

Scientific Electronic Archives

Issue ID: Sci. Elec. Arch. Vol. 13 (3)

March 2020

DOI: <http://dx.doi.org/10.36560/1332020838>

Article link

<http://sea.ufr.edu.br/index.php?journal=SEA&page=article&p=view&path%5B%5D=838&path%5B%5D=pdf>

Included in DOAJ, AGRIS, Latindex, Journal TOCs, CORE, Discoursio Open Science, Science Gate, GFAR, CIARDRING, Academic Journals Database and NTHRYS Technologies, Portal de Periódicos CAPES.



Relações do uso de nitrogênio e atividade da redutase do nitrato por cultivares de cana-de-açúcar

Relationship of nitrogen use and nitrate reductase activity by sugarcane cultivars

C. L. R. Santos, J. O. Cazetta, L. M. Saran, M. F. Moraes, C. F. Silva.

UFMT - Campus Cuiabá
UNESP - Campus de Jaboticabal
UNESP - Campus de Jaboticabal
UFMT - Campus do Araguaia / Barra do Garças
UNIVAR - Barra do Garças

Author for correspondence: calersantos@gmail.com

Resumo: O potencial genético intrínseco de cada cultivar de cana-de-açúcar pode determinar a intensidade de absorção e assimilação de nitrogênio (N). É possível que ocorra uma menor expressão do potencial produtivo da cultura por limitações relacionadas à baixa atividade da redutase do nitrato (RN), pois esta enzima é “chave” do metabolismo de N. Os objetivos foram comparar cultivares de cana-de-açúcar quanto ao nível de atividade RN e estudar sua relação com variáveis produtivas e nutricionais. O experimento foi realizado sob condição de casa de vegetação, onde foram crescidas dez cultivares de cana-de-açúcar em vasos de 4 dm³, preenchidos com areia e vermiculita mais nutrientes conforme indicação para a cultura. As variáveis avaliadas foram: altura de plantas, atividade da RN, matéria seca (parte aérea e raiz), teor e acúmulo de N e eficiências de utilização e de absorção de N, além disso, se avaliou a correlação entre as variáveis. Os resultados mostraram que atividade da RN varia com a cultivar e ainda, que a atividade da RN em folhas de cana-de-açúcar não correlaciona com a eficiência de absorção de N, mas correlaciona positivamente com o teor de N e negativamente com a eficiência de utilização de N. A atividade da RN não é um bom parâmetro fisiológico para discriminar genótipos de cana-de-açúcar eficientes no uso de N.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., adubação nitrogenada, eficiência no uso de nitrogênio, variação genotípica.

Abstract: Intrinsic genetic potential of each cultivar of sugarcane may determine the absorption intensity and nitrogen assimilation. It is possible to occur a lower expression of the productive potential by limitations related to low nitrate reductase (NR) activity, since this enzyme is “key” of the N metabolism. The objectives were to compare cultivars of sugarcane as the level of NR activity and its relationship to productive and nutritional variables. The experiment was conducted under condition of a greenhouse, where were grown ten sugarcane cultivars in pots of 4 dm³, filled with sand and vermiculite plus nutrients as indicated for the crop. The variables evaluated were: plant height, NR activity, dry matter (shoot and roots), N content and N accumulation and N uptake and utilization efficiency, moreover, the correlation between the variables was evaluated. The results showed that NR activity varies with the cultivar and further, that NR activity in sugarcane leaves does not correlate with the N uptake efficiency, but is positively correlated with N content and negatively with N utilization efficiency. The NR activity is not a good physiological parameter to discriminate N efficient use sugarcane genotypes

Keywords: *Saccharum* spp., nitrogen fertilization, nitrogen use efficiency, genotypic variation.

Introdução

A cultura da cana-de-açúcar consome 20,7% do N-fertilizante aplicado em lavouras no Brasil (Heffer et al., 2017). Por questões econômicas e ambientais, alternativas que visem a redução desta percentagem sem comprometimento

da produtividade são desejáveis e seriam bem aceitas, mas o assunto é desafiador (Hirel et al., 2011). Adubações ineficientes podem acarretar sérios prejuízos econômicos, assim, a possível redução da adubação nitrogenada deve ser feita de forma cautelosa, pois muito se sabe a respeito das

funções do nitrogênio (N) na planta (Hawkesford et al., 2012) mas pouco é conhecido sobre fenômenos ligados a aquisição de N por plantas de cana-de-açúcar, necessitando assim, de esclarecimentos para a otimização do fornecimento via adubação.

Muitos estudos vêm sendo realizados para otimizar o aproveitamento de N por plantas de cana-de-açúcar. Os esforços têm sido voltados principalmente a otimização de práticas culturais, redução das perdas do adubo nitrogenado e interação com bactérias fixadoras de N (Soares et al., 2012; Urquiaga et al., 2012).

Outra forma viável seria a utilização de genótipos eficientes no uso de N, entretanto, dentre os caracteres considerados atualmente em programas de melhoramento genético no Brasil (Carvalho e Furtado, 2013), pouco tem se feito para melhorar a eficiência de uso de N, mas espera-se que em programas futuros para a seleção de cultivares, aspectos relacionados ao metabolismo sejam considerados.

O potencial genético intrínseco de cada genótipo de planta pode determinar a intensidade de absorção e assimilação de N, ou seja, sua eficiência de uso (Oliveira et al., 2013; Sedlář et al., 2013). Sendo possível que estas diferenças também ocorram entre cultivares de cana-de-açúcar, dada a sua variabilidade genética (Donato et al., 2004). A eficiência de uso do N é, no geral, uma integração da eficiência de absorção, ligada ao volume e atividade do sistema radicular e utilização de N que está ligada a capacidade da planta em converter N em biomassa (Xu et al., 2012). Assim, é pertinente e promissor estudar caracteres fisiológicos associados aos componentes da eficiência de uso de N.

Como a eficiência de utilização está diretamente associada ao processo assimilatório de N (Hirel et al., 2011; Andrews e Lea, 2013), é possível que ocorra, dentre outros fatores, menor expressão do potencial produtivo da cultura por limitações relacionadas à baixa atividade da redutase do nitrato (RN), pois esta enzima é “chave” na regulação do metabolismo do N, sendo sua atividade a principal limitante da redução de nitrato e consequente produção de biomassa em condições com contínuo suprimento de nitrato (Lillo, 2008; Mazid et al., 2012).

Alguns autores constataram diferenças do nível de atividade da RN (aRN) ao realizarem estudos comparativos de genótipos (Purcino et al., 1994; Jiang e Hull, 1998; Donato et al., 2004; Gupta et al., 2012). Em um trabalho com 14 cultivares da gramínea “Kentucky bluegrass”, Jiang e Hull (1998) observaram correlação negativa entre a aRN e componentes da eficiência de uso de N. Oliveira et al. (2013) em estudo com dez genótipos de milho observaram resultados semelhantes, assim, parece que a aRN nestas gramíneas não é um bom parâmetro fisiológico para discriminar genótipos eficientes no uso de N.

Contudo, estudos desta natureza pouco têm sido desenvolvidos com cana-de-açúcar. É possível que ocorra uma dependência interespecífica para aRN ser usada como parâmetro seletivo de genótipos eficientes. Neste sentido, o conhecimento a ser obtido com o estudo poderá direcionar melhoristas de cana-de-açúcar na escolha de genótipos para futuros estudos que envolvam avaliações fisiológicas relacionadas ao metabolismo do N. Assim, os objetivos foram comparar cultivares de cana-de-açúcar quanto ao nível de atividade da RN e estudar sua relação com variáveis produtivas e nutricionais.

Métodos

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP em Jaboticabal - SP entre os meses agosto e novembro de 2012.

Os tratamentos consistiram de 10 cultivares de cana-de-açúcar: PO88-62, SP80-3280, SP81-3250, RB72454, RB855156, RB867515, IAC87-3396, IACSP93-3046, IACSP95-3028, IACSP95-5000, comparadas quanto a variáveis enzimáticas, nutricionais e produtivas. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Cada parcela foi composta por uma planta de cana-de-açúcar, crescida por 75 dias em vaso plástico com 4 dm³ de mistura de areia não lavada (granulometria média) e vermiculita comercial, na proporção de 2:1 (v/v) respectivamente.

Para o fornecimento dos nutrientes, baseou-se nas indicações de Raij e Cantarella (1997). Incorporou-se o equivalente a 90 e 50 mg dm⁻³ de P₂O₅ e K₂O, que foi fornecida na forma de superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente. Ressalta-se que o N só foi aplicado posteriormente em dose única, e que o K₂O foi parcelado 2/3 no plantio (50 mg dm⁻³) e 1/3 em cobertura aos 30 dias, na forma de solução (25 mg dm⁻³).

As mudas utilizadas foram produzidas nos meses de julho e agosto de 2012 a partir de minitoletes de 5 cm de comprimento, que foram germinados em copos de 0,5 dm³ preenchidos com areia de granulometria média. Após 43 dias da germinação, as plantas consideradas uniformes foram transplantadas para os vasos definitivos.

Após o transplante, objetivando fornecer macronutrientes e micronutrientes às plantas, semanalmente fazia-se a aplicação via substrato de solução nutritiva (Hoagland e Arnon, 1950). Após 75 dias do transplante, as plantas apresentavam-se cloróticas sugerindo deficiência de nitrogênio. Foi feita, então, a aplicação, em todas as plantas, de solução de ureia contendo o equivalente a 100 kg ha⁻¹ de N, ou seja, 50 mg dm⁻³ de N na superfície do substrato.

A irrigação foi feita diariamente com base no método de pesagem dos vasos, procurou-se manter a umidade a 60% da capacidade de retenção de

água do solo. A cada 15 dias se fazia o rodízio dos vasos para evitar possíveis influências do ambiente, sendo mantida entre cada vaso, uma distância de cerca de 10 cm.

A coleta do experimento foi realizada a partir do 13º dia após a adubação com N, e foram realizadas em quatro dias, sendo cada bloco coletado em um dia devido a impossibilidade de se analisar a atividade da redutase do nitrato (aRN) em todo material no mesmo dia. Em cada dia de avaliação, a altura das plantas foi mensurada. Tomou-se como medida, o comprimento entre a superfície do substrato e o ponto de inserção da folha do tipo +1. As folhas do tipo 0 (zero) foram coletadas, sendo estas reservadas para a determinação da aRN. Em seguida, fez-se o corte basal das plantas. O material vegetal foi então lavado com solução detergente e enxaguado com água deionizada. As raízes foram separadas do substrato por lavagem em água corrente. O material vegetal foi seco em estufa (65 °C) e obtiveram-se, por pesagem, os valores de massa seca da parte aérea (MSPA) e de raiz (MSR). Em seguida, a parte aérea foi triturada para posterior determinação do teor de N (Teor de N) que foi realizada pelo método Kjeldahl descrito em Embrapa (2009).

A aRN foi determinada nas folhas de cana-de-açúcar usando o método previamente padronizado para a cultura, descrito em Santos et al. (2014), que consistiu na coleta da folha do tipo 0, às 13 horas, levando-as imediatamente para o laboratório, onde procedeu-se as análises. A folha analisada foi a do tipo 0. O tecido foliar sem a nervura foi cortado em seções de aproximadamente 0,5 cm e a amostra foi composta por 500 mg de tecido foliar. Todas as repetições foram analisadas em triplicatas. A aRN foi calculada e, expressa em $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$ de NO_2^- .

A partir dos dados de MSPA, MSR e de acúmulo de N na parte aérea (AcNPA), calculou-se dois dos índices nutricionais descrito em Prado (2008), onde empregou-se as relações a seguir para os cálculos: Eficiência de absorção (EAbN) = $\text{AcNPA (mg)} / \text{MSR (g)}$ e Eficiência de utilização (EUtN) = $\text{MSPA}^2 \text{ (g)} / \text{AcNPA (mg)}$.

Os dados obtidos foram submetidos à análise para a verificação da normalidade e homogeneidade com o auxílio do programa estatístico Sisvar e Saeg, respectivamente. Em seguida, procedeu-se à análise de variância pelo teste F. Quando significativo, as médias foram comparadas usando-se o teste de Skott-Knott a 5% de probabilidade, usando o programa estatístico Sisvar. Por fim, as variáveis foram avaliadas pela correlação de Pearson, no programa estatístico Saeg. Considerou-se correlação forte, valores de r (\pm) compreendidos entre 0,7 a 1, moderada 0,3 a 0,7 e fraca de 0 a 0,3.

Resultados e discussão

A cultivar de cana-de-açúcar que apresentou a maior atividade da redutase do nitrato

(aRN) nas folhas foi a IACSP95-3028. As que apresentaram níveis intermediários (SP81-3250 e IACSP95-5000) atingiram nível médio 26,5% inferior a esta cultivar (Tabela 1). As demais cultivares avaliadas apresentaram as menores atividades, sendo a média 42,1% inferior a de maior atividade.

Esta diferença entre os níveis de atividade da enzima pode estar relacionada a existência de variabilidade genotípica entre as cultivares, como observado por Donato et al. (2004) ao avaliarem a aRN de cinco cultivares de cana-de-açúcar. Também é possível que a variação do nível da enzima na planta possa estar associada a diferenças de regulação dos genes que sintetizam transportadores intercelulares de N, influenciando o fluxo de N absorvido (Gupta et al., 2012).

Quanto a altura, as cultivares RB855156 e SP80-3280 alcançaram média de 37,1 cm se destacando em relação às outras (Tabela 1). Notou-se que as que menos cresceram foram as RB867515, IACSP95-5000, IAC87-3396 e IACSP93-3046 com média 32,75% menor. As demais cultivares apresentaram crescimento intermediário. As cultivares RB855156, SP80-3280 e RB72454 foram as que mais acumularam massa seca na parte aérea (MSPA), atingindo valor médio de 7,88 g. As que menos acumularam foram as cultivares IACSP93-3046, IACSP95-3028, IAC87-3396 e PO88-62, com média 37,82% menor (Tabela 1). Incrementos intermediários foram observados nas demais cultivares avaliadas. As cultivares que mais acumularam massa seca de raiz (MSR) foram as SP80-3280 e a RB72454, com valor médio de 3,12 g. Os menores valores de MSR foram observados nas cultivares PO88-62, IACSP95-5000, IACSP95-3028 e IAC87-3396, com média 44,55% inferior (Tabela 1). As demais acumularam MSR em proporções intermediárias.

Comumente, quando se compara diferentes genótipos de cana-de-açúcar, diferenças entre parâmetros biométricos ou produtivos são observadas, e de modo geral estão ligadas as variações genéticas intrínsecas de cada cultivar (Donato et al., 2003; Ishikawa et al., 2009). Cada genótipo apresenta um potencial genético peculiar que pode determinar uma maior facilidade, ou não, na aquisição de N e, este potencial está ligado basicamente a capacidade da planta absorver e/ou assimilar N (Xu et al., 2012).

Sabe-se que a RN é a enzima “chave” na regulação do metabolismo do nitrogênio, sendo sua atividade a principal limitante da redução assimilatória do nitrato (Mazid et al., 2012), portanto, esperava-se que quanto mais alta estivesse a atividade desta enzima, maior também seria a capacidade da planta ser eficiente em usar o N e consequentemente produzir biomassa. Em estudo com cana-de-açúcar Donato et al. (2004) relataram que a cultivar que apresentou a maior matéria fresca foi também a que mostrou a maior aRN. Mas isso não aconteceu no presente trabalho (Tabela 1), observou-se que a cultivar que apresentou a maior

atividade em relação as demais apresentou MSPA e acúmulo de N menor (Tabelas 1 e 2), mas também foi uma das que tiveram o maior teor de N na matéria seca. Por outro lado, a cultivar que se destacou em relação aos parâmetros biométricos ou produtivos avaliados foi a SP80-3280, contudo observou-se que a mesma foi uma das que menos apresentou atividade da RN e maior acúmulo de N na parte aérea (Tabela 2).

Estes resultados sugerem que a cultivar SP80-3280 estava com baixa atividade da RN devido provavelmente ter ocorrido inicialmente um intenso uso do substrato nitrato pelas enzimas, sendo possível, que neste genótipo, um alto nível de atividade tenha ocorrido antes dos demais, o que explicaria o maior acúmulo de N (Tabela 2). A atividade então pode ter diminuído, pois algum mecanismo pode ter desencadeado a redução da atividade, ou seja, a planta “detectou” que já estava suficientemente nutrida por N. Um mecanismo possível é a inibição da atividade da enzima pelo acúmulo de aminoácido (Crawford et al., 2000).

No caso da cultivar IACSP95-3028, que apresentou a maior atividade da RN, pode ser que

quantidade de nitrato absorvida até então em comparação aos outros genótipos, tenha sido suficiente para estimular a síntese de RN, mas não para ser usado como substrato. Segundo Souza et al. (2002) ocorre a existência de dois reservatórios de nitrato na célula, cujo um deles, é de rápida duração e está ligado à regulação da síntese da enzima, e o outro, de existência mais longa, ligado ao suprimento de substrato.

É possível que a velocidade de absorção de N deste genótipo tenha sido mais lenta que a dos outros, isto devido ao baixo acúmulo de N observado (Tabela 2). Em plantas de milho, por exemplo, os híbridos modernos são mais produtivos porque têm maiores capacidades de absorção (maiores V_{max}) e assimilação de N, mas, são mais exigentes em adubação nitrogenada que os genótipos antigos por causa da perda de afinidade do sistema de transporte (maiores Km) (Purcino et al., 1994), não significando assim que a atividade da enzima RN, que está ligada a assimilação de N, seria o fator limitante da aquisição de N.

Tabela 1. Atividade da redutase do nitrato e parâmetros produtivos de dez cultivares de cana-de-açúcar crescidas sob condições de casa de vegetação.

Cultivares	aRN	Altura	MSPA	MSR
SP81-3250	1,40 b	29,13 c	5,68 b	2,42 b
PO88-62	1,06 c	27,00 c	4,97 c	1,61 c
RB855156	1,16 c	37,00 a	7,24 a	2,33 b
IACSP95-5000	1,29 b	25,38 d	5,87 b	1,81 c
SP80-3280	1,04 c	37,25 a	7,98 a	3,11 a
RB72454	0,96 c	34,00 b	8,19 a	3,13 a
IACSP93-3046	1,09 c	24,13 d	4,92 c	2,02 b
IACSP95-3028	1,83 a	28,63 c	5,10 c	1,82 c
RB867515	0,97 c	26,00 d	5,88 b	2,15 b
IAC87-3396	1,16 c	24,38 d	4,62 c	1,68 c
Média	1,20	29,30	6,04	2,21
Erro padrão	0,07	0,89	0,34	0,19
F	12,78***	31,76***	14,80***	8,35***
C.V. (%)	12,27	6,09	11,23	17,19

aRN = atividade da redutase do nitrato; MSPA = massa seca de parte aérea; MSR = massa seca de raiz; F = nível de significância da análise de variância calculada; *** = significativo a $p < 0,001$ pelo teste F; Valores seguidos de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott ($p < 0,05$)

As cultivares que apresentaram os maiores teores de N nos tecidos da parte aérea foram as IAC87-3396 e IACSP95-3028 ($12,75 \text{ g kg}^{-1}$). Teores intermediários foram observados ao avaliar as cultivares IACSP93-3046, SP81-3250, PO88-62 e RB855156 (teor médio de $12,01 \text{ g kg}^{-1}$). Os menores teores de N foram observados nas cultivares IACSP95-3028, IACSP95-5000, SP80-3280, RB72454 e RB867515, cuja média foi de $11,27 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 2).

As cultivares RB72454, SP80-3280 e RB855156 foram as que mais acumularam N na parte aérea. O acúmulo médio foi quase 30% superior ao observado nas demais cultivares

(Tabela 2), o que indica alta exigência destas cultivares a N. Estes genótipos foram capazes de extrair do meio de cultivo 45,02% do N-fertilizante aplicado. Entretanto, é possível que parte deste N acumulado tenha sido proveniente do próprio tolete ou fixação biológica de N, factível de ocorrer em plantas de cana-de-açúcar (Urquiaga et al., 2012). Mas de modo geral, nota-se altas respostas produtivas a N. Além da parte aérea, estas cultivares foram umas das que mais incrementaram raiz e também, as que atingiram maiores alturas (Tabela 1), entretanto, foram umas das que apresentaram menores atividades da RN (Tabela 1). O que sugere novamente que uma atividade

máxima da RN já tenha ocorrido em comparação aos outros genótipos, possibilitado a maior aquisição de N seguida do incremento de biomassa.

As cultivares que apresentaram maiores capacidades de converter em biomassa o N absorvido (EUtN) foram as RB72454 e SP80-3280, que utilizaram em média 0,71 g de N para produzir 1 mg de biomassa seca. A cultivar RB855156 foi a segunda que mais apresentou a capacidade de utilizar N para a produção de biomassa (0,61 g mg⁻¹) (Tabela 2). As cultivares que apresentaram menores EUtN foram as IACSP95-3028, PO88-62, IAC87-3396 e IACSP93-3046, com média de 0,4 g mg⁻¹. As demais cultivares (SP81-3250, IACSP95-5000 e RB867515) apresentaram valor médio de 0,51 g mg⁻¹.

Em estudo com cultivares da gramínea "Kentucky bluegrass", Jiang et al. (2000) também observaram que a EUtN variou em função do genótipo avaliado. Os mecanismos fisiológicos associados com a EUtN são principalmente a atividade de enzimas do metabolismo do nitrogênio, que segundo revisão de Xu et al. (2012) pode ser a etapa limitante do potencial de assimilação de nitrogênio e consequente produtividade (Xu et al., 2012). Contudo, Bredemeier e Mundstock (2000), comentam que o metabolismo do N é multi-regulado e integrado ao metabolismo geral da planta, e ainda, que é complexa a identificação de pontos metabólicos específicos limitantes para o incremento da produtividade.

Talvez por isso, no presente trabalho, a maior atividade da RN (Tabela 1) não tenha sido observada no genótipo mais eficiente em utilizar N (Tabela 2), além de que, é possível que uma cultivar tenha apresentado maior dependência da RN que outra para acumular N devido aos toletes das

mudas terem sido provenientes de plantas com idades desconhecidas, mas provavelmente diferentes. Portanto, a taxa e a quantidade de N absorvida e assimilada durante o ciclo dependem além da presença de carregadores específicos e da atividade das enzimas, de outros fatores, que podem estar ligados à disponibilidade de energia para os processos e mesmo ao estágio de desenvolvimento da planta (Bredemeier e Mundstock, 2000), fatores estes que podem se diferenciar dependendo do genótipo.

As cultivares avaliadas não diferiram entre si quanto à EAbN apresentando eficiência média de 34,41 mg g⁻¹ (Tabela 2). Ou seja, cada grama de raiz transloucou 34,41 mg de N para a parte aérea. Segundo Xu et al. (2012) a EAbN é um dos componentes mais críticos da aquisição de N por plantas e está ligada ao volume, comprimento e atividade do sistema radicular. A não observação de diferença entre as cultivares nesta variável demonstra a igual capacidade das raízes em extrair N do meio de cultivo. Considerando que houve a existência de três grupos de respostas ao incremento de MSR dentre as cultivares avaliadas (Tabela 1), é possível deduzir que o influxo de N foi por mecanismos diferentes, mas provavelmente compensatórios.

Tanto no estudo de Gupta et al. (2012), como no de Sedlář et al. (2013) com cultivares de capim pé de galinha e cevada, respectivamente, foram observadas diferenças na EAbN e EUtN entre as cultivares dentro de cada espécie, sugerindo assim que existe uma dependência genotípica para o uso de N.

Tabela 2. Parâmetros da nutrição nitrogenada de dez cultivares de cana-de-açúcar crescidas sob condições de casa de vegetação.

Cultivares	Teor de N	AcNPA	EUtN	EAbN
SP81-3250	12,08 b	68,46 b	0,47 c	28,33 a
PO88-62	12,14 b	60,06 b	0,41 d	38,20 a
RB855156	11,91 b	86,50 a	0,61 b	37,21 a
IACSP95-5000	11,31 c	66,36 b	0,52 c	37,43 a
SP80-3280	11,54 c	91,98 a	0,69 a	30,00 a
RB72454	11,22 c	91,67 a	0,73 a	29,59 a
IACSP93-3046	11,89 b	58,35 b	0,42 d	29,80 a
IACSP95-3028	12,59 a	64,14 b	0,41 d	35,49 a
RB867515	11,00 c	64,70 b	0,53 c	30,62 a
IAC87-3396	12,90 a	59,67 b	0,36 d	37,39 a
Média	11,87	71,19	0,52	33,41
Erro padrão	0,26	4,01	0,03	3,03
F	5,60 ^{***}	11,28 ^{***}	14,59 ^{**}	1,78 ^{ns}
C.V. (%)	4,32	11,26	13,02	18,12

AcNPA = acúmulo de N na parte aérea; EUtN = eficiência de utilização de N; EAbN = Eficiência de absorção de N; F = nível de significância da análise de variância calculada; ^{ns}, ^{***} e ^{**}, = não significativo, significativo a p<0,001 e 0,01; Valores seguidos de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Skott-Knott a 5% de probabilidade, respectivamente

Quanto as relações entre as possíveis combinações binárias das variáveis aRN, Altura, MSPA, MSR, Teor de N, AcNPA, EUtN e EAbN, os resultados apontaram a ausência de correlação entre a maioria (Tabela 3) mas, correlações significativas importantes também foram observadas, indicando estatisticamente a interdependência de algumas variáveis.

A aRN apresentou correlação com a EUtN (moderada e negativa). Resultados semelhantes foram observados por Jiang e Hull (1998), Oliveira et al. (2013) e Gupta et al. (2012) ao estudarem a gramínea "Kentucky bluegrass", milho e capim pé de galinha, respectivamente. A aRN também correlacionou com a MSPA (fraca e negativa). Esperava-se que aRN se associasse positivamente com estas variáveis. Isto devido ao papel regulador da disponibilidade de N reduzido para o metabolismo das plantas, como ocorreu em estudos com plantas de café e capim Mombaça (Reis et al., 2007; Lavres Junior et al., 2010).

As direções negativas observadas no presente estudo podem estar ligada às diferenças genótípicas entre as cultivares, o que corrobora os resultados de Purcino et al. (1994), que observaram que os aumentos de produtividade de milho, causados pela adubação nitrogenada, não foram acompanhados por aumentos na atividade da RN, o que foi atribuído as diferenças genótípicas.

No estudo de Oliveira et al. (2013) com plantas de milho os autores concluíram que a atividade da RN não é um bom parâmetro fisiológico para discriminar genótipos de milho eficientes no uso de nitrogênio, o que pode ser inferido também neste estudo com cana-de-açúcar.

A relação da aRN com o Teor de N foi do tipo moderada e positiva. Reis et al. (2007), também fizeram estas observação, no caso, a atividade da enzima correlacionou positivamente com o teor de N foliar ($R = 0,96$).

Correlações moderadas e negativas foram observadas entre o Teor de N e as variáveis MSPA e a MSR, contrariando os achados de Prado e Pancelli (2008) que observaram relação positiva do teor foliar de N e a produtividade de biomassa aos quatro meses após o corte de cana-de-açúcar. A direção oposta da correlação observada no atual estudo, em comparação aos de Prado e Pancelli (2008), pode estar associada as diferenças genéticas entre as cultivares, uma vez que estes autores estudaram um único genótipo.

Por outro lado, correlações fortes e positivas foram notadas entre a altura e as variáveis MSPA e AcNPA. A MSR correlacionou-se positivamente (graus fortes) com a MSPA e o AcNPA, e, em grau moderado com a altura. Tais resultados são contrastantes com aqueles obtidos por Ishikawa et al. (2009), que observaram baixa associação entre o teor de N com o acúmulo de N. No mesmo trabalho, notou-se no segundo ano, correlação negativa ($R = -0,47$) entre a produção de biomassa e o teor de N foliar.

Observou-se ainda, correlação moderada negativa da EAbN com a MSR (Tabela 3). No presente estudo, a EUtN se correlacionou negativamente com o Teor de N (em grau moderado). Em plantas da gramínea "Kentucky bluegrass", a EUtN correlacionou-se negativamente com o teor de NO_3^- nos tecidos (Jiang e Hull, 1998). A EUtN se associou também com a altura de plantas, MSPA, MSR e AcNPA (direção positiva e com grau forte). Resultados semelhantes foram observados por Sedlář et al. (2013) ao avaliarem a relação da EUtN com a produção de grãos de cevada. A relação benéfica entre o N assimilado e parâmetros produtivos ocorreu devido ao conhecido papel do N como nutriente essencial na produção de biomassa (Hawkesford et al., 2012).

Tabela 3 - Coeficientes de correlação (R), e suas significâncias, entre as variáveis avaliadas em dez cultivares de cana-de-açúcar cultivadas em casa de vegetação.

Variáveis	Altura	MSPA	MSR	Teor de N	AcNPA	EUtN	EAbN
aRN	-0,10 ^{ns}	-0,31 [*]	-0,23 ^{ns}	0,47 ^{**}	-0,20 ^{ns}	-0,38 [*]	0,06 ^{ns}
Altura	1,00	0,81 ^{**}	0,66 ^{**}	-0,21 ^{ns}	0,83 ^{**}	0,75 ^{**}	-0,07 ^{ns}
MSPA		1,00	0,79 ^{**}	-0,48 [*]	0,97 ^{**}	0,98 ^{**}	-0,08 ^{ns}
MSR			1,00	-0,35 [*]	0,76 ^{**}	0,78 ^{**}	-0,64 ^{**}
Teor de N				1,00	-0,24 ^{ns}	-0,64 ^{**}	0,23 ^{ns}
AcNPA					1,00	0,89 ^{**}	-0,01 ^{ns}
EUtN						1,00	-0,14 ^{ns}
EAbN							1,00

aRN = atividade da redutase do nitrato; MSPA = massa seca de parte aérea; MSR = massa seca de raiz; AcNPA = acúmulo de N na parte aérea; EUtN = eficiência de utilização de N; EAbN = Eficiência de absorção de N; ^{ns}, ^{**} e ^{*} = não significativo e significativo aos níveis de 1 e 5% de probabilidade pelo teste t, respectivamente

Conclusões

A estimativa da atividade da enzima redutase do nitrato varia com a cultivar de cana-de-açúcar.

Em condições controladas, independente da cultivar de cana-de-açúcar, a atividade da redutase do nitrato correlaciona positivamente com o teor de nitrogênio na parte aérea e negativamente com a eficiência de utilização de nitrogênio.

A atividade da redutase do nitrato não correlaciona com a eficiência de absorção de nitrogênio.

A atividade da redutase do nitrato não é um bom parâmetro fisiológico para discriminar genótipos de cana-de-açúcar eficientes no uso de nitrogênio.

Agradecimentos

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão de bolsa, a Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA) pelo fornecimento do material propagativo e ao curso de Pós-Graduação em Agronomia-Ciência do Solo da UNESP, campus Jaboticabal pelo aporte.

Referências

Andrews, M.; Lea, P. J. Our nitrogen 'footprint': the need for increased crop nitrogen use efficiency. *Annals of Applied Biology*, v. 163, n. 2, p. 165-169, 2013.

Bredemeier, C.; Mundstock, C. M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. *Ciência Rural*, v. 30, n. 2, p. 365-372, 2000.

Carvalho, S. A. D.; Furtado, A. T. O melhoramento genético de cana-de-açúcar no Brasil e o desafio das mudanças climáticas globais. *Revista Gestão & Conexões = Management and Connections Journal*, v. 2, n. 1, p. 22-46, 2013.

Crawford, N. M.; Kahn, M. L.; Leustek, T.; Long, S. R. Nitrogen and sulfur. In: Buchanan, W.; Gruissem, R. Jones, R. (Eds.) *Biochemistry e Molecular Biology of Plants*. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. p. 786-849.

Donato, V. M. T. S.; Andrade, A. G.; Souza, E. S.; França, J. G. E.; Maciel, G. A. Atividade enzimática em variedades de cana-de-açúcar cultivadas in vitro sob diferentes níveis de nitrogênio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, n. 11, p. 1087-1093, 2004.

Donato, V. M. T. S.; Andrade, A. G.; Souza, E. S.; França, J. G. E. Metabolismo de plantas de cana-de-açúcar cultivadas in vitro sob diferentes concentrações de nitrogênio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 38, n. 12, p. 1373-1379, 2003.

Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p. Embrapa,

Gupta, N.; Gupta, A. K.; Gaur, V. S.; Kumar, A. Relationship of nitrogen use efficiency with the activities of enzymes involved in nitrogen uptake and assimilation of finger millet genotypes grown under different nitrogen inputs. *The Scientific World Journal*, 2012. Disponível em: Doi:10.1100/2012/625731. Acesso em: jan. 19.

Hawkesford, M.; Horst, W.; Kichey, T.; Lambers, H.; Schjoerring, J.; Møller, I. S.; White, P. Functions of macronutrients. In: Marschner, P. (Ed.) *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012. p. 135-189.

Heffer, P.; Gruère, A.; Roberts, T. Assessment of fertilizer use by crop at the global level 2014-2014/15. Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2017. 18 p.

Hirel, B.; Tétu, T.; Lea, P. J.; Dubois, F. Improving nitrogen use efficiency in crops for sustainable agriculture. *Sustainability*, v. 3, n. 9, p. 1452-1485, 2011.

Hoagland, D. R.; Arnon, D. I. The water culture method for growing plants without soils. Berkeley: California Agricultural Experimental Station, 1950. 32 p.

Ishikawa, S.; Ando, S.; Sakaigaichi, T.; Terajima, Y.; Matsuoka, M. Effects of high nitrogen application on the dry matter yield, nitrogen content and nitrate-N concentration of sugarcane. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 55, n. 4, p. 485-495, 2009.

Jiang, Z.; Hull, R. J. Interrelationship of nitrate uptake, nitrate reductase and nitrogen use efficiency in selected Kentucky bluegrass cultivars. *Crop Science*, v. 38, n. 6, p. 1623-1632, 1998.

Jiang, Z.; Sullivan, W. M.; Hull, R. J. Nitrate uptake and nitrogen use efficiency by Kentucky bluegrass cultivars. *Hortscience*, v. 35, n. 7, p. 1350-1354, 2000.

Lavres Junior, J.; Santos Junior, J. D. G.; Monteiro, F. A. Nitrate reductase activity and spad readings in leaf tissues of guinea grass submitted to nitrogen and potassium rates. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 3, p. 801-809, 2010.

Lillo, C. Signalling cascades integrating light-enhanced nitrate metabolism. *Biochemical Journal*, v. 415, n. 1, p. 11-19, 2008.

- Mazid, M.; Khan, T. A.; Mohammad, F. Role of nitrate reductase in nitrogen fixation under photosynthetic regulation. *World Journal of Pharmaceutical Research*, v. 1, n. 3, p. 386-414, 2012.
- Oliveira, L. R.; Miranda, G. L.; Lima, R. O.; Fritsche-Neto, R.; Galvão, J. C. C. Eficiência na absorção e utilização de nitrogênio e atividade enzimática em genótipos de milho. *Revista Ciência Agronômica*, v. 44, n. 3, p. 614-621, 2013.
- Prado, R. M. *Nutrição de plantas*, São Paulo: Editora Unesp, 2008.
- Prado, R. M.; Pancelli, M. A. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. *Bragantia*, v. 67, n. 4, p. 951-959, 2008.
- Purcino, A. A. C.; Magnavaca, R.; Machado, A. T. Marriel, I. E. Atividade da redutase do nitrato em genótipos antigos e modernos de milho, cultivados sob dois níveis de nitrogênio. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v. 6, n. 1, p. 41-46, 1994.
- Raij, B. van.; Cantarella, H. Outras culturas industriais. In: *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. RAIJ, B. van.; Cantarella, H., Quaggio, J. A., Furlani, A. M. C. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. p.231-244. (Boletim Técnico, 100).
- Reis, A. R.; Furlani Junior, E.; Haga, K. I. Atividade da redutase do nitrato em folhas de cafeeiro em função da adubação nitrogenada. *Acta Scientiarum Agronomy*, v. 29, n. 2, p. 269-276, 2007.
- Santos, C. L. R.; Cazetta, J. O.; Saran, L. M.; Sanches, A. Otimização da análise da atividade da redutase do nitrato e sua caracterização em folhas de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, n. 5, p. 384-394, 2014.
- Sedlář, O.; Balík, J.; Černý, J.; Peklová, L.; Kubešová, K. Dynamics of the nitrogen uptake by spring barley at injection application of nitrogen fertilizers. *Plant, Soil and Environment*, v. 59, n. 9, p. 392-397, 2013.
- Soares, J. R.; Cantarella, H.; Menegale, M. L. C. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 52, n. 4, p. 82-89, 2012.
- Souza, S. R.; Stark, E. M. L. M.; Fernandes, M. S. *Enzimas de assimilação de nitrogênio em plantas*. 1. ed. Rio de Janeiro: Artware Projetos Culturais, 2002.
- Urquiaga, S.; Xavier, R. P.; Morais, R. F.; Batista, R. B.; Schultz, N.; Leite, J. M.; Sá, J. M.; Barbosa, K. P.; Resende, A. S.; Alves, B. J. R.; Boddey, R. M. Evidence from field nitrogen balance and ¹⁵N natural abundance data for the contribution of biological N₂ fixation to Brazilian sugarcane varieties. *Plant and Soil*, v. 356, n. 1-2, p. 5-21, 2012.
- Xu, G., Fan, X., Miller, A. J. Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, v. 63, n. 1, p. 153-182, 2012.