de Suelos de la República Argentina. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Proyecto PNUD ARG. 85/019. Instituto Nacional de Tecnología de investigación de Recursos Naturales. Tomo II. Pg 501 - 558.
- Volante, J.N., Bianchi A.R, Paoli H.P. y Fernandez, D.R. 2003. Monitoreo de cultivos extensivos del noroeste argentino a partir de sensores remotos. Campaña 2002 – 2003. (soja, poroto, maíz, sorgo, maní). Proyecto de relevamiento de cultivos del NOA (Pro.Re.Noa). SAGPyA. INTA. Centro regional NOA. EEA Salta. pp 26. <http://www.relevamientocultivo.org.ar/Resultados/verano0203/verano0203.htm>
- Westgate, M.E., Orf, J., Schussler, J.R., and Shumway. 1995. Temperature regulation of seed composition in soybean. Inform 6:498
- Yoshida, T., Padre, B.C. 1977. Transformation of soil and fertilizer nitrogen in paddy soil their availability to rice plants. Plant and soil 47 : 113-123.

APÉNDICE

Determinación de las dosis de fertilizante a aplicar

Se definieron dos objetivos de rendimiento: uno bueno de 6000 kg/ha en condiciones ambientales favorables y otro más conservador de 3000 kg/ha basado en experiencias previas en el establecimiento y rendimientos medios zonales, siendo éstos muy variables.

Se consideró un requerimiento de nitrógeno total absorbido por el cultivo a madurez igual a 22.8 kg de N / tonelada de grano cosechado.

Requerimiento $_{30\text{ qq}}$ = 68.4 kg Nabs. / ha

Requerimiento $_{60\text{ Ho}}$ = 136.8 kg Nabs. / ha

Las eficiencias de absorción del cultivo utilizadas fueron: 0.7 (valor normalmente utilizado cuando existe buena disponibilidad hídrica), y 0.5 en condiciones más restrictivas.

La oferta de N del suelo está conformada por:

- N inicial: 19.3 kg N / ha. (N presente en el suelo al momento de la siembra en forma de nitratos, obtenido de análisis de suelo, Tabla 1).
- N mineralización: Se estimó suponiendo las siguientes situaciones. Tasa de mineralización de 2 % para condiciones más favorables de humedad y temperatura, una tasa media de 1%, y una tasa de 0.5% para situaciones menos favorables.
- Nitrógeno total a la siembra (0–40 cm profundidad) es de 5520 kg/ha N_{org} . (obtenido de análisis de suelo, Tabla 1). La estimación del aporte de nitrógeno por mineralización durante el ciclo del cultivo es:

N org (kg/ha)	Coef. de min.	Aporte Neto (kg N/ha)
5520	0.005	27.6
5520	0.01	55.2
5520	0.02	110.4

- N fertilizante: Es el nitrógeno aplicado en forma de fertilizante para cada tratamiento propuesto.
 - To: testigo (sin aplicación de N)
 - T1: aplicación de 62,5 kg/ha urea granulada = 29,1 kg/ha N
 - T2: aplicación de 130,4 kg/ha urea granulada = 60,8 kg/ha N
 - T3: aplicación de 195,7 kg/ha urea granulada = 91,2 kg/ha N

Con los rendimientos objetivo y su combinación con las eficiencias de absorción se pueden definir cuatro posibles ofertas de nitrógeno del suelo necesarias para satisfacer los requerimientos del cultivo (Tabla).

Tabla: Situaciones resultantes (A, B, C, D) de la combinación de dos rendimientos objetivo (R) y dos eficiencias de absorción (e). Oferta de N en el suelo para satisfacer los requerimientos del cultivo (oferta), N inicial en el suelo (Ni), N aplicado como fertilizante en cada tratamiento (Nf) y N que debería aportar el suelo en forma neta para alcanzar a satisfacer la demanda del cultivo en cada tratamiento (aporte neto) en cada una de las situaciones.

Situación		A	B	C	D
R (qq/ha)		30.0	30.0	60.0	60.0
e		0.7	0.5	0.7	0.5
Oferta (kg N/ha)		97.7	136.8	195.4	273.6
Ni (kg N/ha)		19.3	19.3	19.3	19.3
Trat. 0	Nf (kg N/ha)	0.0	0.0	0.0	0.0
Trat. 1		29.1	29.1	29.1	29.1
Trat. 2		60.8	60.8	60.8	60.8
Trat. 3		91.2	91.2	91.2	91.2
Trat. 0	Aporte Neto (kg N/ha)	78.4	117.5	176.1	254.3
Trat. 1		49.3	88.4	147.0	225.2
Trat. 2		17.6	56.7	115.4	193.5
Trat. 3		-12.8	26.3	85.0	163.1

Resultado del balance de nitrógeno

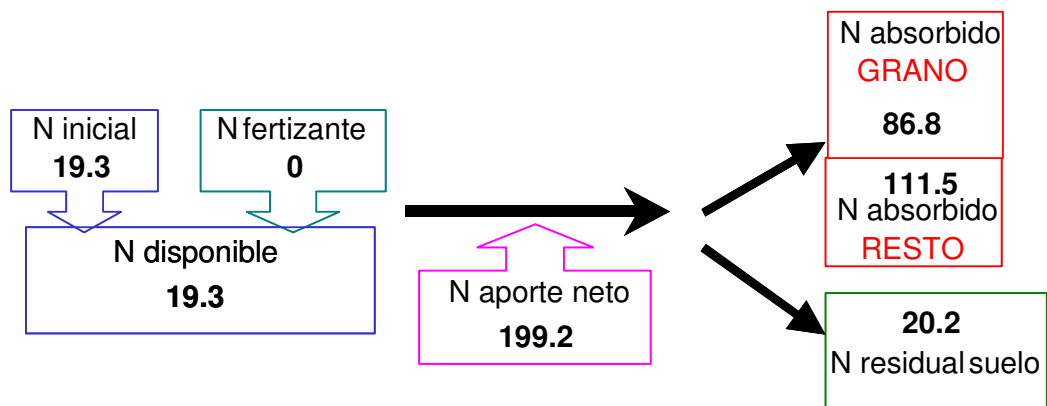
El balance de N para cada uno de los tratamientos, donde:

- nitrógeno inicial: N-NO₃⁻ a la siembra del lote
- nitrógeno fertilizante: N-urea aplicado en las diferentes dosis
- nitrógeno residual en el suelo: N-NO₃⁻ en el suelo a madurez para cada tratamiento
- nitrógeno absorbido en grano y en resto: calculado a partir de la biomasa de grano (rendimiento) y de resto a madurez y el % de nitrógeno de dichas fracciones para cada tratamiento.

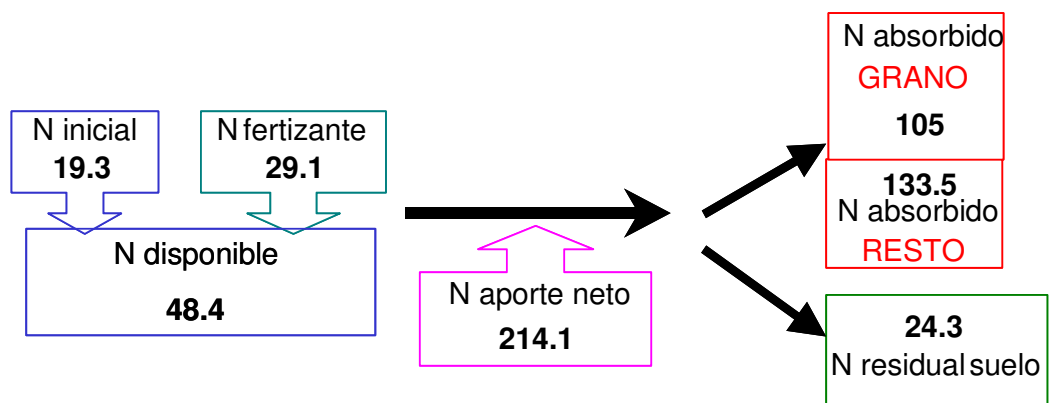
- nitrógeno de aporte neto: representa el balance de los procesos de pérdida de N mineral (volatilización, lixiviación, inmovilización) y de ganancia de N mineral (mineralización) durante el ciclo del cultivo (Huggins y Pan, 1993).

resultó el siguiente:

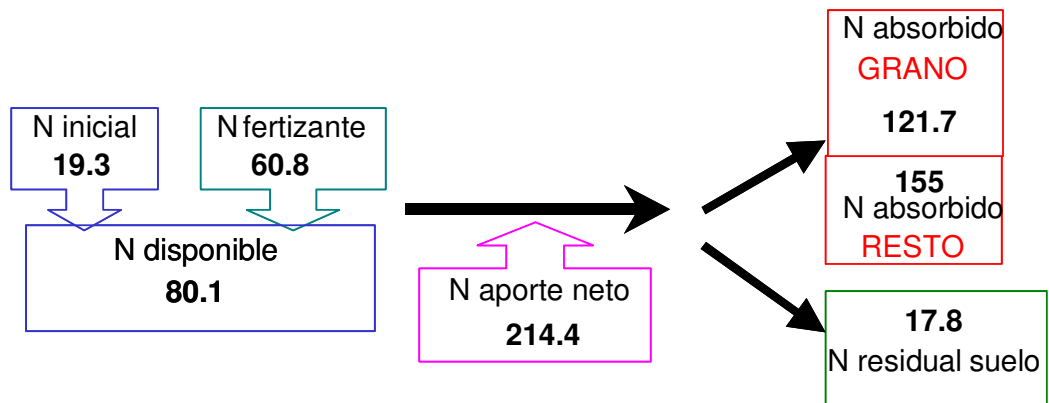
➤ Testigo



➤ Tratamiento 1



➤ Tratamiento 2



➤ Tratamiento 3

