

UPTAKE AND NITROGEN EFFICIENCY IN FORAGE MAIZE: EFFECTS OF NITROGEN AND PLANT DENSITY

ABSORCIÓN Y EFICIENCIA DEL NITRÓGENO EN MAÍZ FORRAJERO: EFECTOS DEL NITRÓGENO Y LA DENSIDAD DE POBLACIÓN

S. Fallah*, A. Tadayyon

Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, Shahrekord University,
P. O. Box 115, Shahrekord, Iran. (falalah1357@yahoo.com).

ABSTRACT

Efficient nitrogen (N) fertilizer management is critical for the economic production of maize (*Zea mays* L.) and the long-term protection of environmental quality. To study the effects of N doses and plant density on the N uptake and efficiency on forage maize cv. SC 704, an experiment was conducted in the Shahrekord region (32° 21' N, 50° 49' E; altitude 2050 m), Iran, at the Agricultural Research Station of Shahrekord University, during the 2007 growing season. The experiment was arranged with four plant densities (92 600, 104 200, 119 000 and 138 900 plants ha⁻¹) and four nitrogen doses (200, 240, 280 and 320 kg ha⁻¹) in a randomized complete block design with four replications. Increases of the plant density led to a significant N uptake in stalk, grain and whole plant. Also, N use efficiency, N uptake efficiency and N harvest index were significantly higher with increasing plant population. However, plant population showed no significant effect on leaf N uptake and N consumption efficiency. Increasing the N doses resulted in a significant higher leaf, stalk, grain and whole plant N uptake. However, N use, uptake and utilization efficiency were significantly decreased. The N harvest index showed different response to the N doses and there was no significant effect. It may be concluded that the optimum plant density for silage maize production can be beyond 138 900 plants ha⁻¹ and utilization of a N dose higher than 240 kg ha⁻¹ should be avoided, in order to minimize N losses.

Key words: *Zea mays* L., density, efficiency, fertilization, uptake.

RESUMEN

Un manejo eficiente de los fertilizantes nitrogenados es crítico para la producción económica del maíz (*Zea mays* L.) y la protección a largo plazo de la calidad ambiental. Para estudiar los efectos de las dosis de nitrógeno (N) y la densidad de población en la absorción y la eficiencia del N en el maíz forrajero cv. SC 704, se realizó un experimento en la región Shahrekord (32° 21' N, 50° 49' E; altitud de 1050 m), Irán, en la Estación de Investigación Agrícola de la Universidad de Shahrekord, durante la temporada de cultivo de 2007. El experimento tuvo cuatro densidades de población (92 600, 104 200, 119 000 y 138 900 plantas ha⁻¹) y cuatro dosis de nitrógeno (200, 240, 280 y 320 kg ha⁻¹), en un diseño en bloques completos al azar con cuatro réplicas. Un aumento de la densidad de población produjo un aumento significativo en la absorción de N medida en el tallo, el grano y la planta completa. Además, la eficiencia de uso del N, la eficiencia de absorción y el índice de captación de N también aumentaron significativamente con mayores densidades. Sin embargo, las hojas no mostraron un efecto significativo en la absorción de N ni eficiencia de consumo del N. Un aumento de la dosis de N causó un aumento significativo en absorción de N en tallo, grano y planta completa. Sin embargo, la eficiencia de uso, absorción y utilización de N disminuyó significativamente. El índice de captación de N mostró una respuesta distinta a la dosis de N y sin un efecto significativo. Se puede concluir que la densidad de población óptima para la producción de maíz para ensilaje puede ser más de 138 900 plantas ha⁻¹ y que el uso de una dosis de N mayor a 240 kg ha⁻¹ debe evitarse, para minimizar su pérdida.

Palabras clave: *Zea mays* L., densidad, eficiencia, fertilización, absorción.

INTRODUCCIÓN

La mejora de la eficiencia de absorción y utilización de nutrientes en la producción de maíz forrajero es necesaria para lograr la actividad y

*Author for correspondence ❖ Autor responsable.

Received: December, 2009. Approved: January, 2010.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 44: 549-560. 2010.

INTRODUCTION

Enhancement of uptake and utilization efficiency of nutrients in forage maize production are required to achieve activity and uniformity in the process of absorption, translocation, assimilation and distribution of nutrients in plants (Zebarth and Sheard, 1992). In high plant density, ear and grain sterility increases due to intraspecific competition for assimilates starting with the flowering stage (Tollenaar, 1977). Andrade *et al.* (1999) point out that plant density has a significant effect on dry matter distribution within vegetative and reproductive plant sink and on seed formation response to available source of a single plant. Therefore, a greater than optimum plant density reduces seed number per ear, mean seed weight and ear lengths (Bavec and Bavec, 2002).

Cox and Cherney (2002) show that the density of 116 000 compared to 80 000 maize plants ha^{-1} resulted in 3 g kg^{-1} lower crude protein, whereas Al-Kaisi and Yin (2003) point out that N uptake was more effective for dry weight than nitrogen concentration per plant. In that experiment, nitrogen uptakes under two low plant densities were significantly lower than in two higher plant densities. Nitrogen fertilizer is a favorite means for enhancement of maize yield (Wienhold *et al.*, 1995; Gehl *et al.*, 2005), but inappropriate management causes environmental pollution (Al-Kaisi *et al.*, 1999). When the nitrogen in soil is low (100 kg N ha^{-1}), utilization of fertilizer increases plant yield (Wienhold *et al.*, 1995). The application of nitrogen above the appropriate levels may cause nitrate accumulation in lower parts of the root expansion and consequently there is a risk for soil nitrogen leaching (Ferguson *et al.*, 1991; Schepers *et al.*, 1991; Sogbedji *et al.*, 2000).

Subedi *et al.* (2006) point out that forage maize increase exponentially with increasing nitrogen application rate and maximum yield (10.3 Mg ha^{-1}) is obtained at a rate of 225 kg N ha^{-1} . Besides, maize silage yield increase from 150 to 225 kg N ha^{-1} linearly and after that there is a quadratic-plateau response. A study carried out by Ulger *et al.* (1997) for two years show that with increasing levels of nitrogen fertilizer (from 200 to 250, 300 and 350 kg N ha^{-1}), crude protein content (10.4 %) increased

uniformidad en el proceso de absorción, translocación, asimilación y distribución de nutrientes en las plantas (Zebarth y Sheard, 1992). En altas densidades de población, aumenta la esterilidad de la espiga y los granos debido a la competencia intraespecífica por los asimilables que se inicia con la etapa de floración (Tollenaar, 1977). Andrade *et al.* (1999) indican que la densidad de población tiene un efecto significativo en la distribución de la materia seca en las áreas vegetativas y reproductivas de la planta y en la respuesta de formación de semillas a la fuente disponible para una sola planta. Por tanto, una densidad mayor a la óptima reduce el número de semillas por espiga, el peso promedio de las semillas y el largo de las espigas (Bavec y Bavec, 2002).

Cox y Cherney (2002) muestran que una densidad de 116 000 comparada con 80 000 plantas de maíz ha^{-1} produjo 3 g kg^{-1} menos de proteína cruda, mientras que Al-Kaisi y Yin (2003) indican que la absorción de N fue más efectiva para el peso seco que la concentración de N por planta. En ese experimento, la absorción de nitrógeno en dos densidades bajas de población fueron significativamente menores que en dos densidades mayores. El fertilizante nitrogenado es un medio favorito para mejorar el rendimiento del maíz (Wienhold *et al.*, 1995; Gehl *et al.*, 2005), pero el manejo inadecuado genera contaminación ambiental (Al-Kaisi *et al.*, 1999). Cuando el N en el suelo es bajo (100 kg N ha^{-1}), el uso del fertilizante aumenta el rendimiento de la planta (Wienhold *et al.*, 1995). Una aplicación de nitrógeno mayor a un nivel apropiado puede causar la acumulación de nitratos en partes bajas de la expansión de la raíz y en consecuencia existe el riesgo de lixiviación del nitrógeno en el suelo (Ferguson *et al.*, 1991; Schepers *et al.*, 1991; Sogbedji *et al.*, 2000).

Subedi *et al.* (2006) señalan que el maíz forrajero aumenta exponencialmente con una mayor tasa de aplicación de N y que el rendimiento máximo (10.3 Mg ha^{-1}) se produce con una tasa de 225 kg N ha^{-1} . Además, el rendimiento del maíz para ensilaje aumenta de 150 a 225 kg N ha^{-1} linealmente y después hay una respuesta cuadrática estacionaria. Un estudio realizado por Ulger *et al.* (1997) por dos años muestra que con mayores niveles de fertilizante nitrogenado (de 200 a 250, 300 y 350 kg N ha^{-1}), el contenido de proteína cruda (10.4 %) aumenta en el primer año, pero en el segundo año no hubo

in the first year; however, no effect was obtained in the second year. Ma *et al.* (1999) point out that with increased N application (from 100 to 200 kg N ha⁻¹) the forage maize (9.01 Mg ha⁻¹) increased linearly.

In normal conditions there is a direct relation between nitrogen application and grain yield (Al-Kaisi and Yin, 2003). Cox and Cherney (2001) point out that the interaction of row space × plant density × dry matter and quality of forage maize is not significant. However, they recommend a N dose of 140 to 250 kg ha⁻¹ for an appropriate yield production (11.44 Mg ha⁻¹) (Al-Kaisi and Yin, 2003).

The increase of dry matter production, optimal use of nitrogen fertilizer and prohibition of nitrogen leaching in environment are very important in forage production systems. So, in this research nitrogen uptake and efficiency under different levels of N and maize density were investigated.

MATERIALS AND METHODS

A field experiment was conducted in the research field station of Shahrekord University Agricultural College, Iran, located at 32° and 21' N and 50° and 49' E and an altitude of 2050 m. The soil is calcareous developed in limestone with a clay loam texture and low in organic C content and total N content. A representative soil sample was air dried, and sifted through a 2-mm sieve for laboratory analysis. The soil EC-value was measured using saturated paste methods (Janzen, 1993). Soil pH was determined in a 1:2 (w/v) soil/water suspension using a pH meter with a glass electrode. The total N concentration was measured by the Kjeldahl method (Bremner, 1996), and available P and K were extracted by the Mehlich-1 method; P was determined colorimetrically and K by atomic absorption spectroscopy (Donohue *et al.*, 1983). Total organic carbon in soil was determined only in samples from the 0 to 30 cm depth by wet digestion method (Snyder and Trofymow, 1984). All concentrations were expressed on an oven-dried weight basis. Main variables of the 0-30-cm surface layer are shown in Table 1.

The study consisted of four nitrogen doses (200, 240, 280 and 320 kg N ha⁻¹) as urea and four plant densities (92 600, 104 200, 119 000 and 138 900 plants ha⁻¹), as a factorial experiment in a randomized complete block design with four replications. Each plot consisted of six rows of maize spaced 0.60 m with 6 m length. Phosphorus and K fertilizers were applied preplanting according to recommendations derived from the soil test.

efecto. Ma *et al.* (1999) indica que al aumentar la aplicación de N (de 100 a 200 kg N ha⁻¹), el maíz forrajero (9.01 Mg ha⁻¹) aumentó linealmente.

En condiciones normales hay una relación directa entre la aplicación de nitrógeno y el rendimiento del grano (Al-Kaisi y Yin, 2003). Cox y Cherney (2001) indican que la interacción entre espacio de la fila × densidad poblacional × materia seca y la calidad del maíz forrajero no es significativa. Sin embargo, ellos recomiendan una tasa de 140 a 250 kg N ha⁻¹ para un rendimiento productivo apropiado (11.44 Mg ha⁻¹) (Al-Kaisi y Yin, 2003).

El aumento en la producción de materia seca, el uso óptimo del fertilizante nitrogenado y la prohibición de la lixiviación del N al ambiente, son muy importantes en los sistemas de producción de forrajes. Por ende, para este estudio, se investigaron la absorción y la eficiencia del nitrógeno con diferentes niveles de N y densidades del maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un experimento de campo en la estación de investigación del Colegio Agrícola de la Universidad Shahrekord, Irán, ubicada a 32° y 21' N y 50° y 49' E, a una altitud de 2050 m. El suelo es calcáreo desarrollado en piedra caliza con textura franco arcillosa y bajo contenido de C orgánico y contenido total de N. Se secó al aire una muestra representativa de suelo y se cernió a través de una malla de 2 mm para su análisis en laboratorio. El valor EC del suelo se midió usando métodos de pasta de saturación (Janzen, 1993). El pH del suelo se determinó en una suspensión 1:2 (w/v) de suelo/agua usando un medidor de pH con electrodo de vidrio. La concentración total de N se midió con el método de Kjeldahl (Bremner, 1996), y P y K disponibles se extrajeron con el método Mehlich-1; el P se determinó por colorimetría y K por espectroscopia de absorción atómica (Donohue *et al.*, 1983). El

Table 1. Main variables of soil used for the experiment.
Cuadro 1. Variables principales del suelo usado para el experimento.

pH	8.02
ECe	0.12 dS m ⁻¹
Organic carbon	8.1 mg g ⁻¹
Total N	0.7 mg g ⁻¹
P (Olsen's)	10.0 mg kg ⁻¹
K	346 mg kg ⁻¹
Sand	230 mg g ⁻¹
Silt	390 mg g ⁻¹
Clay	380 mg g ⁻¹

Under favorable climate condition, soil was plowed once by moldboard plow and twice by disk harrow in two vertical directions. Before utilization of disk harrow, the soil was sprayed with 2 L of EPTC herbicide for weed control. After complementary land preparation, one third of nitrogen fertilizer as urea, 100 kg ha⁻¹ P as super-phosphate triple and 100 kg ha⁻¹ K as potassium sulphate (based on soil test) were added to soil and thereafter furrows were prepared. Corn seeds were planted at 5 cm depth on top furrows in form of multi-seeds per plant point on May 1, 2007; average day and night temperature was 12 °C. In each point of planting 3 seeds were placed and, in order to gain appropriate densities in 3-4 leaf stage, extra seedlings were hand thinned while soil was in field capacity condition. The corn seeds for planting were cultivar of hybrid 704 single cross. Irrigation was applied 5 to 7 d per week based on environmental conditions and hand weeding was performed.

At the 50 % kernel milk-line stage, 20 plants from row 5 were harvested and dry weights of the forage biomass were measured after drying the samples at 80 °C until a constant weight. The nonfermented silage yield was expressed as DM silage yield (kg ha⁻¹) based on the number of plants at harvest in each treatment.

After chopping (4-5 cm pieces) the leaves, stalk and ear of plants, sub samples were taken and oven-dried at 80 °C until a constant weight to determine the DM. To determine N content of leaf, stalk and grain at the 50 % kernel milk-line stage (whole plant moisture ≈65 %), 10 plants from row 3 were harvested and total N concentrations in the plant (whole plant, leaf, stalk and grain) samples were determined by Kjeldahl (Bremner and Breitenbeck, 1983) after drying the samples at 80 °C until a constant weight. Nitrogen uptake was calculated by multiplying dry weight by nitrogen concentration in leaves, stalk and grain.

The following variables were calculated for each treatment: N use efficiency (NUE; kg kg⁻¹) as the ratio of dry matter to N supply, where N supply is the sum of soil NO₃⁻-N at planting, mineralized N, and N fertilizer; N uptake efficiency (NUpE; kg kg⁻¹) as the ratio of total plant N uptake to N supply; N utilization efficiency (NUtE; kg kg⁻¹) as the ratio of dry matter to total plant N uptake; and N harvest index (NHI; kg kg⁻¹) as the ratio of N in grain to total plant N uptake. Nitrogen efficiency terminology follows Pederson *et al.* (2002).

Analysis of variance were performed using SAS (SAS Institute Inc., 2001). Plant density and nitrogen doses means were analyzed using F-protected Least Significant Difference (LSD; p≤0.05).

RESULTS AND DISCUSSION

The plant density by nitrogen rate interaction was not significantly different for all variables except stalk nitrogen uptake.

carbono orgánico total se determinó sólo en muestras de 0 a 30 cm de profundidad, por el método de digestión húmeda (Snyder y Trofymow, 1984). Todas las concentraciones se expresaron con base en el peso después de secado en horno. Las variables principales de la capa de 0 a 30 cm se muestran en el Cuadro 1.

El estudio consistió de cuatro dosis de nitrógeno (200, 240, 280 y 320 kg N ha⁻¹) como urea y cuatro densidades de población (92 600, 104 200, 119 00 y 138 900 plantas ha⁻¹), como un experimento factorial con un diseño en bloques completos al azar con cuatro réplicas. Cada parcela consistió de seis filas de maíz con espacio de 0.60 m entre ellas y largo de 6 m. El fertilizante con P y K se aplicó antes de la siembra, según las recomendaciones derivadas de la prueba del suelo.

En condiciones de clima favorables, el suelo se aró una vez con un arado tipo moldboard y dos veces con una grada de discos en dos direcciones verticales. Antes de usar la grada de discos, se asperjó el suelo con 2 L de herbicida EPTC para control de malezas. Después de una preparación complementaria se añadió al suelo un tercio de fertilizante de nitrógeno como urea, 100 kg ha⁻¹ de P como superfosfato triple y 100 kg ha⁻¹ de K como sulfato de potasio (con base en la prueba del suelo); después se prepararon los surcos. Se plantaron las semillas de maíz a una profundidad de 5 cm en los surcos superiores, en forma de múltiples semillas por punto de plantado, el 1 de mayo de 2007; la temperatura promedio día y noche fue 12 °C. En cada punto de plantado se colocaron 3 semillas y para lograr densidades apropiadas en la etapa de 3-4 hojas, se extrajeron las plántulas excedentes a mano mientras el suelo estaba en condiciones de capacidad de campo. Las semillas de maíz para plantar fueron de la variedad híbrida 704 de cruce sencilla. Se aplicó irrigación 5 a 7 d por semana, con base en condiciones ambientales y se eliminó las hierbas a mano.

Al 50 % de la fase de línea de leche del grano, se cosecharon 20 plantas de la fila 5 y se midió el peso en seco de la biomasa del forraje, después de secar las muestras a 80 °C hasta peso constante. El rendimiento de ensilaje no fermentado se expresó como rendimiento de ensilaje MS (kg ha⁻¹), con base en el número de plantas al cosechar cada tratamiento.

Después de cortar (4-5 cm) las hojas, el tallo y las espigas de las plantas, se tomaron submuestras y se secaron en horno a 80 °C hasta peso constante para determinar la MS. Para determinar el contenido de N en hoja, tallo y grano al 50 % de la etapa de línea de leche del grano (humedad de la planta entera ≈65 %), se cosecharon 10 plantas de la fila 3 y se determinaron las concentraciones totales de N en las muestras de la planta (planta completa, hoja, tallo y grano) con Kjeldahl (Bremner y Breitenbeck, 1983) después de secar las muestras a 80 °C hasta peso constante. La absorción de N se calculó multiplicando el peso seco por la concentración de N en hojas, tallo y grano.

Forage biomass

Total DM was significantly increased ($p \leq 0.01$) with increasing plant density. Maximum total DM was obtained at the 138 900 plants ha^{-1} (Table 2), whereas Andrade *et al.* (2002) report a higher plant density and Al-Kaisi and Yin (2003) point out a lower value.

Total biomass was significantly increased as the N dose increased up to 320 $kg\ ha^{-1}$. However, there were no significant differences in forage dry matter between 240, 280 and 320 $kg\ N\ ha^{-1}$ (Table 2). Results reported by Al-Kaisi and Yin (2003) and Subedi *et al.* (2006) support our findings for reducing N fertilizer doses.

Leaf nitrogen uptake

There was no significant difference in leaf N uptake among plant density treatments, but there was a significant response to nitrogen fertilizer (Table 2). The nitrogen uptake by leaves increased as nitrogen consumption increased, but no significant differences were observed between 280 and 320 $kg\ N\ ha^{-1}$.

As approximately 50 % of leaf nitrogen affect photosynthetic plant system, the development of

Se calcularon las siguientes variables para cada tratamiento: eficiencia de uso del N (EUN; $kg\ kg^{-1}$) como la proporción de MS respecto a la oferta de N, donde la oferta de N es la suma de $NO_3^- - N$ al plantar, N mineralizado y fertilizante de N; eficiencia de absorción del N (EAN; $kg\ kg^{-1}$) como la proporción de la absorción total de N de la planta respecto a la oferta de N; eficiencia de utilización del N (EUtN; $kg\ kg^{-1}$) como la proporción de MS respecto a la absorción total de N por la planta; y el índice de captación de N (ICN; $kg\ kg^{-1}$) como la proporción de N en el grano respecto a la absorción total de N por la planta. La terminología de eficiencia de N es según Pederson *et al.* (2002).

Los análisis de varianza se realizaron con SAS (SAS Institute Inc., 2001). Las medias de densidad de población dosis de N se analizaron con la Diferencia Mínima Significativa protegida por F (LSD; $p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La interacción densidad de población por dosis de N fue significativamente diferente sólo para la absorción de nitrógeno del tallo.

Biomasa del forraje

La MS total aumentó significativamente ($p \leq 0.01$) con mayor densidad de población. La máxima MS

Table 2. Summary of the analysis of variance and means comparison of forage biomass and nitrogen uptake in silage maize at different treatments of plant density and nitrogen doses.

Cuadro 2. Resumen del análisis de varianza y la comparación de medias de la biomasa de forraje y la absorción de nitrógeno en maíz para ensilaje, con distintos tratamientos de densidad de población y dosis de nitrógeno.

Treatment	Forage biomass $kg\ ha^{-1}$	Leaf N uptake $kg\ ha^{-1}$	Stalk N uptake $kg\ ha^{-1}$	Grain N uptake $kg\ ha^{-1}$	Whole plant N uptake $kg\ ha^{-1}$
Plant density (plants ha^{-1})					
92 600	18351	54.3	70.8	65.2	186.6
104 200	19013	55.8	51.0	74.4	181.0
119 000	21562	57.8	65.2	82.1	205.6
138 900	24230	61.0	85.3	110.3	248.7
LSD	1591	6.7	9.9	11.1	18.2
N doses ($kg\ ha^{-1}$)					
200	19253	44.1	54.9	65.0	165.3
240	20662	54.5	60.8	87.0	200.3
280	21180	64.0	73.0	87.1	220.1
320	22063	66.4	84.0	92.7	236.2
LSD	1591	6.7	9.9	11.1	18.2
Plant density	**	ns	**	**	**
N rate	**	**	**	**	**
Plant density × N rate	ns	ns	**	ns	ns

* $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$; ns, non significant ❖ * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$; ns, no significativo.

a photosynthetic system parallel to leaf expansion by promotion of N consumption may increase proportion of N uptake by leaves. Ulger *et al.* (1997) report that the highest N content of leaves was 3.46 % with a 350 kg ha⁻¹ N fertilizer supply, whereas the lowest content, 2.58 %, was recorded with the 200 kg N ha⁻¹ dose.

Stalk nitrogen uptake

Plant density and nitrogen dose affected stalk N uptake, and a plant density × N dose interaction was found. Thus, for 104 200 plants ha⁻¹, the responses of stalk N uptake to different doses of N varied with other plant densities (Figure 1).

It looks like that for low density (104 200 plants ha⁻¹) it is not likely to be found an effect of low competition similar to a density of 92 600 plants ha⁻¹, and stalk biomass would be similar for densities of 119 000 and 138 900 plants ha⁻¹. Thus, there are significant interaction effects between plant density and nitrogen uptake.

Grain nitrogen uptake

The effect of plant density and N dose on grain nitrogen uptake was significantly different ($p \leq 0.01$) (Table 2). The increase of grain N accumulation due to an increase in plant density was gradual, where density of 119 000 plants ha⁻¹ between continuous doses of nitrogen consumption was significantly

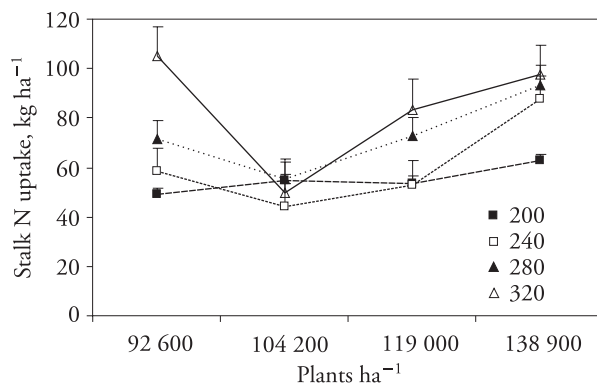


Figure 1. Effect of interaction between plant density and nitrogen dose on stalk nitrogen uptake in forage maize. Bars indicate SE.

Figura 1. Efecto de la interacción entre densidad poblacional y dosis de nitrógeno en la absorción de nitrógeno del tallo en maíz forrajero. Las barras indican EE.

total se obtuvo con la densidad de 138 900 plantas ha⁻¹ (Cuadro 2) mientras que Andrade *et al.* (2002) reportan una más alta densidad de población y Al-Kaisi y Yin (2003) señalan un valor menor.

La biomasa total aumentó significativamente al incrementar la dosis de N hasta 320 kg ha⁻¹. Sin embargo, no hubo diferencias significativas en la MS del forraje entre 240, 280 y 320 kg N ha⁻¹ (Cuadro 2). Resultados reportados por Al-Kaisi y Yin (2003) y Subedi *et al.* (2006) apoyan los del presente estudio acerca de la reducción de las dosis de fertilizante nitrogenado.

Absorción de nitrógeno de hojas

No hubo diferencia significativa en la absorción de N de hojas entre los tratamientos de densidad de población, pero sí hubo una respuesta significativa al fertilizante nitrogenado (Cuadro 2). La absorción de nitrógeno por hojas aumentó al aumentar el consumo de nitrógeno, pero no se observaron diferencias significativas entre 280 y 320 kg ha⁻¹.

Dado que aproximadamente 50 % del N de hojas afecta el sistema fotosintético de la planta, el desarrollo de un sistema fotosintético paralelo a la expansión de hojas al promover el consumo del N puede aumentar la proporción de absorción de N por las hojas. Ulger *et al.* (1997) reportan que el mayor contenido de N en hojas fue 3.46 % al proporcionar 350 kg N ha⁻¹, mientras que el menor contenido (2.58 %), se registró con 200 kg N ha⁻¹.

Absorción de nitrógeno del tallo

La densidad de población y la dosis de N afectaron la absorción de N del tallo, pero se encontró una interacción entre densidad de población × dosis de N. Así, para 104 200 plantas ha⁻¹, las respuestas de la absorción de N del tallo con distintas dosis de N variaron con otras densidades (Figura 1).

Al parecer para la densidad baja (104 200 plantas ha⁻¹) no es factible encontrar un efecto de competencia baja similar a una densidad de 92 600 plantas ha⁻¹, y la biomasa del tallo sería similar para densidades de 119 000 y 138 000 plantas ha⁻¹. Por ende, hay efectos de interacción significativos entre la densidad y la absorción de N.

different. But no significant differences were observed densities between 138 900 and 119 000 plants ha^{-1} . Maximum production of biomass was found only for greater density and no differences were observed for grain N concentration, except for the lowest density. The increase in nitrogen uptake by grain was for a density of 138 900 plants ha^{-1} . Our results confirm a similar finding reported by Al-Kaisi and Yin (2003).

As nitrogen dose increased from 200 to 320 kg ha^{-1} there was an increment in grain N uptake (Table 2), which shows that the highest N rate promoted a larger whole plant nitrogen uptake and, consequently, a better vegetative growth. Subedi *et al.* (2006) indicate that grain yield was exponentially increased with N rate and maximum yield is obtained with 225 kg N ha^{-1} . And with increased nitrogen consumption, the response of grain nitrogen is due to yield promotion (Ulger *et al.*, 1997).

Whole plant nitrogen uptake

Nitrogen uptake per hectare was affected by plant density and nitrogen dose (Table 2). Minimum rate of plant nitrogen uptake was observed for 104 200 plants ha^{-1} and 92 600 plants ha^{-1} , whereas with a density of 139 800 plants ha^{-1} more biomass was produced due to the availability of nitrogen (Uhart and Andrade, 1995). As a result, a maximum rate of nitrogen was absorbed (Al-Kaisi and Yin, 2003). It seems that lower competition for a density of 92 600 plants ha^{-1} causes an increase in N concentration in plant organs, especially in stalk, and in spite of receiving favorable light condition and probably high assimilation speed, stalk nitrogen was not reduced. However, at the density of 104 200 plants ha^{-1} there was apparently more competition and an increase in remobilization of stalk nitrogen reduced nitrogen uptake per hectare (Anderson *et al.*, 1984).

Uptake of nitrogen was directly related to N dose (kg ha^{-1}), but no significant difference was observed between 280 and 320 kg ha^{-1} (Table 2). Usually, nitrogen availability increases nitrogen uptake, followed by an increase in nitrogen concentration in plant organs (Ma *et al.*, 1999). Regarding the role of N in photosynthetic system, the rate of dry matter production also increased. In our experiment, nitrogen concentration and dry matter production in the 320 kg N ha^{-1} treatment was higher, which may have promoted nitrogen uptake per hectare.

Absorción de nitrógeno del grano

El efecto de la densidad de población y la dosis de N en la absorción de nitrógeno del grano fue significativamente diferente ($p \leq 0.01$) (Cuadro 2). El aumento en la acumulación de N en granos debido a un incremento en la densidad de población fue gradual, mientras que una densidad de 119 000 plantas ha^{-1} entre dosis continuas de consumo de N fue significativamente diferente. Pero, no hubo diferencias significativas entre densidades de 138 900 y 119 000 plantas ha^{-1} . La producción máxima de biomasa se encontró sólo para densidades mayores y no hubo diferencias para la concentración de N en granos, excepto para la densidad más baja. El incremento en absorción de N del grano fue para una densidad de 138 900 plantas ha^{-1} . Estos resultados confirman un hallazgo similar reportado por Al-Kaisi y Yin (2003).

Al aumentar la dosis de nitrógeno de 200 a 320 kg ha^{-1} , aumentó la absorción de N del grano (Cuadro 2), lo cual muestra que la dosis más alta de N promovió una mayor absorción en la planta completa y, en consecuencia, un mejor crecimiento vegetativo. Subedi *et al.* (2006) indican que el rendimiento de granos mejoró exponencialmente con la tasa de N y se obtiene el máximo rendimiento con 225 kg N ha^{-1} . Y con un mayor consumo de nitrógeno, la respuesta de N del grano se debe a la promoción del rendimiento (Ulger *et al.*, 1997).

Absorción de nitrógeno de la planta completa

La absorción de N por hectárea fue afectada por la densidad de población y la dosis de nitrógeno (Cuadro 2). La tasa mínima de absorción de N de la planta se observó para 104 200 plantas ha^{-1} y 92 600 plantas ha^{-1} , mientras que con una densidad de 139 800 plantas ha^{-1} , se produjo mayor biomasa debido a la disponibilidad de N (Uhart y Andrade, 1995). Como resultado, se absorbió una tasa máxima de nitrógeno (Al-Kaisi y Yin, 2003). Parece que la menor competencia en una densidad de 92 600 plantas ha^{-1} causa un aumento en la concentración de N en órganos vegetales, especialmente en tallo, y que a pesar de recibir una condición favorable de luz y probablemente una velocidad alta de asimilación, el N del tallo no se redujo. Sin embargo, a la densidad de 104 200 plantas ha^{-1} , aparentemente hubo mayor

Halvorson *et al.* (2002) point out that production of forage maize removed 213 kg N ha⁻¹ from soil, which was approximately 35 % more than grain N uptake, whereas Torbert *et al.* (2001) reported that approximately 144 kg N ha⁻¹ were absorbed for a production of 14 355 kg dry matter ha⁻¹.

Nitrogen use efficiency (NUE)

Nitrogen use efficiency was significantly affected by plant density and by N dose (Table 3). Maximum and minimum N use efficiency was due to densities of 138 900 and 92 600 plants ha⁻¹ (Figure 2). At a density of 138 900 plants ha⁻¹, a larger number of plants per unit area showed an increased nitrogen consumption and then increased biomass production. Thus, at this density, probably the nitrogen losses were minimum and we can conclude indirectly that a side effect of environment is minimum in such density. This finding agrees with the conclusion of Barbieri *et al.* (2008), who report that a high plant density increased NUE by 12 and 15 % expressed as DM or grain yield per unit of available nitrogen.

Nitrogen use efficiency showed a reciprocal relation with nitrogen utilization. The consumption of 200 kg N ha⁻¹ was most efficient but an increased consumption reduced this efficiency (Figure 3). It seems that a fraction of relatively high doses of nitrogen was not absorbed by the plants and probably were lost by plants as leaching. Therefore, efficiency rate of 240, 280 and 320 kg N ha⁻¹ treatments were reduced. Regarding maize N use efficiency, Guillard

competencia y un aumento en la removilización del N del tallo y menor absorción de N por hectárea (Anderson *et al.*, 1984).

La absorción de nitrógeno se relacionó directamente con la dosis de N (kg ha⁻¹), pero no hubo diferencia significativa entre 280 y 320 kg ha⁻¹ (Cuadro 2). Por lo general, la disponibilidad de N aumenta la absorción de nitrógeno, y luego aumenta la concentración de N en los órganos vegetales (Ma *et al.*, 1999). Con respecto a la función del N en el sistema fotosintético, la tasa de producción de MS también aumentó. En el presente experimento, la concentración de nitrógeno y la producción de MS en el tratamiento de 320 kg N ha⁻¹ fue mayor, lo que puede haber promovido la absorción de N por hectárea. Halvorson *et al.* (2002) indican que la producción de maíz forrajero removió 213 kg N ha⁻¹ del suelo, lo cual fue aproximadamente 35 % más que la absorción de N del grano, mientras que Torbert *et al.* (2001) reportan que aproximadamente 144 kg N ha⁻¹ se absorbieron para una producción de 14 355 kg de materia seca ha⁻¹.

Eficiencia de uso del nitrógeno (EUN)

La eficiencia de uso del nitrógeno fue afectada significativamente por la densidad de población y la dosis de N (Cuadro 3). Las eficiencias máxima y mínima de uso de N se debieron a densidades de 138 900 y 92 600 plantas ha⁻¹ (Figura 2). A una densidad de 138 900 plantas ha⁻¹, un mayor número de plantas por unidad de área mostraron mayor consumo de nitrógeno y mayor producción de biomasa. Por ende, a esta densidad, las pérdidas de N probablemente fueron mínimas y se puede concluir indirectamente que un efecto secundario del ambiente es mínimo en esta densidad. Este hallazgo coincide con la conclusión de Barbieri *et al.* (2008), quienes reportan que una alta densidad aumentó la EUN por 12 y 15 %, expresada como MS o rendimiento del grano por unidad de N disponible.

La eficiencia de uso del N mostró una relación recíproca con la utilización del nitrógeno. El consumo de 200 kg N ha⁻¹ fue más eficiente pero un mayor consumo redujo la eficiencia (Figura 3). Parece que una fracción de dosis relativamente altas de N no fue absorbido por las plantas y probablemente se perdió como lixiviación. Por tanto, la tasa de eficiencia de los tratamientos de 240 y 320 kg N ha⁻¹ se redujo.

Table 3. Analysis of variance of nitrogen efficiency in silage maize at different plant density and nitrogen dose.

Cuadro 3. Análisis de varianza de la eficiencia de nitrógeno en maíz para ensilaje con distintas densidades de población y dosis de nitrógeno.

Treatment	NUE	NUtE	NUpE	NHI
Plant density	**	ns	**	*
N rate	**	**	*	ns
Plant density×N rate	ns	ns	ns	ns

*p≤0.05; **p≤0.01; ns, non significant. NUE: N use efficiency; NUtE: N utilization efficiency; NUPE: N uptake efficiency; NHI: N harvest index ❖ *p≤0.05; **p≤0.01; ns, no significativo. NUE: eficiencia de uso del N; NUtE: eficiencia de utilización del N; NUPE: eficiencia de la utilización del N; NHI: índice de captación de N.

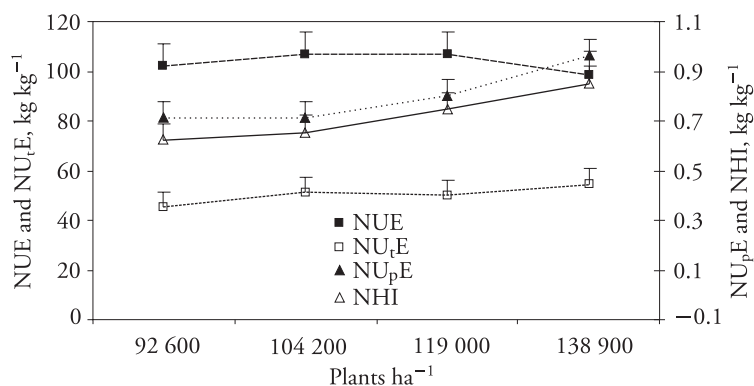


Figure 2. Means comparison of nitrogen use efficiency (NUE); nitrogen utilization efficiency (NUtE); nitrogen uptake efficiency (NUpE); nitrogen harvest index (NHI) in silage maize at different treatments of plant density. Bars indicate LSD ($p \leq 0.05$).

Figura 2. Comparación de medias de la eficiencia de uso del N (NUE); eficiencia de utilización del N (NUtE); eficiencia de absorción del N (NUpE); índice de captación de N (NHI) en maíz para ensilaje con distintos tratamientos de densidad de población. Las barras indican LSD ($p \leq 0.05$).

et al. (1995) and Halvorson *et al.* (2005) report similar results.

Nitrogen utilization efficiency (NUtE)

There was no significant effect of plant density on N utilization efficiency, but the effect of nitrogen consumption was significantly different for this variable (Table 3). An increase of nitrogen consumption caused significant a reduction in NUtE (Figure 3). This suggests that the treatment of 200 kg N ha⁻¹ caused the least nitrogen leaching in the environment and probably part of the nitrogen may be removed by leaching before absorption by roots, since the plants were not able to use extra elements through the root zone. Therefore, an excess of nitrogen may be followed by water pollution (Al-Kaisi *et al.*, 1999).

Nitrogen uptake efficiency (NUpE)

The NUpE was significantly affected by plant density and by N dose (Table 3). High plant density (138 900 plants ha⁻¹), caused maximum NUpE (Figure 2). High density show a maximum leaf area which leads to maximum use of environmental resources, increasing absorption, translocation, assimilation and distribution of elements in the plant (Zebarth and Sheard, 1992). Thus, there is a balanced

Respecto a la EUN en maíz, Guillard *et al.* (1995) y Halvorson *et al.* (2005) reportan resultados similares.

Eficiencia de utilización de nitrógeno (EUtN)

No hubo efecto significativo de la densidad de población en la eficiencia de utilización del N, pero el efecto del consumo de N fue significativamente diferente para esta variable (Cuadro 3). Un aumento en consumo de N causó una reducción significativa en EUtN (Figura 3). Esto sugiere que el tratamiento de 200 kg N ha⁻¹ causó la menor lixiviación de N en el ambiente y que probablemente parte del N pueda ser eliminado por lixiviación antes de su absorción por las raíces, dado que las plantas no pudieron utilizar elementos extra a través de la zona de raíz. Por tanto, un exceso de nitrógeno puede ser seguido de contaminación del agua (Al-Kaisi *et al.*, 1999).

Eficiencia de absorción del nitrógeno (EAN)

La EAN fue afectada significativamente por la densidad de población y la dosis de N (Cuadro 3). Una alta densidad de población (138 900 plantas ha⁻¹) causó la máxima EAN (Figura 2). La alta densidad muestra la máxima área de hojas que lleva al uso máximo de recursos ambientales, incrementando absorción, translocación, asimilación y distribución

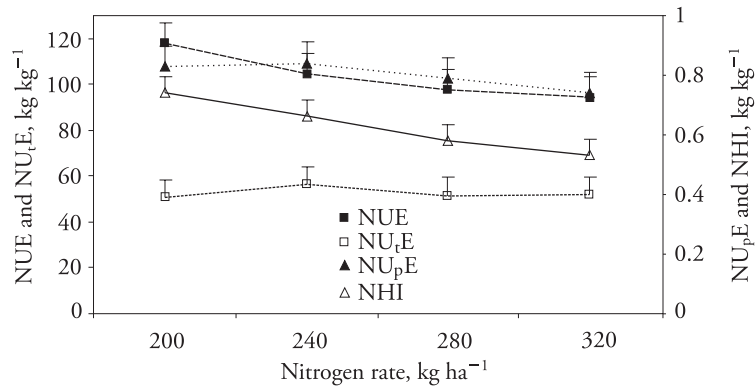


Figure 3. Means comparison of nitrogen efficiency in silage maize at different treatments of nitrogen dose. Bars indicate LSD ($p \leq 0.05$). NUE: nitrogen use efficiency; NUtE: nitrogen utilization efficiency; NUpE: nitrogen uptake efficiency; NHI: nitrogen harvest index.

Figura 3. Comparación de medias de eficiencia del N en maíz para ensilaje con diferentes tratamientos de dosis de nitrógeno. Las barras indican LSD ($p \leq 0.05$). NUE: eficiencia de uso del N; NUtE: eficiencia de utilización del N; NUpE: eficiencia de absorción del N; NHI: índice de captación de N.

distribution of dry matter between vegetative and reproductive plant components (Andrade *et al.*, 1999) and nitrogen consumption is efficient with no loss. However, at low plant density a portion of nitrogen is not absorbed by the roots, there is a delay in canopy formation and finally yield is reduced (Andrade *et al.*, 1999), causing reduction of nitrogen uptake efficiency.

Maximum nitrogen uptake efficiency corresponded to the treatment of 240 kg N ha⁻¹ (Table 3) and it was significantly different with 320 kg N ha⁻¹ (Figure 3). This result suggests that plants used effectively 240 kg N ha⁻¹ and that there was a balance between plant requirement and soil nitrogen availability; a higher N dose will increase its discharge. Doses of 225 kg N ha⁻¹ (Subedi *et al.*, 2006) and 140 to 250 kg N ha⁻¹ (Al-Kaisi and Yin, 2003) support the statement that an optimum uptake efficiency is achieved with 240 kg N ha⁻¹.

Nitrogen harvest index (NHI)

There was a direct relationship between NHI and plant density (Figure 2), and maximum NHI corresponded to a density of 138 900 plants ha⁻¹ (Table 3). Upper leaf area index observed in a density of 138 900 plants ha⁻¹ prepared a desirable photosynthetic potential and apparently

de elementos en la planta (Zebarth y Sheard, 1992). Por tanto, hay una distribución balanceada de MS entre los componentes vegetativos y reproductivos de la planta (Andrade *et al.*, 1999) y el consumo de N es eficiente y sin pérdidas. Sin embargo, a densidades de población bajas, una porción del N no es absorbido por las raíces, hay un retraso en la formación de dosel y finalmente se reduce el rendimiento (Andrade *et al.*, 1999), causando una reducción en la eficiencia de absorción del nitrógeno.

La eficiencia de absorción de nitrógeno máxima correspondió al tratamiento de 240 kg N ha⁻¹ (Cuadro 3), y fue significativamente diferente con 320 kg N ha⁻¹ (Figura 3). Este resultado sugiere que las plantas usaron efectivamente 240 kg N ha⁻¹ y que hubo un equilibrio entre los requerimientos de las plantas y la disponibilidad de N en el suelo; una mayor dosis de N aumentará su desecho. Dosis de 225 kg N ha⁻¹ (Subedi *et al.*, 2006) y 140 a 250 kg N ha⁻¹ (Al-Kaisi y Yin, 2003) apoyan la idea de que una eficiencia óptima de absorción se logra con 240 kg N ha⁻¹.

Índice de captación de nitrógeno (ICN)

Hubo una relación directa entre el ICN y la densidad de población (Figura 2), y el máximo ICN correspondió a una densidad de 138 900 plantas ha⁻¹ (Cuadro 3). Un índice del área superior de

more assimilates were rapidly allocated toward grain (Zebarth and Sheard, 1992). Therefore, the production of more grain in this treatment caused an increase of nitrogen harvest index.

CONCLUSIONS

The density of 138 900 plants ha⁻¹ elicited a significant absorption of nitrogen fertilizer. As a result, nitrogen was used in photosynthesis, the biomass production showed maximum consumption and uptake efficiency and, finally, the nitrogen harvest index was the highest.

An increase in nitrogen consumption caused an increase in nitrogen uptake by different plant organs. However, nitrogen efficiency for use, utilization and uptake was significantly reduced. Therefore, in order to prevent nitrogen loss to environment without reducing biomass production, in forage maize it is better to use 138 900 plants ha⁻¹ or higher, and avoid doses above 240 kg N ha⁻¹.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge financial support from Shahrekord University.

LITERATURE CITED

- Al-Kaisi, M. M., and X. Yin. 2003. Effects of N rate, irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency. *Agron. J.* 95: 1475-1482.
- Al-Kaisi, M. M., A. F. Berrada, and M. W. Stack. 1999. Dry bean yield response to different irrigation rates in southwestern Colorado. *J. Prod. Agric.* 12: 422-427.
- Anderson, E. L., E. J. Kamprath, and R. H. Moll. 1984. Nitrogen fertility effects on accumulation, remobilization, and partitioning of N and dry matter in corn genotypes differing in prolificacy. *Agron. J.* 76: 397-404.
- Andrade, F. H., P. Calvino, A. Cirilo, and P. Barbieri. 2002. Yield response to narrow rows depends on increased radiation interception. *Agron. J.* 94: 975-980.
- Andrade, F. H., C. Vega, S. Uhart, A. Cirilo, M. Cantarero, and O. Valentinuz. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39: 453-459.
- Barbieri, P. A., H. E. Echeverría, H. R. Saíz Rozas, and F. H. Andrade. 2008. Nitrogen use efficiency in maize as affected by nitrogen availability and row spacing. *Agron. J.* 100: 1094-1100.
- Bavec, F., and M. Bavec. 2002. Effect of plant population on leaf area index, cob characteristics and grain yield of early maturing maize cultivar (FAO-100-400). *Eur. J. Agron.* 16: 151-159.
- Bremner, J. M., and G. A. Breitenbeck. 1983. A simple method for determination of ammonium in semimicro-Kjeldahl

las hojas observado con una densidad de 138 900 plantas ha⁻¹ preparó un potencial fotosintético deseable y aparentemente se asignaron más asimilables rápidamente hacia el grano (Zebarth y Sheard, 1992). Por tanto, la producción de más grano en este tratamiento causó un incremento en el índice de captación de nitrógeno.

CONCLUSIONES

La densidad de 138 900 plantas ha⁻¹ produjo una absorción significativa del fertilizante nitrogenado. Como resultado, el nitrógeno fue utilizado en la fotosíntesis, la producción de biomasa mostró un consumo y eficiencia de absorción máximos y, finalmente, el índice de captación de nitrógeno fue el más alto.

Un incremento en el consumo de nitrógeno causó un aumento en la absorción de nitrógeno por los distintos órganos vegetales. Sin embargo, la eficiencia de nitrógeno para uso, utilización y absorción se redujo significativamente. Por tanto, para prevenir la pérdida de nitrógeno hacia el ambiente sin reducir la producción de biomasa, en maíz forrajero es mejor usar densidades de 138 900 plantas ha⁻¹ o mayores, y evitar el uso de dosis mayores a 240 kg N ha⁻¹.

—Fin de la versión en español—



- analysis of soils and plant materials using a block digester. *Commun. Soil Sci. Plan. Anal.* 14: 905-913.
- Bremner, J. M. 1996. Total nitrogen. *In*: Sparks, D. L., A. L. Page, P. A. Helmke, and R. H. Loeppert (eds). *Methods of Soil Soil Analysis. Part 3. SSSA Book Ser. 5. SSSA and ASA, Madison, WI.* pp: 1085-1122.
- Cox, W. J., and D. J. R. Cherney. 2001. Row spacing, plant density, and nitrogen effects on corn silage. *Agron. J.* 93: 597-602.
- Cox, W. J., and D. J. R. Cherney. 2002. Evaluation of narrow-row corn forage in field-scale studies. *Agron. J.* 94: 321-325.
- Donohue, S. J., R. H. Brupbacher, R. A. Isaac, J. D. Landcaster, A. Mehlich, and D. D. Scott. 1983. Reference soil test methods for the southern region of the United States. *Southern Coop. Ser. Bull.* 289. Univ. of Georgia, Athens.
- Ferguson, R. B., C. A. Shapiro, G. W. Hergert, W. L. Kranz, N. L. Klocke, and D. H. Krull. 1991. Nitrogen and irrigation management practices to minimize nitrate leaching from irrigated corn. *J. Prod. Agric.* 4: 186-192.
- Gehl, R. J., J. P. Schmidt, L. D. Maddux, and W. B. Gordon. 2005. Corn yield response to nitrogen rate and timing in sandy irrigated soils. *Agron. J.* 97: 1230-1238.

- Guillard, K., G. F. Griffin, D. W. Allinson, M. M. Rafey, W. R. Yamartino, and S. W. Pietrzyk. 1995. Nitrogen utilization of selected cropping systems in the U. S. Northeast: I. Dry matter yield, N uptake, apparent N recover, and N use efficiency. *Agron. J.* 87: 193-199.
- Halvorson, A. D., F. C. Schweissing, M. E. Bartolo, and C. A. Reule. 2005. Corn response to nitrogen fertilization in a soil with high residual nitrogen. *Agron. J.* 97: 1222-1229.
- Halvorson, A. D., R. F. Follett, M. E. Bartolo, and F. C. Schweissing. 2002. Nitrogen fertilizer use efficiency of furrow-irrigated onion and corn. *Agron. J.* 94: 442-449.
- Janzen, H. H. 1993. Soluble salts. *In*: Carter, M. R. (ed). *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Lewis, Boca Raton, FL. pp: 161-166.
- Ma, B. L., L. M. Dwyer, and E. G. Gregorich. 1999. Soil nitrogen amendment effects on seasonal nitrogen mineralization and nitrogen cycling in maize production. *Agron. J.* 91: 1003-1009.
- Pederson, G. A., G. E. Brink, and T. E. Fairbrother. 2002. Nutrient uptake in plant parts of sixteen forages fertilized with poultry litter: Nitrogen, phosphorus, potassium, copper, and zinc. *Agron. J.* 94: 895-904.
- SAS Institute Inc. 2001. *SAS User's Guide: Statistics*. Version 8.2. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- Schepers, J. S., M. G. Moravek, E. E. Alberts, and K. D. Frank. 1991. Maize production impacts on groundwater quality. *J. Environ. Qual.* 20: 12-16.
- Sogbedji, J. M., H. M. Van Es, C. L. Yang, L. D. Geohring, and F. R. Magdoff. 2000. Nitrate leaching and nitrogen budget as affected by maize nitrogen rate and soil type. *J. Environ. Qual.* 29: 1813-1820.
- Subedi, K. D., B. L. Ma, and D. L. Smith. 2006. Response of a leafy and non-leafy maize hybrid to population densities and fertilizer nitrogen levels. *Crop Sci.* 46: 1860-1869.
- Snyder, J. D., and J. A. Trofymow. 1984. Rapid accurate wet oxidation division procedure for determining organic and inorganic carbon in plant and soil samples. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 15: 1587-1597.
- Tollenaar, M. 1977. Sink source relationships during reproductive development in maize: A review. *Maydica*, Bergamo 22: 49-75.
- Torbert, H. A., K. N. Potter, and J. E. Morrison. 2001. Tillage system, fertilizer nitrogen rate, and timing effect on corn yields in the Texas Blackland Prairie. *Agron. J.* 93: 1119-1124.
- Uhart, S. A., and F. H. Andrade. 1995. Nitrogen deficiency in maize. I. Effects on corn growth, development to dry matter-partitioning, and kernel set. *Crop Sci.* 35: 1375-1383.
- Ulger, A. C., H. Ibrikci, B. Cakir, and N. Guzel. 1997. Influence of nitrogen rates and row spacing on corn yield, protein content, and other plant parameters. *J. Plant Nutr.* 20: 1697-1709.
- Wienhold, B. J., T. P. Trooien, and G. A. Reichman. 1995. Yield and nitrogen use efficiency of irrigated corn in the northern Great Plains. *Agron. J.* 87: 842-846.
- Zebarth, B. J., and R. W. Sheard. 1992. Influence of rate and timing of nitrogen fertilization application on yield and quality of hard red winter wheat. *Can. J. Plant Sci.* 72: 13-19.