

RESPONSE OF A FOURTH RATOON SUGARCANE CROP TO NITROGEN, SILICON, AND LIME FERTILIZATION

RESPUESTA DEL CUARTO CULTIVO DE SOCA DE CAÑA DE AZÚCAR A LA FERTILIZACIÓN DE NITRÓGENO, SILICIO Y CAL

Gilmara Pereira da Silva*, Renato de Mello-Prado, Thiago Batista Firmato-Almeida, N. Regina de Campos-Nóia

Department of Soils and Fertilizers, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Prof. route of access Paulo Donato Castellane, s/n, Jaboticabal, SP, CEP: 14884-900, Brazil. (gilmarapereira@agronoma.eng.br), (rmprado@fcav.unesp.br), (thibalmeida@gmail.com), (natalia_campos_17@hotmail.com).

ABSTRACT

Maximum efficiency of nitrogen (N) is attained when fertilizer is accompanied by silicon (Si). Therefore, the objective of this study was to evaluate the chemical attributes of the soil, the nutritional status, the yield of stalks, and the accumulation of N and Si by a fourth ratoon sugarcane (*Saccharum* sp.) crop, and the influence of N doses in the presence and absence of Si and lime. The study was carried out at the experimental farm of the UNESP Jaboticabal campus, state of São Paulo, Brazil. The experimental design was in a completely randomized block with a 5x2 factorial scheme: five doses of N (0, 40, 80, 120, and 160 kg ha⁻¹), and two corrective materials, silicate and lime; with four replications per treatment. The soil was characterized as dystrophic Red Latosol, and the sugarcane variety was RB855156. During the experiment, the N (N-NH₄⁺ and N-NO₃⁻) and Si content in the soil, the N and Si content in the leaf, production of stalks, and the accumulation of N and Si in the leaves and stalks were measured. Nitrogen fertilization associated with silicate and limestone increased the levels of N-NO₃⁻ and Si in the soil, and improved nutritional status and accumulation of N and Si in leaves and stalks of sugarcane; but, stalk production was lower when using silicate as compared to lime.

Keywords: *Saccharum* spp., nitrogen fertilization, silicate, limestone, stalk production.

INTRODUCTION

Cultivation of sugar cane (*Saccharum* spp.) has increased in Brazil as a result of technological improvements (Orlando Filho *et al.*, 1996)

* Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: October, 2014. Approved: May, 2015.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 49: 533-544. 2015.

RESUMEN

La eficiencia máxima de nitrógeno (N) se alcanza cuando el fertilizante de N se usa con silicio (Si). Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar los atributos químicos del suelo, el estado nutricional, la producción de tallos y la acumulación de N y Si en el cuarto cultivo de soca de caña (*Saccharum* sp.), y la influencia de la dosis de N en presencia y ausencia de Si y cal. El estudio se realizó en la granja experimental del campus UNESP-Jaboticabal, estado de São Paulo, Brasil. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con un arreglo factorial de 5x2: cinco dosis de N (0, 40, 80, 120 y 160 kg ha⁻¹), y dos materiales correctivos, silicato y cal; con cuatro repeticiones por tratamiento. El suelo se clasificó como Latosol Rojo distrófico y la variedad de caña de azúcar fue RB855156. Durante el experimento se midieron el contenido de N (N-NH₄⁺ y N-NO₃⁻) y Si en el suelo, el contenido de N y Si en la hoja, la producción de tallos y la acumulación de N y Si en las hojas y tallos. La fertilización con N asociada con silicato y caliza aumentó los niveles de N-NO₃⁻ y Si en el suelo, lo cual mejoró el estado nutricional y la acumulación de N y Si en las hojas y tallos de la caña de azúcar, pero la producción de tallos fue menor al usar silicato, comparado con cal.

Palabras clave: *Saccharum* spp., fertilización nitrogenada, silicato, cal, producción de tallos.

INTRODUCCIÓN

El cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum* spp.) ha aumentado en Brasil debido a mejoras tecnológicas (Orlando Filho *et al.*, 1996), como la fertilización del suelo y el encalado (Korndorfer y Martens, 1992). Para aumentar la eficiencia de los fertilizantes, las prácticas de corrección de la acidez del suelo son fundamentales. La acidez del suelo se

such as soil fertilization and liming (Korndorfer and Martens, 1992). In order to increase the efficiency of fertilizers, soil acidity correction practices are fundamental. Soil acidity is corrected by lime applications, but alternative correction materials are considered, such as metallurgy scoria which is an industrial residue. These products correct soil acidity, and also supply the plants with Ca, Mg, and Si (Prado and Fernandes, 2000). In highly productive systems, soil acidity correction practices also increase the efficiency of N fertilization (Deren *et al.*, 1994).

Nitrogen is an important in nutrition, growth, and productivity of ratoon sugarcane crops at harvest (Vitti *et al.*, 2007), but with different doses of N (Korndorfer *et al.*, 2002; Salgado-García *et al.*, 2000). Sugar cane crops also respond favorably to fertilization with Si, particularly in Si deficient soils. Experiments carried out in Brazil using silicate show consistent results, with production increasing from 11 to 20 % (Datnoff *et al.*, 2001). Studies with N and silicate fertilization show that Si may optimize the highest N efficiency when sugarcane is grown in highly productive systems.

The Si effect tends to be more beneficial to crops with high N doses (Takahashi, 1995), because it protects tender tissues from penetration by external agents, like plagues and pathogens, and reduces self-shading in the field, which maintains optimal photosynthetic rates (Malavolta, 2006a). Si makes the leaves more erect, reduces lodging, and increases the fertilization response, mainly when N is used (Malavolta, 2006b).

Few studies investigated the relationship between N and Si, and most of them were carried out under greenhouse conditions (Basto *et al.*, 2010; Vale *et al.*, 2010). Field studies have been restricted to the first cycles (Fonseca, 2011) of the cane crop (Borges, 2012). Therefore, solid information concerning the effects of N-Si interactions along the sugarcane ratoon is necessary.

Thus, the aim of this research was to evaluate the soil chemical characteristics, nutritional status, nutrient accumulation, and stalk production in a fourth ratoon sugarcane crop, in response to N, Si, and liming applications.

MATERIALS AND METHODS

The field experiment was carried out from July 2012 to July 2013 at the UNESP experimental farm (21° 14' 05" S and 48°

corrige mediante aplicaciones de cal, pero se considera el uso de materiales de corrección alternativos, como la escoria metalúrgica, un residuo industrial. Estos productos corrigen la acidez del suelo y también suplen a las plantas con Ca, Mg y Si (Prado y Fernandes, 2000). En sistemas muy productivos, las prácticas de corrección de la acidez del suelo también aumentan la eficiencia de la fertilización con N (Deren *et al.*, 1994).

El nitrógeno es importante para la nutrición, el crecimiento y la productividad de los cultivos de soca de caña de azúcar durante la cosecha (Vitti *et al.*, 2007), pero con diferentes dosis de N (Korndorfer *et al.*, 2002; Salgado-García *et al.*, 2000). Los cultivos de caña de azúcar responden bien a la fertilización con Si, sobre todo en suelos deficientes de Si. Experimentos en Brasil con silicato, muestran resultados consistentes y la producción aumentó de 11 a 20 % (Datnoff *et al.*, 2001). Los estudios de fertilización con N y silicato muestran que Si puede optimizar la mayor eficiencia de N si la caña de azúcar se cultiva en sistemas de alta productividad.

El efecto de Si tiende a ser más beneficioso para los cultivos con dosis altas de N (Takahashi, 1995), ya que protege a los tejidos tiernos contra la penetración de agentes externos, como plagas y patógenos, y reduce el autosombreado en el campo, lo cual mantiene tasas fotosintéticas óptimas (Malavolta, 2006a). Con Si las hojas son más erectas, se reduce el alojamiento, y aumenta la respuesta de la fertilización, sobre todo al usar N (Malavolta, 2006b).

Pocos estudios han investigado la relación entre el N y Si, y la mayoría se realizó en invernadero (Basto *et al.*, 2010; Vale *et al.*, 2010). Los estudios de campo se limitan a los primeros ciclos (Fonseca, 2011) de la cosecha de caña (Borges, 2012). Por lo tanto, es necesaria información sólida sobre los efectos de las interacciones N-Si en la soca de caña de azúcar.

Así, el objetivo de esta investigación fue evaluar las características químicas del suelo, el estado nutricional, la acumulación de nutrientes y la producción de tallos en un cuarto cultivo de soca de caña de azúcar, en respuesta a las aplicaciones de N, Si y de encalado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento de campo se realizó de julio del 2012 a julio del 2013, en la granja experimental de la UNESP (21° 14' 05" S y 48° 17' 09" O), campus Jaboticabal, estado de São Paulo (SP),

17° 09' W), Jabcoticabal campus, state of São Paulo (SP), Brazil. The soil of the experimental area was classified as a dystrophic Red Latosol (Embrapa, 2013). Total precipitation during the experiment was abundant (1407 mm) and adequately distributed (Figure 1).

After harvesting the third ratoon crop, which received silicate (S) and lime (L) at tillering, the soil chemical analysis was performed for fertility purposes, in the 0-20 cm deep layer, where S and L were applied, according to Raij *et al.* (2001). Soil fertility characteristics were: pH (CaCl₂): 4.3 and 4.4; OM: 14.7 and 14.5 g dm⁻³; P-resin: 10.2 and 9.7 mg dm⁻³; K: 1.1 and 1.1 mmol_c dm⁻³; Ca: 11.0 and 12.0 mmol_c dm⁻³; Mg: 4.3 and 4.3 mmol_c dm⁻³; H + Al: 43.6 and 42.4 mmol_c dm⁻³; sum of cations (SB): 16.5 and 17.4 mmol_c dm⁻³, cation exchange capacity (CEC): 60.1 and 59.6 mmol_c dm⁻³, and base saturation (BS): 27 % and 29 %; N-NH₄⁺: 0.3 and 0.3 mg kg⁻¹; N-NO₃⁻: 0.4 and 0.4 mg kg⁻¹ (Tedesco *et al.*, 1985) and Si: 0.8 and 0.7 mg dm⁻³ (Korndorfer *et al.*, 2004).

The experiment was arranged in the field according to a completely randomized block design in a 5 x 2 factorial arrangement (five doses of N: 0, 40, 80, 120, and 160 kg ha⁻¹; and two corrective materials: S and L), with four replications per treatment. Each experimental plot consisted of 4 6 m long furrows with 1.5 m between them, accounting for a total area of 36 m². In each plot, the sampling area included the two central rows, excluding the 1 m row hedges between each row; total sampling area was 18 m².

The experiment was carried out in the fourth ratoon sugarcane crop using the RB85551156 variety. This variety is early ripening, has excellent budding, high yield, and is the

Brasil. El suelo del área experimental fue clasificado como un Latosol Rojo distrófico (Embrapa, 2013). La precipitación total durante el experimento fue abundante (1407 mm) y con distribución adecuada (Figura 1).

Después de cosechar el tercer cultivo de soca que recibió silicato (S) y cal (C) durante el macollaje, se realizó el análisis químico del suelo para fines de fertilidad, en la capa de 0-20 cm de profundidad, donde se aplicaron S y C, de acuerdo con Raij *et al.* (2001). Las características de fertilidad del suelo fueron: pH (CaCl₂): 4.3 y 4.4; OM: 14.7 y 14.5 g dm⁻³; P-resina: 10.2 y 9.7 mg dm⁻³; K: 1.1 y 1.1 mmol_c dm⁻³; Ca: 11.0 y 12.0 mmol_c dm⁻³; Mg: 4.3 y 4.3 mmol_c dm⁻³; H + Al: 43.6 y 42.4 mmol_c dm⁻³; suma de cationes (SB): 16.5 y 17.4 mmol_c dm⁻³, capacidad de intercambio catiónico (CIC): 60.1 y 59.6 mmol_c dm⁻³, y la saturación de bases (SB): 27 % y 29 %; N-NH₄⁺: 0.3 y 0.3 mg kg⁻¹; N-NO₃⁻: 0.4 y 0.4 mg kg⁻¹ (Tedesco *et al.*, 1985), y Si: 0.8 y 0.7 mg dm⁻³ (Korndorfer *et al.*, 2004).

El experimento se dispuso en el campo de acuerdo con un diseño de bloques completos al azar con un arreglo factorial de 5x2 (cinco dosis de N: 0, 40, 80, 120 y 160 kg ha⁻¹; y dos materiales correctivos: S y C), con cuatro repeticiones por tratamiento. Cada parcela experimental tenía 4 surcos de 6 m de longitud con una separación de 1.5 m entre cada uno, lo cual es una superficie total de 36 m². En cada parcela, la zona de muestreo incluyó las dos filas centrales, excluyendo los setos de 1 m localizados entre cada fila. El área total de muestreo fue 18 m².

El experimento se realizó en el cuarto cultivo de soca de caña con la variedad RB85551156. Esta variedad es de madurez temprana, tiene excelente brotación y alto rendimiento; es la séptima variedad de caña de azúcar más cultivada en São Paulo, Mato

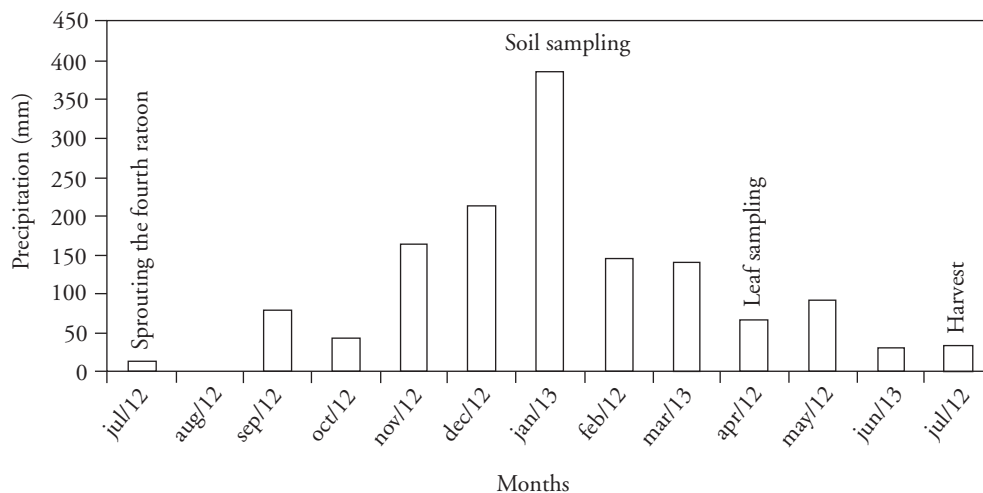


Figure 1. Mean monthly precipitation values during the experimental period (FCAV/Unesp 2014).
Figura 1. Valores de precipitación media mensual durante el periodo experimental (FCAV/Unesp 2014).

seventh most cultivated sugarcane variety in São Paulo, Mato Grosso, and Mato Grosso do Sul states, and cultivation area is likely to increase (PMGCA, 2009). The sugarcane planting and ratoon growth information, as well as its agronomic management were reported by Fonseca (2011) and Borges (2012).

Prior to the establishment of the experiment, the corrective doses were determined to raise BS to 60 % according to the recommendations for growing sugarcane in SP. However, only half of the amount was used, because the L was applied superficially, without incorporation (Rossetto *et al.*, 2004). Lime was applied at a dose of 1.0 t ha^{-1} (relative efficiency (RE) = 86.2 %, reactivity (R) = 85.9 %, CaO = 41.4 %, and MgO = 10.6 %); and Si at a dose of 0.91 t ha^{-1} (RE = 88.0 %, R = 82.9 %, CaO = 42.1 %, MgO = 12.4 %, total Si = 8.1 %, soluble Si (in $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3$) = 6.0 %).

To set the N doses, a base dose of 120 kg ha^{-1} N was used, which is recommended for attaining ratoon sugarcane production higher than 100 t ha^{-1} in SP (Spironello *et al.*, 1997). Nitrogen fertilizer was locally applied, without incorporation, before the rainy period of July 2012. This fertilizer was applied as urea, manually distributed 15 d after sugarcane sprouting, at 10 cm from the planting line. K was KCl-type, applied uniformly in all treatments, concurrently as N at a concentration of 150 kg ha^{-1} of K_2O (Spironello *et al.*, 1997). There was no P fertilization.

During the experiment (6 and 12 months after sugarcane sprouting) soil samples were taken at the locations where the fertilizers were applied in order to determine N (N-NH_4^+ and N-NO_3^-) and Si contents. Ten samples were taken from each plot at depths of 0-10, 10-20, 20-40, and 40-60 cm. The soil samples used for the determination of N were transported from the field to the laboratory in thermal boxes with ice (Mattos Júnior *et al.*, 1995). In the laboratory, the samples were kept in a freezer until they were used for the determination of N-NH_4^+ and N-NO_3^- (Tedesco *et al.*, 1985). The analytical determination of the "available" Si concentration in the soil followed procedures described by Korndorfer *et al.* (2004).

At nine months, the highest sugarcane vegetative development phase, the N and Si foliar content were measured, from 10 leaf samples 20 cm center, leaf +1, without the central midrib (Rajj and Cantarella, 1997). Analysis of N and Si were performed according to Bataglia *et al.* (1983) and Korndörfer *et al.* (2004), respectively.

Twelve months after sugarcane sprouting, manual harvesting of the plants took place without previous burning of the plants. The stalks weight was expressed in t ha^{-1} . To calculate N and Si content as kg of dry matter produced, total leaves and stalks in the sampling area were weighed separately.

Analysis of variance was used for all data, based on the F test ($p \leq 0.05$). Means comparisons of corrective treatments were

Grosso y Mato Grosso del Sur, y su área de cultivo puede aumentar (PMGCA, 2009). La plantación de caña de azúcar, la información de crecimiento de la soca, y su manejo agronómico fueron reportados por Fonseca (2011 y Borges (2012).

Antes de establecer el experimento, las dosis correctivas se determinaron para elevar la SB a 60 %, según las recomendaciones para el cultivo de la caña de azúcar en SP. Pero se usó sólo la mitad de la cantidad ya que la C se aplicó en la superficie, sin incorporar (Rossetto *et al.*, 2004). La dosis de cal fue 1.0 t ha^{-1} (eficiencia relativa (ER) = 86.2 %, reactividad (R) = 85.9 %, CaO = 41.4 %, y MgO = 10.6 %); y la dosis de Si fue 0.91 t ha^{-1} (ER = 88.0 %, R = 82.9 %, CaO = 42.1 %, MgO = 12.4 %, total Si = 8.1 %, Si soluble (en $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3$) = 6.0 %).

Para ajustar las dosis de N, se usó una dosis de base de 120 kg ha^{-1} N, recomendada para alcanzar una producción de soca de caña mayor a 100 t ha^{-1} en SP (Spironello *et al.*, 1997). El fertilizante de N se aplicó a nivel local, sin incorporar, antes del período de lluvias de julio de 2012. Este fertilizante se aplicó como urea, distribuido manualmente 15 d después de la germinación de la caña de azúcar, a 10 cm de la línea de siembra. El fertilizante K era KCl y se aplicó de manera uniforme en todos los tratamientos, al mismo tiempo que N y en una concentración de 150 kg ha^{-1} de K_2O (Spironello *et al.*, 1997). No hubo fertilización fosfórica.

Durante el experimento (6 y 12 meses después de la brotación de caña de azúcar) se tomaron muestras de suelo en los lugares donde se aplicaron los fertilizantes para determinar el contenido de los minerales N (N-NH_4^+ + N-NO_3^-) y Si. De cada parcela se tomaron 10 muestras a 0-10, 10-20, 20-40, y 40-60 cm. Las muestras de suelo usadas para determinar N fueron transportadas del campo al laboratorio en cajas térmicas con hielo (Mattos Júnior *et al.*, 1995). En el laboratorio las muestras se mantuvieron congeladas hasta determinar N-NH_4^+ + N-NO_3^- (Tedesco *et al.*, 1985). La determinación analítica de la concentración de Si disponible en el suelo fue según lo descrito por Korndorfer *et al.* (2004).

A los nueve meses, la mayor fase de desarrollo vegetativo de la caña de azúcar, se midió el contenido foliar de N y Si, en 10 muestras de hojas a 20 cm del centro, hoja+1, sin la nervadura central (Rajj y Cantarella, 1997). Los análisis de N y Si siguieron los métodos de Bataglia *et al.* (1983) y Korndörfer *et al.* (2004), respectivamente.

Doce meses después de la brotación de caña de azúcar, se realizó la cosecha manual de las plantas sin una quema previa. El peso de los tallos se expresó en t ha^{-1} . Para calcular el contenido de N y Si como kg de MS producida, todas las hojas y tallos en la zona de muestreo fueron pesados por separado.

El ANDEVA se usó para todos los datos, con base en la prueba de F ($p \leq 0.05$). Las comparaciones de medias de tratamientos correctivos se realizaron con la prueba de Tukey $p \leq 0.05$. Cuando

performed by the Tukey test ($p \leq 0.05$). When N dose variation was significantly different, polynomial regression analysis was performed. SISVAR was used for all statistical analyses (version 5.3 BETA; Ferreira, 2011).

RESULTS AND DISCUSSION

There was a significant effect of N fertilization on the soil $N-NH_4^+$ concentration at 6 and 12 months of sugarcane growth. At 12 months, a corrective effect on the soil $N-NH_4^+$ concentration was observed (Table 1). This result is similar to that observed by Vale *et al.* (2013) when they studied $N-NH_4^+$ and $N-NO_3^-$ content in soil as a function of N application in sugarcane ratoons. Améndola-Massiotti *et al.* (2011) also found an increase in N content in the soil with increasing doses of N.

The N doses associated with S and L addition influenced the amount of $N-NO_3^-$ in the soil at six months after sugarcane sprouting. However, at 12 months, the effect of N doses and corrective materials only increased soil $N-NO_3^-$ when S was used (Table 1). These results are similar to those observed at six months by Fonseca (2011) who found an interaction between N and corrective additions with soil $N-NO_3^-$ in a similar experiment in the first growth stage. Regarding Si content, the N doses associated with corrective material additions influenced the Si content in the soil at 6 and 12 months after sugarcane sprouting (Table 1). These results are similar to those observed by Fonseca (2011).

la variación de dosis de N fue significativamente diferente, se realizó un análisis de regresión polinomial. SISVAR se usó para todos los análisis estadísticos (versión 5.3 BETA; Ferreira, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fertilización nitrogenada tuvo un efecto significativo en la concentración $N-NH_4^+$ del suelo a los 6 y 12 meses de crecimiento de la caña de azúcar. A los 12 meses se observó un efecto correctivo en la concentración $N-NH_4^+$ del suelo (Cuadro 1). Este resultado es similar al observado por Vale *et al.* (2013) del contenido de $N-NH_4^+$ y $N-NO_3^-$ en el suelo en función de la aplicación de N en las socas de caña de azúcar. Améndola-Massiotti *et al.* (2011) también encontraron un aumento en el contenido de N en el suelo con dosis crecientes de N.

Las dosis de N asociadas a la adición de S y C influyeron en la cantidad de $N-NO_3^-$ del suelo a los seis meses después de la brotación de la caña de azúcar. Sin embargo, a los 12 meses, el efecto de la dosis de N y los materiales correctivos sólo aumentó el $N-NO_3^-$ del suelo cuando se usó S (Cuadro 1). Estos resultados son similares a los observados a los seis meses por Fonseca (2011), quien encontró una interacción entre el N y las adiciones correctivas con el $N-NO_3^-$ del suelo, en un experimento similar realizado en la primera etapa de crecimiento. Respecto al contenido de Si, las dosis de N asociadas a las adiciones de materiales correctivos influyeron en el contenido de Si en el suelo a los 6 y 12 meses después de la brotación

Table 1. Soil chemical attributes at 6 and 12 months after fourth ratoon sugarcane sprouting as a function of N doses and two corrective materials (silicate and lime). Jaboticabal, SP, 2013.

Cuadro 1. Atributos químicos del suelo a los 6 y 12 meses después de la cuarta brotación de soca de caña de azúcar en función de las dosis de N y dos materiales correctivos (silicatos y cal). Jaboticabal, SP, 2013.

Treatments	6 months			12 months		
	$N-NH_4^+$	$N-NO_3^-$	Si	$N-NH_4^+$	$N-NO_3^-$	Si
Corrective materials (C)	mg kg ⁻¹		mg dm ³	mg kg ⁻¹		mg dm ⁻³
Limestone	19.68	15.09	6.55	10.33	8.97	12.41
Silicate	19.70	15.22	6.78	12.45	10.85	13.87
(C)	0.01 ^{NS}	0.18 ^{NS}	1.17 ^{NS}	142.94 ^{**}	112.43 ^{**}	8.29 [*]
N doses (N)	156.02 ^{**}	48.03 ^{**}	12.66 ^{**}	68.36 ^{**}	58.65 ^{**}	29.82 ^{**}
(N) X (C)	1.13 ^{NS}	6.58 ^{**}	6.67 ^{**}	1.09 ^{NS}	2.14 ^{NS}	2.54 [*]
C.V.%	3.3	6.5	10.2	4.9	5.7	6.4

** $p \leq 0.01$; * $p \leq 0.05$; NS: not significant; CV: coefficient of variation ♦ ** $p \leq 0.01$; * $p \leq 0.05$; NS: no significación; CV: coeficiente de variación.

Nitrogen application had both a linear and quadratic relationship with soil N-NH_4^+ at 6 and 12 months after sugarcane sprouting, independent of the corrective materials used (Figure 2). The sugarcane response to N application was possibly due to the low amount of N-NH_4^+ in the soil (0.3 mg kg^{-1}) after the third ratoon harvest. Vale *et al.* (2013) also found a linear relationship between N addition rate and soil N-NH_4^+ levels six months after sugarcane sprouting.

Nitrogen fertilization rates, when associated with corrective material addition, had a quadratic relationship with soil N-NO_3^- at six months after sugarcane sprouting (Figure 3A). At 12 months, independent of the corrective materials used, N fertilization promoted an increase of N-NO_3^- in the soil (Figure 3B). The N-NO_3^- value found in this experiment was higher than the one reported by Fonseca (2011) at 12 months after sugarcane sprouting, which may have been caused by different N fertilization management for sugarcane in the first growth cycle.

The application of increasing N doses in association with soil corrective materials had a linear relationship with soil Si concentration in the soil six months after the sprouting of sugarcane plants. There was no significant effect of silicate fertilization on soil Si concentration (Figure 4A).

Measurements made 12 months after plant sprouting, showed a quadratic relationship between increasing doses of N with S addition and Si content

de la caña de azúcar (Cuadro 1). Estos resultados son similares a los de Fonseca (2011).

La aplicación de N tuvo una relación lineal y cuadrática con el N-NH_4^+ del suelo a los 6 y 12 meses después de la brotación de la caña de azúcar, independientemente de los materiales correctores utilizados (Figura 2). La respuesta de la caña de azúcar a la aplicación de N se debió posiblemente a la baja cantidad de N-NH_4^+ en el suelo (0.3 mg kg^{-1}) después de la tercera cosecha de soca. Vale *et al.* (2013) también encontraron una relación lineal entre la velocidad de adición de N y los niveles de N-NH_4^+ en el suelo, seis meses después de la brotación de la caña de azúcar.

Los niveles de fertilización de N, asociados a la adición de los materiales correctivos, mostraron una relación cuadrática con el N-NO_3^- del suelo a los seis meses después de la brotación de la caña de azúcar (Figura 3A). A los 12 meses, independientemente de los materiales correctivos utilizados, la fertilización con N promovió un aumento de N-NO_3^- en el suelo (Figura 3B). El valor de N-NO_3^- encontrado en este experimento fue mayor al reportado por Fonseca (2011) a los 12 meses después de la brotación de la caña de azúcar, lo cual pudo ser causado por un manejo diferente de la fertilización de N para la caña de azúcar en el primer ciclo de crecimiento.

La aplicación de dosis crecientes de N en asociación con los materiales correctivos del suelo tuvo una relación lineal con la concentración de Si en suelo, en los suelos seis meses después de la germinación de las plantas de caña de azúcar. La fertilización con silicato

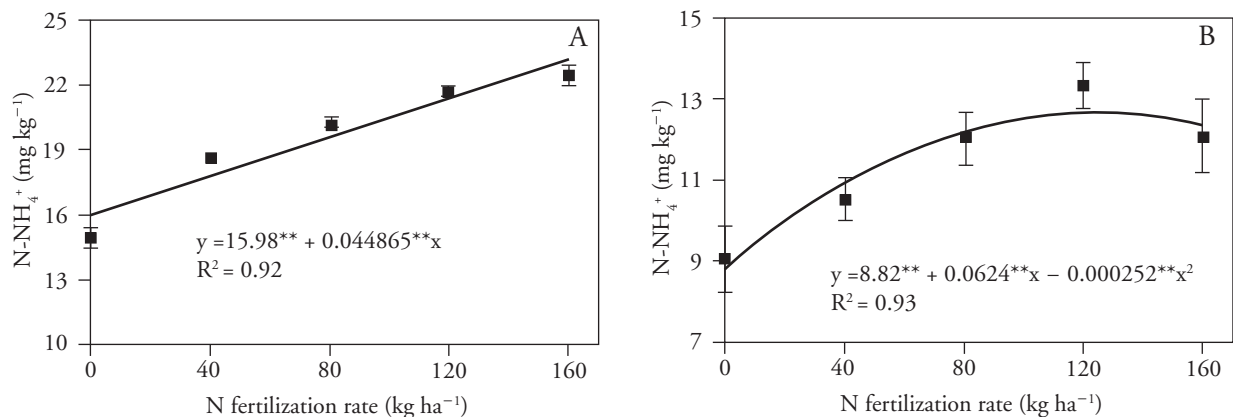


Figure 2. Ammonium content in the soil at six (A) and twelve (B) months after the sprouting of the fourth ratoon sugarcane crop as influenced by increasing doses of N. Jaboticabal, SP. 2013.

Figura 2. El contenido de amonio en el suelo a los seis (A) y doce (B) meses después de la brotación del cuarto cultivo de soca de caña de azúcar, influenciada por el aumento de las dosis de N. Jaboticabal, SP. 2013.

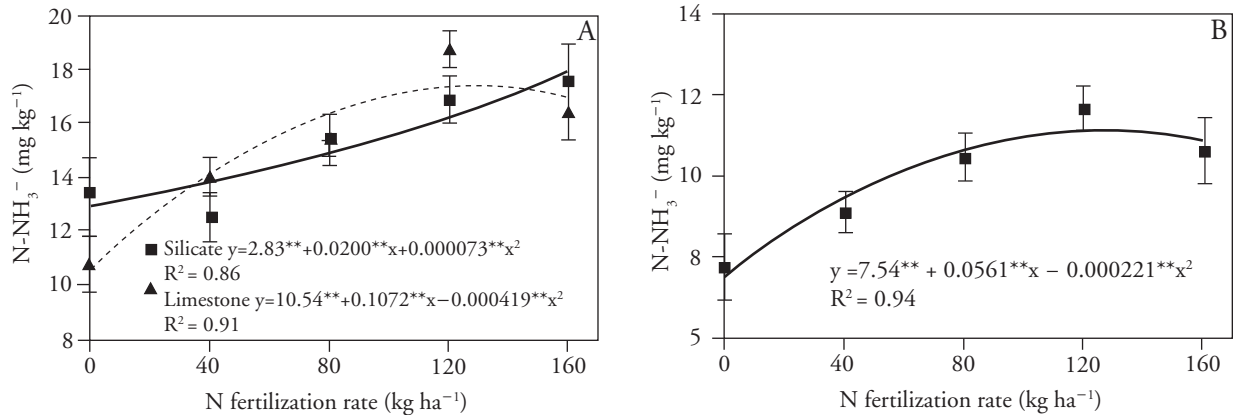


Figure 3. Nitrate content in the soil at 6 months (A) as a function of increasing N doses and two corrective material additions (silicate and lime); and at 12 months (B) as a function of increasing N doses in the fourth ratoon sugarcane crop. Jaboticabal, SP, 2013.

Figura 3. Contenido de nitrato en el suelo a los 6 meses (A) en función de las dosis crecientes de N y dos adiciones de materiales correctivos (silicato y cal); y a los 12 meses (B) en función de las dosis crecientes de N en el cuarto cultivo de soca de caña de azúcar. Jaboticabal, SP, 2013.

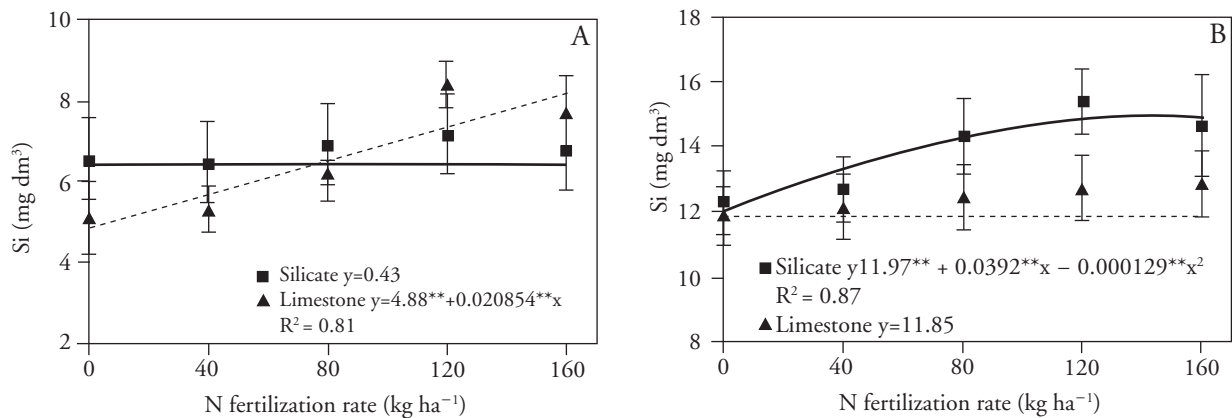


Figure 4. Si content in the soil at six (A) and twelve (B) months after the sprouting of fourth ratoon sugarcane plants as influenced by increasing N doses and two corrective materials (silicate and lime). Jaboticabal, SP, 2013.

Figura 4. Contenido de Si en el suelo a los seis (A) y doce (B) meses después de la germinación de plantas en la cuarta soca de caña de azúcar, influenciado por el aumento de las dosis de N y dos materiales correctivos (silicato y cal). Jaboticabal, SP, 2013.

in the soil. Besides, L had no significant influence on soil Si content (Figure 4B). Sousa *et al.* (2010) also applied S to sugarcane and observed that the soil Si concentration increased linearly when the residue doses increased at 120 and 260 d.

Nitrogen and corrective material addition interacted to influence leaf content, the accumulation of N and Si in leaves and stalks, and stalk production (Table 2). These results are similar to those obtained by Fonseca (2011) for N and Si content and N

no tuvo un efecto significativo en la concentración de Si en el suelo (Figura 4A).

Las mediciones realizadas 12 meses después de la brotación de las plantas mostraron una relación cuadrática entre las dosis crecientes de N, con la adición S, y el contenido de Si en el suelo. Además C no tuvo ninguna influencia en el contenido de Si en el suelo (Figura 4B). Sousa *et al.* (2010) también aplicaron C a la caña de azúcar, y observaron que la concentración de Si en el suelo aumentó linealmen-

accumulation, and by Borges (2012) for N in leaves and Si in leaves and stalks.

Regarding stalk production, Reis *et al.* (2013) showed an increase in sugarcane stalk production in response to corrective material additions. Castro *et al.* (2014) studied N fertilization on growth of the SP81-3250 sugarcane variety and observed higher stalk production at 144 N kg ha⁻¹.

Doses of N doses in association with corrective material additions had a quadratic relationship with leaf N content (Figure 5A). The interaction between N and corrective materials led to adequate levels of N (18-25 g kg⁻¹) according to Raij and Cantarella (1997). The leaf N levels observed in our study were higher than those reported by a similar experiment in the first sugarcane cycle. The lower level of N found by Fonseca (2011) was probably due to the low response of the cane plant to N fertilization (Orlando Filho, 1994).

The interaction between N and the corrective material additions had a quadratic relationship with leaf Si concentration (Figure 5B). Anderson and Bowen (1992) found that in order to obtain high sugarcane stalk production, Si should be added at concentrations greater than 10 g kg⁻¹ of + 1 leaf dry matter.

Increasing N doses along with the use of S and L showed a quadratic relationship with N and Si accumulation leaves (Figure 5C, D). The results from this experiment contrast those of Borges (2012), who

te cuando las dosis de residuos aumentaron a los 120 y 260 d.

El N y la adición de materiales correctivos interactuaron para influir en el contenido de las hojas, en la acumulación de N y Si en las hojas y tallos, y en la producción de tallos (Tabla 2). Estos resultados son similares a los obtenidos por Fonseca (2011) para el contenido de N y Si y la acumulación de N, y por Borges (2012) para el contenido de N en las hojas y Si en las hojas y los tallos.

Respecto a la producción de los tallos, Reis *et al.* (2013) mostraron un aumento en la producción de los tallos de caña de azúcar, en respuesta a las adiciones de materiales correctivos. Castro *et al.* (2014) estudiaron la fertilización de N en el crecimiento de la variedad SP81-3250 de caña de azúcar y observaron una mayor producción en el tallo de 144 N kg ha⁻¹.

Las dosis de N en asociación con las adiciones de materiales correctivos tuvieron una relación cuadrática con el contenido de N en las hojas (Figura 5A). La interacción entre N y los materiales correctivos causó niveles adecuados de N (18-25 g kg⁻¹) de acuerdo con Raij y Cantarella (1997). Los niveles de N en las hojas observados en nuestro estudio fueron superiores a los reportados en un experimento similar en el primer ciclo de la caña de azúcar. El nivel más bajo de N encontrado por Fonseca (2011) probablemente se debió a la baja respuesta de la planta de caña a la fertilización con N (Orlando Filho, 1994).

La interacción entre N y las adiciones de mate-

Table 2. Accumulation of N and Si in leaves and stalks and stalk production of the fourth ratoon sugarcane crop as influenced by increasing N doses and two corrective material additions (silicate and lime). Jaboticabal, SP, 2013.

Cuadro 2. La acumulación de N y Si en las hojas y los tallos y en la producción de tallos del cuarto cultivo de soca de la caña de azúcar, influenciada por el aumento de las dosis de N y dos adiciones de materiales correctivos (silicato y cal). Jaboticabal, SP, 2013.

Factor	Content (g kg ⁻¹)		Leaf		Accumulation (kg ha ⁻¹)		Stalk production (t ha ⁻¹)
	N	Si	Stalk				
			N	Si			
Corrective materials (C)							
Limestone	19.99	5.12	228.53	141.91	88.81	79.23	104.60
Silicate	18.28	5.54	155.77	159.92	63.15	86.86	84.33
(C)	10.79**	46.22**	462.39**	217.10**	196.69**	411.35**	251.54**
N dose (N)	24.22**	108.59**	295.95**	476.04**	138.57**	211.56**	308.23**
(N) X (C)	5.06**	4.77**	820.10**	50.18**	107.58**	10.01**	48.77**
C.V. %	8.6	3.7	1.8	0.8	2.4	1.4	4.3

** p≤0.01. CV: coefficient of variation ♦ ** p≤0.01. CV: coeficiente de variación.

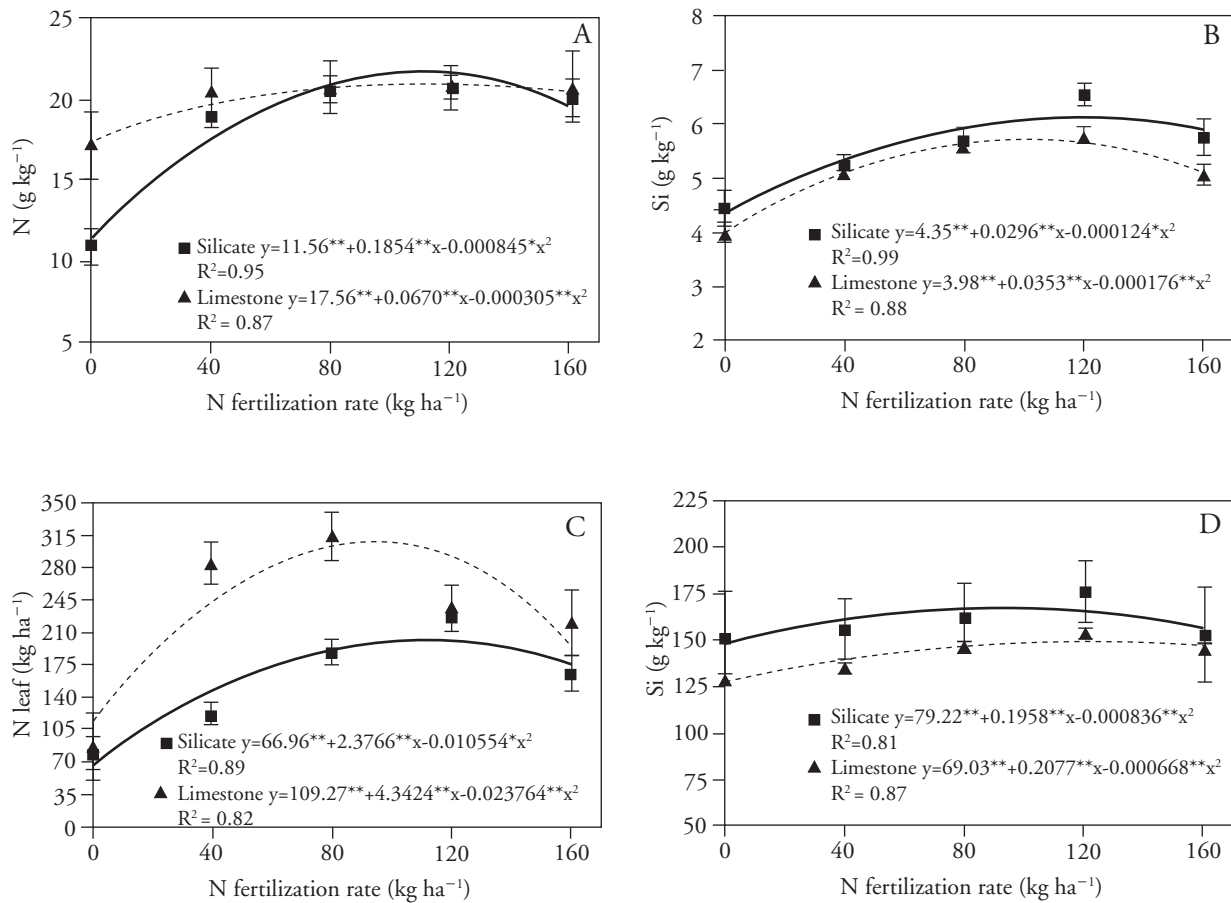


Figure 5. N (A) and Si (B) levels and N (C) and Si (D) accumulation in the leaf of sugar cane plants of the fourth generation as influenced by increasing N doses and two corrective material additions (silicate and lime). Jaboticabal, SP. 2013.

Figure 5. Niveles de N (A) y Si (B) y la acumulación de N (C), y Si (D) en las hojas de las plantas de la caña de azúcar de la cuarta generación, influenciado por el aumento de las dosis de N y las dos adiciones de materiales correctivos (silicato y cal). Jaboticabal, SP. 2013.

found that N accumulation was higher when S was used in association with increasing N doses. This difference may be due to the different production cycles in the two experiments. However, other studies show an increase in Si uptake by sugarcane plants when S was applied (Anderson, 1991; Raid *et al.*, 1992). Silicon increases in the leaf may be due to Si increases in the soil brought about by silicate.

The increasing N doses, when applied with the corrective materials, showed a quadratic relationship with the accumulation of N and Si in the stalks (Figure 6A, B). These results for N are different than those reported by Fonseca (2011), who observed a high accumulation of N when the silicate was applied to the soil. For Si, a higher value was observed by

riales correctivos tuvo una relación cuadrática con la concentración de Si en las hojas (Figura 5B). Anderson y Bowen (1992) encontraron que para obtener una mayor producción de tallos de caña de azúcar, Si debe añadirse en concentraciones de materia seca mayores a 10 g kg⁻¹ + 1 hoja.

El aumento de la dosis de N, junto con el uso de S y C, mostró una relación cuadrática con la acumulación de N y Si en las hojas (Figura 5C, D). Los resultados de este experimento contrastan los de Borges (2012), quien encontró que la acumulación de N fue mayor cuando S fue utilizado en asociación con el aumento de la dosis de N. Esta diferencia se puede deber a los diferentes ciclos de producción en los dos experimentos. Sin embargo, otros estudios tam-

Fonseca (2011), where Si accumulation in the stalks using corrective materials was 96.4 kg ha⁻¹. The higher Si accumulation in the stalks observed by Fonseca (2011) may be due to the application of 2.61 t ha⁻¹ of Ca and Mg silicate, whereas in our study fertilizer was applied superficially without incorporation (0.9 t ha⁻¹ of Ca and Mg silicate).

Nitrogen doses applied with corrective materials showed a quadratic relationship with stalk production (Figure 6C). These results are similar to those reported by Rosseto (2004) who studied the effect of L on sugarcane stem production. But Fonseca (2011) observed a linear increasing relationship with stalk production when silicate was applied. The smaller effect on stalk production when silicate was applied may be due to higher N accumulation in leaves and stalks when L was used (Figures 5C and 6A). This explains the higher production in this treatment because N promotes an increase in stalk production (Vieira *et al.*, 2010). However, it could also be due to the absence of stress during the cultivation of sugarcane, as there was ample water available during

bién muestran un aumento en la absorción de Si por las plantas de caña de azúcar cuando se aplicó S (Anderson, 1991; Raid *et al.*, 1992). El incremento de Si en las hojas puede deberse al aumento de Si en el suelo causado por el uso de silicato.

Las dosis de N cuando aplicadas con los materiales correctivos mostraron una relación cuadrática con la acumulación de N y Si en los tallos (Figura 6A, B). Estos resultados para N son diferentes a los de Fonseca (2011), quien observó una mayor acumulación de N al aplicar silicato al suelo. Fonseca (2011) observó un mayor valor para Si y la acumulación de Si en los tallos al usar materiales correctivos, fue 96.4 kg ha⁻¹. La mayor acumulación de Si en los tallos (Fonseca, 2011) puede deberse a la aplicación de 2.61 t ha⁻¹ de Ca y silicato Mg, mientras que en nuestro estudio el fertilizante fue aplicado superficie, sin incorporación (0.9 t ha⁻¹ de Ca y silicato Mg).

Las dosis de N aplicadas con materiales correctivos mostraron una relación cuadrática con la producción de los tallos (Figura 6C). Estos resultados son similares a los de Rosseto (2004), quien estudió

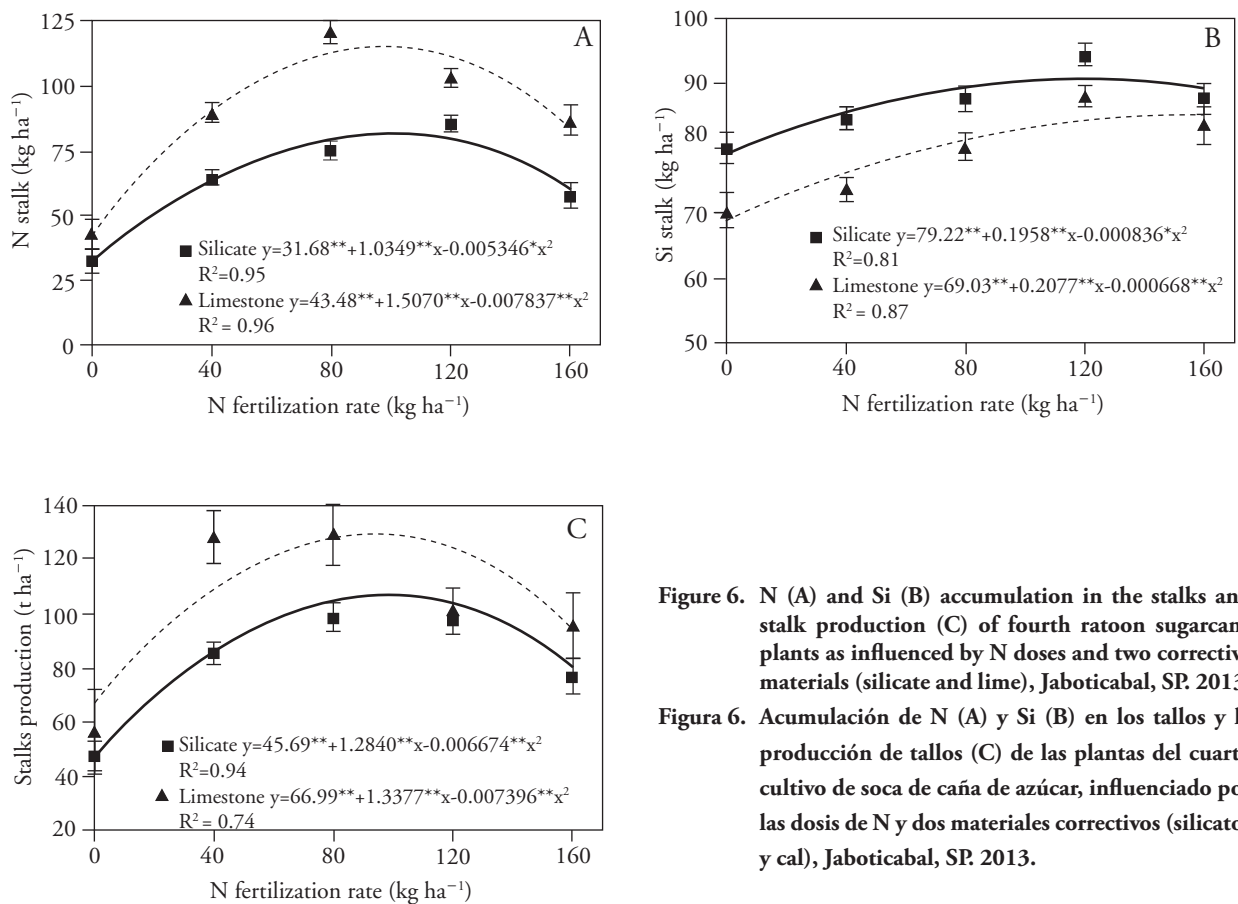


Figure 6. N (A) and Si (B) accumulation in the stalks and stalk production (C) of fourth ratoon sugarcane plants as influenced by N doses and two corrective materials (silicate and lime), Jaboticabal, SP. 2013.

Figura 6. Acumulación de N (A) y Si (B) en los tallos y la producción de tallos (C) de las plantas del cuarto cultivo de soca de caña de azúcar, influenciado por las dosis de N y dos materiales correctivos (silicatos y cal), Jaboticabal, SP. 2013.

crop development, and no pests and disease damage were observed. Silicon is a beneficial element and its positive effect was reported under stressful conditions (Marschner, 1986).

CONCLUSION

Nitrogen fertilization associated with the use of S and lime increased the levels of $N-NO_3^-$ and Si in the soil, promoting improvements in the nutritional status of sugarcane and accumulation of N and Si in the leaves and stalks. However, stalk production was lower when using S than when using limestone.

ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank FAPESP (São Paulo State Foundation for the Financial Support of Research) for financially supporting the project and to CAPES (Coordination for the Support of People engaged in University Teaching) for the scholarship awarded to the first author.

LITERATURE CITED

- Améndola-Massiotti, R., I. Cach-Gómez, E. Álvarez-Sánchez, I. López-Cruz, J. Burgueño-Ferreira, P. Martínez-Hernández, and D. Cristóbal-Acevedo. 2011. Nitrogen balance in forage maize with different fertilization and phase of crop rotation with pastures. *Agrociencia* 45: 177-193.
- Anderson, D. L., and J. E. Bowen. 1992. Nutrição da cana-de-açúcar. Piracicaba: Potafós. 40 p.
- Anderson, D. L. 1991. Soil and leaf nutrient interaction following application of calcium silicate slag to sugar cane. *Fertilizer Res.* 30: 9-18.
- Basto, J. C. H. A. G., J. J. O. Cazetta, and R. M. Prado. 2010. Materiais corretivos e nitrogênio na nutrição e na produção de matéria seca de cana-de-açúcar cultivada em vaso. *Interciencia* 35: 55-58.
- Bataglia, O. C., A. M. C. Furlani, J. P. F. Teixeira, P. R. Furlani, and J. R. Gallo. 1983. Métodos de análise química de plantas, *Boletim Técnico* 78, Instituto Agrônomo, São Paulo, Brazil, 48 p.
- Castro, S. G. Q., H. C. J. Franco, and M. A. Mutton. 2014. Harvest managements and cultural practices in sugar cane. *Rev. Bras. Ciênc. Solo.* 38: 299-306.
- Datnoff, L. E., G. H. Snyder, and G. H. Korndorfer. 2001. Silicon in Agriculture. Elsevier. Amsterdam. 403 p.
- Deren, C. W., L. E. Datnoff, G. H. Snyder, and F. G. Martin. 1994. Silicon concentration, disease response, and yield components of rice genotypes grown on flooded organic histosols. *Crop Sci.* 34: 733-37.
- Embrapa, 2013. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Editora Embrapa, 3. ed. Brasília-DF, Brazil, 353 p.

el efecto de la C en la producción de los tallos de caña de azúcar. Pero Fonseca (2011) observó una creciente relación lineal con la producción de tallos al aplicar silicato. El menor efecto en la producción de tallos cuando silicato fue aplicado, puede deberse a una mayor acumulación de N en las hojas y los tallos cuando se usó C (Figuras 5C y 6A). Esto explica la mayor producción en este tratamiento, ya que N aumenta la producción de tallos (Vieira *et al.*, 2010). Sin embargo, también podría deberse a la ausencia de estrés durante el cultivo de la caña de azúcar, ya que hubo suficiente agua disponible durante el desarrollo del cultivo, y no se observaron daños causados por plagas o enfermedad. El Si es un elemento beneficioso y su efecto positivo se reporta solo en condiciones de estrés (Marschner, 1986).

CONCLUSIONES

La fertilización de N asociada con el uso de S y C aumentó los niveles de $N-NO_3^-$ y Si en el suelo, a la vez que promovió mejoras en el estado nutricional de la caña de azúcar y la acumulación de N y Si en las hojas y los tallos. Sin embargo, la producción de tallos fue menor cuando se usó S fue utilizado que cuando se utilizó la caliza.

—Fin de la versión en Español—

---*---

- FCAV/Unesp. 2014. Estação Agroclimatológica, Jaboticabal. <http://www.fcav.unesp.br/#1244>, 1975. (Acesso: março, 2014).
- Ferreira, D. F. 2011. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciênc. Agrotec.* 35: 1039-1042.
- Fonseca, I. M. 2011. Atributos químicos do solo, nutrição e produtividade da cana-planta em função da aplicação de nitrogênio e de escória de siderurgia. Tese de doutorado. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, São Paulo. 98 p.
- Korndorfer, G. H., and M. Martins. 1992. Importância da adubação na qualidade da cana-de-açúcar. *STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos.* 10: 2-31.
- Korndorfer, G. H., H. S. Pereira, and M. S. Camargo. 2002. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. *STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos.* 21: 6-9.
- Korndorfer, G. H., H. S. Pereira, and A. Nolla. 2004. Análise de silício: solo, planta e fertilizante. Uberlândia, *Boletim Técnico* 2, 34 p.

- Malavolta, E. 2006a. Elementos benéficos e tóxicos: Silício. *In*: Malavolta, E. (ed). Manual de Nutrição Mineral de Plantas. Editora Agronômica Ceres. São Paulo, Brazil. pp: 418-511.
- Malavolta, E. 2006b. Manual de Nutrição de Plantas. Editora Agronômica Ceres. São Paulo, Brazil. 638 p.
- Marschner, H. 1986. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press. London. 674 p.
- Mattos Júnior, D., H. Cantarella, and B. van Raij. 1995. Manuseio e conservação de amostras de solo para preservação do nitrogênio inorgânico. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 19: 423-431.
- Orlando Filho, J. O., V. C. Bittencourt, Q. A. C. Carmello, and E. G. F. Beauclair. 1996. Relações K, Ca e Mg de solo areia quartzosa e produtividade da cana-de-açúcar. *STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos*. 14: 13-17.
- Orlando Filho, J., N. Macedo, and H. Tokeshi. 1994. Seja o doutor do seu canavial. *Encarte de Informações Agronômica, Boletim Técnico* 67. 6 p.
- PMGCA. 2009. Programa de Melhoramento Genético da cana-de-açúcar. Variedades RB de cana-de-açúcar. Centro de Ciências Agrárias/UFSCAR. São Carlos, Brazil, 136p.
- Prado, R. M., and F. M. Fernandes. 2000. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. *Sci. Agric_(Piracicaba, Braz.)* 57: 739-744.
- Raid, R. N., D. L. Anderson, and M. F. Ulloa. 1992. Influence of cultivar and amendment of soil with calcium silicate slag on foliar disease development and yield of sugar cane. *Crop Prot. (Amsterdam)* 11: 84-88.
- Raij, B. van, and H. Cantarella. 1997. Outras culturas industriais. *In*: Raij, B. van, H. Cantarella, J. A. Quaggio, A. M. C. Furlani (eds). *Recomendações de Adubação e Calagem para o estado de São Paulo* 2. ed. rev. *Boletim Técnico* 100. Instituto Agronômico, Campinas, Brazil. pp: 233-239.
- Raij, B. van, J. C. Andrade, H. Cantarella, and J. A. Quaggio. 2001. *Análise Química para Avaliação da Fertilidade do Solo*. Instituto Agronômico, Campinas, Brazil. 285 p.
- Reis, J. J. D., A. M. T. Alovisi, J. A. A. Ferreira, A. A. Alovisi, and C. F. Gomes. 2013. Atributos químicos do solo e produção da cana-de-açúcar em resposta ao silicato de cálcio. *Rev. Ciênc. Agrárias*. 36: 3-9.
- Rossetto, R., A. Spironello, H. Cantarella, and J. A. Quaggio. 2004. Calagem para cana-de-açúcar e sua interação com doses de Potássio. *Bragantia* 63: 105-119.
- Salgado-García, S., R. Núñez-Escobar, J. J. Peña-Cabriales, J. D. Etchevers-Barra, D. J. Palma-López, y R. M. Soto-Hernández. 2000. Respuestas de la soca de caña de azúcar a la fertilización NPK. *Agrociencia* 34: 689-698.
- Sousa, R. T. X., Korndörfer, G. H., and Wangen, D. R. B. 2010. Aproveitamento de silício proveniente de escória siderúrgica por cultivares de cana-de-açúcar. *Bragantia* 69: 669-676.
- Spironello, A., B. van Raij, C. P. Penatti, H. Cantarella, J. L. Morelli, J. Orlando Filho, M. G. A. Landell, and R. Rossetto. 1997. *In*: Raij B. van, H. Cantarella, J. A. Quaggio, A. M. C. Furlani (eds). *Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo*. 2 ed. rev. *Boletim Técnico* 100. Instituto Agronômico. Campinas, Brazil. pp. 237-239.
- Takahashi, E. 1995. Uptake mode and physiological functions of silica. *In*: Matsuo, T., K. Kumazawa, R. Ishii, K. Ishihara, and H. Hirata (eds). *Science of the Rice Plant: Physiology, Food and Agriculture Policy Research Center*. Tokyo. pp. 420-433.
- Tedesco, M. J., S. J. Volkweiss, and H. Bohnen. 1985. Análises de solo, plantas e outros minerais. *Boletim Técnico* 5. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 188 p.
- Vale, D. W., R. D. M. Prado, H. Cantarella, I. M. Fonseca, C. C. Avalhaes, M. A. R. Correia, and E. M. P. Barbosa. 2013. Ammonium and nitrate in soil and ratoon sugarcane grown in function of nitrogen on Oxisol. *J. Plant Nutr.* 36: 201-213.
- Vale, D. W., R. M. Prado, J. C. H. A. G. Bastos, and J. O. Cazetta. 2010. Nitrogênio e escória de siderurgia nos atributos químicos do solo e na nutrição da cana-de-açúcar. *Revista da FZVA*. 7: 199-220.
- Vieira, M. X., P. C. O. Trivelin, H. C. J. Franco, R. Otto, and C. E. Faroni. 2010. Ammonium chloride as nitrogen source in sugar cane harvested without burning. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 34: 1165-1174.
- Vitti, A. C., P. C. O. Trivelin, G. J. C. Gava, C. P. Penatti, I. R. Bologna, C. E. Faroni, and H. C. J. Franco. 2007. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. *Pesq. Agropec. Bras.* 42: 249-256.