Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Uso do nitrogênio pela cana-de-açúcar em função da rotação com crotalária,
remoção de palha e doses de N

Saulo Augusto Quassi de Castro

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2017

Saulo Augusto Quassi de Castro
Engenheiro Agrônomo

Uso do nitrogênio pela cana-de-açúcar em função da rotação com crotalária, remoção de
palha e doses de N

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **RAFAEL OTTO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

Piracicaba
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Castro, Saulo Augusto Quassi de

Uso do nitrogênio pela cana-de-açúcar em função da rotação com crotalária, remoção de palha e doses de N / Saulo Augusto Quassi de Castro. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

108 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. *Crotalaria spectabilis* 2. *Saccharum* spp 3. Eficiência da adubação nitrogenada 4. Recuperação do nitrogênio 5. Adubo verde 6. Plantio direto I. Título.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Sérgio Donizeti de Castro e Solange Meire Quassi de Castro por me educarem na fé cristã e por sempre me darem apoio, incentivo e conselhos para que eu pudesse superar as dificuldades e obstáculos, permitindo que eu conquistasse mais essa etapa;

Ao meu irmão Sérgio Gustavo Quassi de Castro pela motivação, discussões e troca de ideias ao longo de mais essa caminhada e pela nossa união e momentos de alegria que passamos juntos todos esses anos;

A minha noiva Renata Rebellato Linhares pela paciência, amor e compreensão que teve e vem tendo comigo na busca de mais esse sonho, permanecendo sempre ao meu lado me motivando e me aconselhando.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus pelo dom da vida, pela minha família, pela sabedoria, pela saúde e pelos amigos que me concedeu ao longo do tempo, proporcionando motivos para sonhar e alçar voos maiores.

A Nossa Senhora Aparecida pela devoção e por ser o amparo nos momentos de dificuldade, fazendo com que pudesse superar as barreiras e as dificuldades durante a busca desse sonho.

A família Quassi e a família Castro pelos ensinamentos, pela motivação e entusiasmo ao me ver superando as dificuldades e alcançando os objetivos, e pelos diversos momentos de descontração e união que me fizeram entender o real sentido da palavra família.

A família Rebellato Linhares pelo carinho que sempre tiveram comigo, por me acolherem e confiarem no meu potencial, permitindo crescer e evoluir a cada dia.

Ao professor Dr. Rafael Otto pela orientação, por ter acreditado no meu trabalho e nos meus conhecimentos, permitindo que eu conduzisse esse experimento e o auxiliasse nas diversas atividades do projeto FAPESP 2014/05591-0.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ-USP) pela excelência de ensino e infraestrutura, e em especial ao Departamento de Ciência do Solo, o qual através do PPG em Solos e Nutrição de Plantas permitiu que eu concluísse mais uma etapa dentro dessa casa.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de estudo (Processo nº 2015/25151-7).

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida no início do mestrado.

Ao Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) pela parceria na realização das atividades de campo.

A Usina Boa Vista (Grupo Nova Fronteira) pela área disponibilizada e pelos colaboradores que nos auxiliaram durante as avaliações, os quais foram de grande importância no experimento, executando as atividades com paciência e cuidado.

Ao professor Dr. Paulo César Ocheuze Trivelin pelo auxílio nas análises laboratoriais, pelas discussões dos dados e ensinamentos transmitidos, proporcionando aprendizado e crescimento profissional.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura – Laboratório de Isótopos Estáveis (LIE-CENA) pela colaboração em obter o fertilizante enriquecido em ^{15}N , pelo espaço cedido para processamento de amostras e pela equipe disponibilizada nessa atividade.

Aos colegas de pós-graduação responsáveis pelo projeto FAPESP, Camilo E. Bohórquez S. e Sarah Tenelli, pela colaboração no campo, pelas discussões sobre o trabalho executado e pelo crescimento pessoal, com certeza as viagens para Goiás ficaram mais divertidas e menos cansativas com nosso companheirismo e amizade.

A professora Renata S. Alcarde pelo auxílio na análise estatística do experimento.

Aos colegas que se disponibilizaram em me auxiliar no trabalho de campo, Felipe C. de Brito, Leandro C. Barbosa, Eduardo Zavaschi, Filipe T. Barnabé, Leandro Carolino, Acácio B. de Mira, Alessandra Rigoto, Bianca A. Machado, Kaue T. Nardi, Gabrieli Camargo e Paula A. Ortega, pelo companheirismo, paciência, amizade e força de vontade.

Aos colegas de Pós-Graduação Eduardo Mariano, Beatriz N. Boschiero, Mariane Chiapini, Hugo A. G. Villalba, Thales M. S. Sattolo, Rafaela A. Migliavacca, Lílian A. Moreira, Edson Mota, pela amizade, momentos de descontração e pelas discussões que nos fizeram crescer e aprender juntos.

A equipe do LIE-CENA Hugo H. Batagello, Ana Paula G. de M. Duarte, Miguel Luiz Baldessin, Elis D. da Silva, Henrique C. Mendes, Catherine M. Zulian, Maick G. Meireles e Gustavo J. Soares, pelo auxílio nas atividades laboratoriais, ensinamentos e amizade compartilhados.

As bibliotecárias Eliana M. Garcia e Silvia M. Zinsly pelo trabalho que executam e por como o executam, sempre entusiasmadas, felizes e dispostas a auxiliar os estudantes.

Aos colegas, funcionários e professores de Pós-graduação da ESALQ-USP que convivi durante o período de 2015 a 2017.

A professora e amiga Lise Papineau pelo auxílio nas traduções e ensinamentos, além dos momentos de alegria e risada.

A Silvia H. Carvalho pelo auxílio na administração das viagens e relatórios financeiros do projeto FAPESP, além da amizade e momentos de descontração.

Ao Grupo de Apoio à Pesquisa e Extensão (GAPE) pelo empréstimo da camionete e dos materiais utilizados no campo.

A todos aqueles que me auxiliaram direta ou indiretamente nessa etapa de grande crescimento pessoal e profissional, citados ou não aqui, meu muito obrigado!

“Nada no mundo consegue tomar o lugar da persistência.

O talento não consegue; nada é mais comum que homens fracassados com talento.

A genialidade não consegue; gênios não recompensados é quase um provérbio.

A educação não consegue; o mundo é cheio de errantes educados.

A persistência e determinação sozinhas são onipotentes.”

Calvin Coolidge

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	10
1. INTRODUÇÃO.....	11
Referências.....	14
2. RECUPERAÇÃO DO NITROGÊNIO PELA 2ª SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DE CULTURA.....	17
RESUMO.....	17
ABSTRACT.....	17
2.1. INTRODUÇÃO	18
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
2.2.1. Caracterização da área	20
2.2.2. Instalação do experimento	21
2.2.3. Avaliações	24
2.2.3.1. Produtividade e Atributos Tecnológicos	24
2.2.3.2. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante pela planta (RNP)	25
2.2.3.3. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante na palha (RNPa)	27
2.2.3.4. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante no solo (RNS)	28
2.2.4. Análise estatística	30
2.3. RESULTADOS	30
2.3.1. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante pela cana-de-açúcar (RNP)	30
2.3.2. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante na palha (RNPa)	35
2.3.3. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante no solo (RNS)	38
2.3.4. Balanço do ¹⁵ N-fertilizante no sistema solo-planta-palha	42
2.3.5. Atributos tecnológicos da cana-de-açúcar	44
2.4. DISCUSSÃO	46
2.4.1. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante pela cana-de-açúcar (RNP)	46
2.4.2. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante na palha (RNPa)	48
2.4.3. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante no solo (RNS)	50
2.4.4. Balanço do ¹⁵ N-fertilizante no sistema solo-planta-palha	51
2.4.5. Análise tecnológica dos colmos.....	51
2.5. CONCLUSÕES	52

Referências.....	53
3. A PALHA DA CANA-DE-AÇÚCAR AFETA A RECUPERAÇÃO DO NITROGÊNIO PROVENIENTE DO FERTILIZANTE?.....	59
RESUMO	59
ABSTRACT	59
3.1. INTRODUÇÃO.....	60
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	61
3.2.1. Caracterização da área	61
3.2.2. Instalação do experimento	62
3.2.3. Avaliações	65
3.2.3.1. Produtividade e atributos tecnológicos	65
3.2.3.2. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante pela planta (RNP)	66
3.2.3.3. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante na palha (RNPa)	68
3.2.3.4. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante no solo (RNS)	69
3.2.4. Análise estatística	70
3.3. RESULTADOS.....	71
3.3.1. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante ao longo do ciclo	71
3.3.2. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante pela planta no final do ciclo	76
3.3.3. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante na palha (RNPa)	80
3.3.4. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante no solo (RNS)	83
3.3.5. Balanço do ¹⁵ N-fertilizante no sistema solo-planta-palha	88
3.3.6. Atributos tecnológicos do colmo da cana-de-açúcar	90
3.4. DISCUSSÃO.....	92
3.4.1. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante pela planta ao longo do ciclo	92
3.4.2. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante pela planta no final do ciclo	93
3.4.3. Recuperação do ¹⁵ N-fertilizante no solo (RNS) e na palha (RNPa)	94
3.4.4. Atributos tecnológicos dos colmos da cana-de-açúcar	95
3.5. CONCLUSÕES.....	96
Referências.....	97
ANEXOS.....	103

RESUMO

Uso do nitrogênio pela cana-de-açúcar em função da rotação com crotalária, remoção de palha e doses de N

O Brasil é o país que possui o maior potencial de crescimento na produção de etanol, podendo esse aumento ser através do incremento na produtividade da cana-de-açúcar ou a partir do uso dos resíduos vegetais, etanol de segunda geração. A recuperação do nitrogênio proveniente do fertilizante pela planta (RNP-fertilizante) é baixa, sendo questionado a importância desse no sistema de colheita sem queima associado à rotação de cultura. Dessa maneira, muito se questiona sobre a possibilidade de redução da dose de N-fertilizante e de remoção da palha do campo no atual sistema de manejo da cana-de-açúcar. Experimentos de campo foram desenvolvidos com os seguintes objetivos: avaliar a RNP-fertilizante, a dinâmica desse nutriente e a resposta da segunda soqueira de cana-de-açúcar às doses de N-fertilizante; e avaliar a RNP-fertilizante, a imobilização do N no solo (RNS) e na palha (RNPa) e os parâmetros produtivos da cana-de-açúcar ao longo do ciclo, na mesma dose de nitrato de amônio, com remoção parcial ou total ou manutenção total da palha em área com e sem plantio de *Crotalaria spectabilis* sob sistema de plantio direto. O plantio da crotalária na renovação do canavial apresentou pequena influência na segunda soqueira da cana-de-açúcar em sistema de plantio direto. Nos parâmetros produtivos e tecnológicos não houve alteração na produção de açúcar e de colmos, aumentou-se a RNP-fertilizante quando associada à remoção total da palha, não houve interferência na imobilização do N-fertilizante na palha e diminuiu-se a imobilização desse no solo ao final do ciclo. As quantidades de palha deixada sobre o solo também não modificaram os atributos tecnológicos, contudo a presença desse resíduo vegetal favoreceu a produtividade de colmos. A RNP-fertilizante no início da rebrota da cana foi beneficiada pela presença da palha em ambas as áreas a qual não se manteve até a colheita devido à condição climática e aos benefícios do plantio direto. Os resultados indicaram que pode-se reduzir a dose de nitrogênio a fim de aumentar a RNP-fertilizante, não havendo influência da rotação de cultura, e que a palha proporciona diversos benefícios à cultura, como aumento da RNP-fertilizante no início do ciclo na segunda soqueira da cana-de-açúcar, tornando a remoção desse resíduo vegetal inviável.

Palavras-chave: *Crotalaria spectabilis*; *Saccharum* spp; Eficiência da adubação nitrogenada; Recuperação do nitrogênio; Adubo verde; Plantio direto

ABSTRACT

Nitrogen fertilizer in sugarcane due to sunn hemp, straw removal and nitrogen rates

Brazil is the country that has the greatest increase potential in ethanol production, which may be achieved through a rise in the sugarcane yield or from the use of the plant residue's waste to produce second generation ethanol. The recovery of the nitrogen from the fertilizer by the plant (NPR-fertilizer) is low when questioning the importance of this in the new sugarcane system (green cane trash blanket) associated with crop rotation. In this case, there are a lot of questions about the possibility of reducing the fertilizer-N rate and about the straw removal from the field in the current management system of sugarcane. Field experiments have been developed with the following aims: to evaluate the NPR-fertilizer, the nitrogen dynamic and the response of the second sugarcane ratoon to the fertilizer-N rates; as well as to evaluate the NPR-fertilizer, the fertilizer-N immobilization in soil (NSR) and straw (NStR), and the productive parameters of sugarcane over the cycle in the same ammonium nitrate rate with partial or total removal or total maintenance of straw in the area with and without planting *Crotalaria spectabilis* under a no-till system. The planting of sunn hemp in the sugarcane's renewal presented little influence in the second sugarcane ratoon under the no-tillage system. In the productive and technological parameters there was no change in sugar and stalk production, NPR-fertilizer increased when associated with total removal of straw, there was no interference in the N-fertilizer immobilization in straw and it decreased the fertilizer-N immobilization in soil at the end of the cycle. The quantities of the straw left on the soil also did not change the technological attributes, however the maintenance of plant residue favored stalk yield. The NPR-fertilizer in the beginning of the sugarcane regrowth was benefited by the straw presence in both areas which did not remain until the harvest due to weather conditions and to the no-till system benefits. The results indicated that the fertilizer-N rate can be reduced in order to increase the NPR-fertilizer without influence of the crop rotation in this parameter and that the straw provides several benefits to the crop such as an increase of NPR-fertilizer in the beginning regrowth of the second sugarcane ratoon, making the straw removal infeasible.

Keywords: *Crotalaria spectabilis*; *Saccharum* spp; Nitrogen fertilizer efficiency; Nitrogen recovery; Green manure; No tillage

1. INTRODUÇÃO

No início do século XXI, a expansão da frota de carros *flex fuel* e a demanda de aumentar a produção sustentável de biocombustíveis, estabelecidas no Protocolo de Kyoto (1997), promoveram grande expansão no setor sucroalcooleiro (Matsuoka *et al.*, 2009; Moraes *et al.*, 2016; Worldwatch Institute, 2006). No Brasil, a produção e a área cultivada com cana-de-açúcar aumentaram respectivamente 125% e 68% no período de 2000 a 2008 (Moraes *et al.*, 2016). Em 2013, países definiram políticas para aumentar o uso de energia renovável, o que irá demandar mais 200 bilhões de litros de biocombustíveis até 2020, os quais podem ser provenientes do milho, da cana-de-açúcar, da beterraba, do trigo ou da celulose, a partir do etanol de segunda geração (Arruda, 2011; Goldemberg *et al.*, 2014). O mandato de Consumo de Energias Renováveis dos Estados Unidos demonstrou que, após 2015, não haveria aumento da produção de etanol a partir do milho e que o aumento da produção seria proveniente do mecanismo de segunda geração (Goldemberg *et al.*, 2014). Por se tratar de uma tecnologia nova, percalços ocorreram durante o desenvolvimento, fazendo com que o EUA não alcançasse a meta de produção de etanol de segunda geração até o final de 2016 (EPA, 2016). O balanço energético para a produção de bioenergia refere-se à unidade de energia renovável produzida por unidade de energia fóssil consumida no processo produtivo. A cana-de-açúcar apresenta balanço energético de 9,3, muito superior ao de culturas como o trigo (2,0), a beterraba (2,0), o sorgo sacarino (4,0) e o milho (1,3), demonstrando o potencial de aumentar a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar para atender o mercado mundial (Macedo, 2007; Macedo & Seabra, 2008).

Atualmente, o Brasil produz 695 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em 9,1 milhões de hectares, sendo São Paulo, Goiás e Minas Gerais os estados com maior área cultivada, representando respectivamente 52,4%, 10,5% e 9,4% da área total cultivada no Brasil. Na safra 2016/2017 há previsão de se produzir 40 milhões de toneladas de açúcar e 28 bilhões de litros de etanol com produtividade média nacional de 76 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2016) que é bastante inferior ao potencial produtivo da cultura de 381 Mg ha⁻¹ (Waclawovsky *et al.*, 2010). A baixa produtividade é reflexo de diversos fatores, podendo-se destacar problemas climáticos, manejo inadequado da cultura, perdas causadas por pragas, doenças e plantas daninhas e a compactação do solo causada pelo tráfego intenso de máquinas. O manejo da fertilidade do solo e a adubação da cana-de-açúcar são reponsáveis por incrementos significativos na produtividade da cultura (Egeskog *et al.*, 2014; Novo *et al.*, 2012; Otto *et al.*, 2016).

O crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar estão limitados à quantidade de N disponível para a cultura, cuja demanda nutricional varia de 0,5 a 0,9 kg N Mg⁻¹ de colmos produzida (Thorburn *et al.*, 2011; Trivelin, 2000). O N encontra-se em apenas 0,3 a 2% da massa seca total da planta (Robinson *et al.*, 2013), contudo a falta de N desencadeia redução na atividade fisiológica, diminuindo o acúmulo de fitomassa da cana-de-açúcar (Ludlow *et al.*, 1991; Wood *et al.*, 1996). As formas de absorção de N pela planta são, principalmente, amônio (N-NH₄⁺) e nitrato (N-NO₃⁻), podendo absorver também, em áreas com baixa disponibilidade de N-inorgânico, o N-orgânico de baixo peso molecular, como aminoácidos, peptídeos e ureia (Jones *et al.*, 2005; Paungfoo-Lonhienne *et al.*, 2008; Vinall *et al.*, 2012).

Do total de N aplicado anualmente na cultura, 32% é imobilizado na matéria orgânica do solo (MOS) e 26% absorvido pela planta, demonstrando a baixa recuperação do N-fertilizante pela cana-de-açúcar (RNP-fertilizante) (Otto *et al.*, 2016). O N que não é absorvido pela planta pode ser perdido, no ambiente, de diferentes maneiras, sendo as principais por meio da lixiviação, “runoff” (escoamento superficial), volatilização, desnitrificação e emissão de NH₃ e N₂O através das folhas e do solo (Cantarella *et al.*, 2007; Otto *et al.*, 2016; Robinson *et al.*, 2013). A baixa RNP-fertilizante está associada ao extenso e bem distribuído sistema radicular da cana-de-açúcar (Otto *et al.*, 2009; Smith *et al.*, 2005), dessa maneira a maior parte do N utilizado pela cultura é proveniente do solo (Franco *et al.*, 2011). Enquanto os fertilizantes representam uma fonte imediata de N às plantas, a mineralização de N da MOS e dos resíduos culturais representam uma fonte contínua de fornecimento de N às plantas a médio e longo prazo (Dourado-Neto *et al.*, 2010; Franco *et al.*, 2011).

Culturas de rotação em áreas de renovação têm sido muito empregadas no setor canavieiro, a fim de aumentar a quantidade de N adicionado ao sistema por meio da fixação biológica de N (Ambrosano *et al.*, 2011b), auxiliar no controle de plantas daninhas (Cheruiyot *et al.*, 2003) e na erosão do solo e na redução da população de nematoides (Dinardo-Miranda & Fracasso, 2009) promovendo ganhos em produtividade para a cultura (Ambrosano *et al.*, 2011a). As leguminosas que vem sendo mais utilizadas na renovação do canavial são a soja e o amendoim, uma vez que o produtor pode vender os grãos e obter rentabilidade na entressafra (Ambrosano *et al.*, 2013). No entanto, está expandido o uso de adubos verdes como as espécies de *Crotalaria*, com destaque para *C. juncea*, *C. spectabilis* e, mais recentemente, a *C. ochroleuca*. A crotalária apresenta relação C/N baixa, em torno de 25/1, contribuindo para o fornecimento de N ao solo, com reflexo no aumento na quantidade de N

acumulado pela cana-de-açúcar e na produtividade da cultura (*Ambrosano et al.*, 2011b, 2003; *Ambrosano et al.*, 2013).

No início do plantio de leguminosas como cultura de rotação acreditava-se que não haveria a necessidade de realizar a adubação nitrogenada de plantio, na cana-de-açúcar, devido a fixação biológica de N (*Garside et al.*, 1997). Contudo, trabalhos realizados no Brasil obtiveram resultados diferentes, nos quais a cana-de-açúcar, mesmo cultivada em área com uso de leguminosas na rotação, demanda aplicação de N-fertilizante no plantio, discussão que é mantida na adubação nitrogenada de soqueira de cana-de-açúcar (*Ambrosano et al.*, 2005; 2011b). Após a colheita da cana-planta, normalmente aplica-se a mesma dose de N em áreas que foram previamente manejadas com rotação, apesar dos indicativos de que nessas áreas a resposta à adubação nitrogenada de soqueira é limitada (*Nastaro-Boschiero*, 2017; *Otto et al.*, 2016, 2013). Se há menor resposta da soqueira à adubação nitrogenada em áreas submetidas à rotação na época de renovação do canavial, pode ser que os resíduos da cultura promovam menor imobilização do N do fertilizante, resultando em aumento da RNP.

Outro manejo que pode afetar a RNP pela cana-de-açúcar refere-se à aplicação de fertilizantes nitrogenados sobre a palha. Recentemente, com a proibição da despalha a fogo, permanece sobre o solo quantidade de palha que varia de 10 a 20 Mg ha⁻¹ com relação C/N variando de 80 a 100/1 (*Fortes et al.*, 2012; *Leal et al.*, 2013). A elevada relação C/N da palha pode resultar em aumento na imobilização do N-fertilizante (*Vieira-Megda et al.*, 2015), com possibilidade de reduzir a RNP quando o fertilizante é aplicado diretamente sobre a palha. Entretanto, com a demanda por fontes de energia limpa e com a tecnologia de produção de etanol de segunda geração, há interesse da indústria em remover a palha da cana-de-açúcar para produção de energia ou etanol (*Goldemberg et al.*, 2014; *Leal et al.*, 2013; *Sordi & Manechini*, 2013). Dois terços do potencial de energia da cana-de-açúcar estão alocados no bagaço e na palha, produtos que não foram aproveitados nas últimas décadas no Brasil (*Leal et al.*, 2013). A quantidade de palha a ser removida do campo para esta finalidade ainda é incerta, mas estudos iniciais apontam que ao menos 7 Mg ha⁻¹ de palha devem permanecer no campo para promover os benefícios esperados da camada de palha (*Carvalho et al.*, 2016). O efeito de níveis de manutenção de palha na imobilização do N-fertilizante e na EUN ainda necessita de mais estudos e, para esta finalidade, o uso de técnicas isotópicas é uma ferramenta em potencial. Com base nesse cenário, as hipóteses deste estudo são:

(i) A rotação de cultura irá aumentar a eficiência de uso do ¹⁵N-fertilizante pela soqueira de cana-de-açúcar;

(ii) A aplicação de fertilizante nitrogenado sobre a palha diminui a eficiência de uso do ¹⁵N-fertilizante pela cana-de-açúcar.

Referências

- Ambrosano, E.J., Cantarella, H., Ambrosano, G.M.B., Schammas, E.A., Dias, F.L.F., Rossi, F., Trivelin, P.C.O., Muraoka, T., Sachs, R.C.C., Azcón, R. (2011a): Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. *Bragantia* 70, 810–818.
- Ambrosano, E.J., Trivelin, P.C.O., Cantarella, H., Ambrosano, G.M.B., Schammas, E.A., Muraoka, T., Rossi, F. (2011b): ¹⁵N-labeled nitrogen from green manure and ammonium sulfate utilization by the sugarcane ratoon. *Sci. Agric.* 68, 361–368.
- Ambrosano, E.J., Foltran, D.E., Camargo, M.S., Rossi, F., Schammas, E.A., Silva, E.C., Ambrosano, G.M.B., Dias, F.L.F. (2013): Acúmulo de biomassa e nutrientes por adubos verdes e produtividade da cana- planta cultivada em sucessão , em duas localidades de São Paulo, Brasil. *Rev. Bras. Agroecol.* 8, 199–209.
- Ambrosano, E.J., Trivelin, P.C.O., Cantarella, H., Ambrosano, G.M.B., Schammas, E.A., Guirado, N., Rossi, F., Mendes, P.C.D., Muraoka, T. (2005): Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. *Sci. Agric.* 62, 534–542.
- Ambrosano, E.J., Trivelin, P.C.O., Cantarella, H., Rossetto, R., Muraoka, T., Bendassolli, J.A., Ambrosano, G.M.B., Tamiso, L.G., Vieira, F. de C., Prada Neto, I. (2003): NITROGEN-15 LABELING OF *Crotalaria juncea* GREEN MANURE. *Sci. Agric.* 60, 181–184.
- Arruda, P. (2011): Perspective of the Sugarcane Industry in Brazil. *Trop. Plant Biol.* 4, 3–8.
- Carvalho, J.L.N., Nogueirol, R.C., Menandro, L.M.S., Bordonal, R. de O., Borges, C.D., Cantarella, H., Franco, H.C.J. (2016): Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal : a major review. *Glob. Chang. Biol. Bioenergy* 1–16.
- Cheruiyot, E.K., Mumera, L.M., Nakhone, L.N., Mwonga, S.M. (2003): Effect of legume-managed fallow on weeds and soil nitrogen in following maize (*Zea mays* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) crops in the Rift Valley highlands of Kenya. *Aust. J. Exp. Agric.* 43, 597.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (2016): Acompanhamento da safra brasileira. Cana-de-açúcar. Safra 2016/2017. Terceiro levantamento. Dezembro 2016. Monitoramento agrícola. 78.
- Dinardo-Miranda, L.L., Fracasso, J.V. (2009): Spatial distribution of plant-parasitic nematodes in sugarcane fields. *Sci. Agric.* 66, 188–194.
- Dourado-Neto, D., Powlson, D., Bakar, R.A., Bacchi, O.O.S., Basanta, M.V., Cong, P.T., Keerthisinghe, G., Ismaili, M., Rahman, S.M., Reichardt, K., Safwat, M.S.A., Sangakkara, R., Timm, L.C., Wang, J.Y., Zagal, E., van Kessel, C. (2010): Multiseason Recoveries of Organic and Inorganic Nitrogen-15 in Tropical Cropping Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 139–152.

- Egeskog, A., Freitas, F., Berndes, G., Sparovek, G., Wirsenius, S. (2014): Greenhouse gas balances and land use changes associated with the planned expansion (to 2020) of the sugarcane ethanol industry in Sao Paulo, Brazil. *Biomass and Bioenergy* 63, 280–290.
- EPA (2016): Proposed Denial of Petitions for Rulemaking to Change the RFS Point of Obligation.
- Fortes, C., Trivelin, P.C.O., Vitti, A.C. (2012): Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. *Biomass and Bioenergy* 42, 189–198.
- Franco, H.C.J., Otto, R., Faroni, C.E., Vitti, A.C., Almeida de Oliveira, E.C., Trivelin, P.C.O. (2011): Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. *F. Crop. Res.* 121, 29–41.
- Garside, A.L., Berthelsen, J.E., Richards, C.L. (1997): Effect of fallow history on cane and sugar yield of a following plant cane crop. *Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists*. p. 7.
- Goldemberg, J., Mello, F.F.C., Cerri, C.E.P., Davies, C.A., Cerri, C.C. (2014): Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. *Energy Policy* 69, 14–18.
- Jones, D.L., Healey, J.R., Willett, V.B., Farrar, J.F., Hodge, A. (2005): Dissolved organic nitrogen uptake by plants - An important N uptake pathway? *Soil Biol. Biochem.* 37, 413–423.
- Leal, M.R.L. V, Galdos, M. V., Scarpore, F. V., Seabra, J.E.A., Walter, A., Oliveira, C.O.F. (2013): Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. *Biomass and Bioenergy* 53, 11–19.
- Ludlow, M.M., Ferraris, R., Chapman, L.S. (1991): Interaction between nitrogen and water supply on the photosynthetic rate of sugar cane leaves. *Proceedins of Australian Society of Sugar Cane Technologists*. pp. 66–72.
- Macedo, I.C. (2007): Situação atual e perspectivas do etanol. *Estud. Avançados* 21, 157–165.
- Macedo, I.C., Seabra, J.E.A. (2008): Mitigation of GHG emissions using sugarcane bioethanol, in: Sugarcane Ethanol: Contributions to Climate Change Mitigation and the Environment. FEM-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas (SP), Brazil, pp. 96–112.
- Matsuoka, S., Ferro, J., Arruda, P. (2009): The Brazilian experience of sugarcane ethanol industry. *Vitr. Cell. Dev. Biol. - Plant* 45, 372–381.
- Moraes, M.A.F.D. de, Bacchi, M.R.P., Caldarelli, C.E. (2016): Accelerated growth of the sugarcane, sugar, and ethanol sectors in Brazil (2000-2008): Effects on municipal gross domestic product per capita in the south-central region. *Biomass and Bioenergy* 91, 116–125.
- Nastaro-Boschiero, B. (2017): Adubação nitrogenada em soqueiras de cana-de-açúcar : influência do uso em longo prazo de fontes e / ou doses de nitrogênio. Universidade de São Paulo.
- Novo, A., Jansen, K., Slingerland, M. (2012): The sugarcane-biofuel expansion and dairy farmers' responses in Brazil. *J. Rural Stud.* 28, 640–649.

- Otto, R., Castro, S.A.Q., Mariano, E., Castro, S.G.Q., Franco, H.C.J., Trivelin, P.C.O. (2016): Nitrogen Use Efficiency for Sugarcane-Biofuel Production: What Is Next? *Bioenergy Res.* 9, 1272–1289.
- Otto, R., Franco, H.C.J., Faroni, C.E., Vitti, A.C., Trivelin, P.C.O. (2009): Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 44, 398–405.
- Otto, R., Mulvaney, R.L., Khan, S.A., Trivelin, P.C.O. (2013): Quantifying soil nitrogen mineralization to improve fertilizer nitrogen management of sugarcane. *Biol. Fertil. Soils* 49, 893–904.
- Paungfoo-Lonhienne, C., Lonhienne, T.G.A., Rentsch, D., Robinson, N., Christie, M., Webb, R.I., Gamage, H.K., Carroll, B.J., Schenk, P.M., Schmidt, S. (2008): Plants can use protein as a nitrogen source without assistance from other organisms. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 105, 4524–4529.
- Robinson, N., Vogt, J., Lakshmanan, P., Schmidt, S. (2013): Nitrogen Physiology of Sugarcane, in: *Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology*. 169–195.
- Smith, D.M., Inman-Bamber, N.G., Thorburn, P.J. (2005): Growth and function of the sugarcane root system. *F. Crop. Res.* 92, 169–183.
- Sordi, R. de A., Manechini, C. (2013): Utilization of trash: a view from the agronomic and industrial perspective. *Sci. Agric.* 70, 1–2.
- Thorburn, P.J., Biggs, J.S., Webster, A. J., Biggs, I.M. (2011): An improved way to determine nitrogen fertiliser requirements of sugarcane crops to meet global environmental challenges. *Plant Soil* 339, 51–67.
- Trivelin, P.C.O. (2000): Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: Três casos estudados com o uso do traçador ^{15}N . Universidade de São Paulo.
- Vieira-Megda, M.X., Mariano, E., Leite, J.M., Franco, H.C.J., Vitti, A.C., Megda, M.M., Khan, S.A., Mulvaney, R.L., Trivelin, P.C.O. (2015): Contribution of fertilizer nitrogen to the total nitrogen extracted by sugarcane under Brazilian field conditions. *Nutr. Cycl. Agroeco.* 101, 241–257.
- Vinall, K., Schmidt, S., Brackin, R., Lakshmanan, P., Robinson, N. (2012): Amino acids are a nitrogen source for sugarcane. *Funct. Plant Biol.* 39, 503.
- Waclawovsky, A.J., Sato, P.M., Lembke, C.G., Moore, P.H., Souza, G.M. (2010): Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnol. J.* 8, 263–276.
- Wood, A.W., Muchow, R.C., Robertson, M.J. (1996): Growth of sugarcane under high input conditions in tropical Australia. III. Accumulation, partitioning and use of nitrogen. *F. Crop. Res.* 48, 223–233.
- Worldwatch Institute (2006): Biofuels for Transportation. Global Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century, Policy.

2. RECUPERAÇÃO DO NITROGÊNIO PELA 2ª SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DE CULTURA

RESUMO

A resposta à adubação nitrogenada de soqueira é limitada em áreas com plantio de leguminosas na renovação do canavial. A hipótese deste estudo é que o plantio de leguminosas aumenta a recuperação do N pela soqueira de cana-de-açúcar (RNP). Objetivou-se com este estudo determinar o balanço de ^{15}N no sistema solo-planta-palha na segunda soqueira de cana-de-açúcar manejada com ou sem cultivo de *C. spectabilis* na renovação do canavial. O experimento foi realizado em um Latossolo Vermelho eutroférico em Quirinópolis, GO. Na renovação do canavial foi cultivada *C. spectabilis* em metade da área e outra metade foi deixada em pousio. Após o 2º corte da cana-de-açúcar, os tratamentos com 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ N foram reinstalados. O fertilizante foi aplicado em faixa sobre a palha próximo à linha da cana-de-açúcar. Em cada parcela foi instalada uma microparcela (1 linha de 2 m) com aplicação de nitrato de amônio enriquecido em ^{15}N ($^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$, abundância de 1,99% át. de ^{15}N). Na época da colheita, foram coletadas amostras de planta (divididas em colmo, folha seca e ponteiro), palha (grossa e fina) e solo (até 0,4 m). Nestas amostras foi quantificado o teor de N total e abundância isotópica para determinar a recuperação do N-fertilizante pela planta (RNP %), pela palha (RNPa %) e no solo (RNS %). A produtividade de colmos de cana-de-açúcar não diferiu entre as doses de N e rotação de culturas, atingindo 129 Mg ha⁻¹ na área sem rotação e 133 Mg ha⁻¹ na área com rotação. A RNP % foi de 28% na média das três doses de N e não foi influenciada pela rotação de culturas. A dose de 60 kg ha⁻¹ de N foi a que apresentou maior RNP %, 22% superior às demais doses de N. A RNS % atingiu 44% e não variou entre as áreas. A RNPa % foi de somente 3,3% e não diferiu entre as áreas e entre as doses de N. O resultado deste estudo indicou que a aplicação de fertilizante sobre a palha não irá aumentar significativamente a imobilização do N-fertilizante nem reduzir a RNP, a qual também não é influenciada pela rotação de cultura.

Palavras-chave: *Crotalaria spectabilis*; Absorção do N; Imobilização do N; *Saccharum* spp.; Solo; Palha; Produtividade de colmos; Cana crua

ABSTRACT

The nitrogen fertilization response by the sugarcane ratoon is limited in areas with planting legumes in the renewal. The hypothesis of this study is that the legumes increase the nitrogen plant recovery (NPR) by sugarcane ratoon. The aim of this study was to evaluate the ^{15}N balance in the soil-plant-straw system in second sugarcane ratoon handled with or without *Crotalaria spectabilis* in the sugarcane renewal. The experiment was carried out in a Typic Eutrudox in Quirinópolis, GO. In the renewal, *C. spectabilis* was cultivated in half of the area

and in the other half it was left fallow. After the second harvest the treatments (60, 120 e 180 kg ha⁻¹ N and a control without N) were reinstalled. N-fertilizer was applied in band on the straw near to the sugarcane line. In each plot a microplot was installed (1 line of 2 m) with an application of ¹⁵N labelled ammonium nitrate (¹⁵NH₄¹⁵NO₃, abundance of 1,99% at. de ¹⁵N). At harvest time, plant (divided in stalk, dry leaves and top), straw (thick and thin) and soil (up to 0.4 m) were sampled. In these samples, the N content and the isotopic abundance to determine the N-fertilizer plant recovery (NPR), straw (NStR) and soil (NSR) were quantified. The sugarcane stalk yield did not differ between the N rates and crop rotation, ranging 129 Mg ha⁻¹ in the area without crop rotation and 133 Mg ha⁻¹ in the area with crop rotation. The NPR average of the three N rates was 28% and was not influenced by the crop rotation. The rate 60 kg ha⁻¹ of N showed the highest NPR, 22% higher than other N rates. The NSR reached 44% and did not vary between the areas. The NStR was only 3,3% and did not differ between the areas and the N rates. The result indicates that the fertilizer application on the straw will not significantly increase N-fertilizer immobilization nor the NPR which is also not influenced by crop rotation.

Keywords: Sunn hemp; Nitrogen uptake; Nitrogen immobilization; *Saccharum* spp.; Soil; Straw; Stalk yield; Unburned cane.

2.1. Introdução

A recuperação do N-fertilizante pela cana-de-açúcar (RNP) deve ser aumentada para produção sustentável de biocombustíveis em escala global (*Erisman et al.*, 2010; *Otto et al.*, 2016). A área cultivada com cana-de-açúcar no mundo é de 27 milhões de hectares, desse total, cerca de 10 milhões de hectares são cultivados no Brasil (*FAOSTAT*, 2016). Do total de fertilizante nitrogenado aplicado à cana-de-açúcar, a maior parte é imobilizada na matéria orgânica do solo (MOS) (32%) e 26% é absorvido pela cultura (*Otto et al.*, 2016). O N proveniente da mineralização da MOS é a principal fonte de N para a cana-de-açúcar, podendo suprir até 80% do total de N acumulado pela cultura (*Dourado-Neto et al.*, 2010; *Franco et al.*, 2011; *Vieira-Megda et al.*, 2015). Por isso, estratégias de manejo que aumentem os estoques de MOS e N total do solo são importantes para diminuir a dependência de fertilizantes sintéticos para produção de bioenergia a partir da cana-de-açúcar.

O plantio de leguminosas na renovação do canavial é uma estratégia interessante para promover a fixação biológica de N (*Ambrosano et al.*, 2013; *Resende et al.*, 2006) que pode diminuir a demanda de fertilizante nitrogenado pela cana-de-açúcar e melhorar a qualidade química, física e biológica do solo (*Garside & Bell*, 2001). Outros benefícios incluem a proteção do solo contra erosão e infestação por plantas daninhas (*Cheruiyot et al.*,

2003), redução da população de nematoides (*Pankhurst et al.*, 2005) e o tão esperado aumento da produtividade e longevidade do canavial (*Ambrosano et al.*, 2005).

O N fixado pelas leguminosas será importante não somente para o primeiro ciclo da cultura, mas também para os ciclos subsequentes. A recuperação do N proveniente do adubo verde atingiu somente 5% na colheita da cana-planta quando a crotalária foi utilizada como cultura de rotação (*Ambrosano et al.*, 2005). Essa recuperação é baixa quando comparada aos fertilizantes minerais, contudo, o N da crotalária não está totalmente disponível no primeiro ciclo da cultura, uma vez que a liberação do N da leguminosa ocorre durante a decomposição do resíduo vegetal (*Ambrosano et al.*, 2011b). A decomposição da leguminosa não depende apenas da relação C:N, a qual não considera a qualidade do carbono, mas também das relações C:P, lignina:N, polifenóis:N e dos teores de lignina, hemicelulose e celulose (*Carvalho et al.*, 2009, 2008). A recuperação do N do adubo verde pela soqueira de cana-de-açúcar é maior do que na cana-planta, alcançando valores de 19 a 21% (*Ambrosano et al.*, 2011b). Por isso, espera-se que áreas manejadas com plantio de leguminosas na renovação do canavial possam apresentar menor resposta à adubação nitrogenada durante o ciclo de soqueira.

Em áreas que receberam rotação com leguminosas, normalmente elimina-se a aplicação de fertilizante nitrogenado no plantio devido à resposta limitada da cana-planta a adubação nitrogenada (*Franco et al.*, 2011) associada à liberação do N dos resíduos vegetais. *Ambrosano et al.* (2005) demonstraram o contrário, comprovando a demanda de N no plantio mesmo em áreas com uso de leguminosas como cultura de rotação. Entretanto, independente da adoção ou não do N-fertilizante no plantio, normalmente a adubação nitrogenada de soqueira é semelhante à adotada em áreas não submetidas à rotação, desconsiderando-se o efeito da rotação no aumento da disponibilidade do N no solo (*Garside et al.*, 1997). Estudos de modelagem realizados na Austrália indicaram que há possibilidade de redução também da adubação nitrogenada de soqueira em áreas submetidas à rotação. De acordo com *Park et al.* (2010), nessas áreas a redução na adubação nitrogenada pode variar de 40 a 100% na primeira soqueira, 20 a 60% na segunda soqueira, 5 a 25% na terceira soqueira e 2 a 10% na quarta soqueira. Entretanto, não se sabe se a redução na demanda de fertilizante nitrogenado nestas condições é devido simplesmente à maior disponibilidade de N dos resíduos da leguminosa ou por um efeito secundário na EUN pela cana-de-açúcar.

A associação de cultivo mínimo e plantio de leguminosas em rotação pode ser uma alternativa interessante para promover, simultaneamente, aumento nos estoques de C e N em

solos cultivados com cana-de-açúcar e melhoria na qualidade do resíduo vegetal. O sistema de plantio direto melhora as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, podendo contribuir para o aumento da FBN pelas leguminosas e da RNP do fertilizante (Zotarelli *et al.*, 2012).

A hipótese deste estudo é de que a rotação de cultura com *Crotalaria spectabilis* irá aumentar a RNP pela soqueira de cana-de-açúcar em área manejada sob plantio direto. O objetivo foi determinar o balanço de ^{15}N no sistema solo-planta-resíduo vegetal em áreas de segunda soqueira de cana-de-açúcar submetida ou não à rotação de culturas na renovação do canavial.

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Caracterização da área

O experimento foi conduzido em área comercial de cana-de-açúcar localizada no município de Quirinópolis – GO (18° 56' S, 50° 42' O, alt. 500 m). A região apresenta pluviosidade anual média de 1400 mm e temperatura média anual de 24,4°C, caracterizando o clima tropical típico Aw, inverno seco e verão úmido, segundo Köppen-Geiger. Em outubro de 2012, antes da instalação do experimento, foi realizada amostragem de solo, com a abertura de seis trincheiras até a profundidade de 1 m, para classificação e caracterização físico-química (Tabelas 1 - 2). O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Eutroférico típico de textura argilosa (Embrapa, 2006), correspondente a um Typic Eutrudox (Soil Survey Staff, 2014).

Tabela 1. Análise química do solo da área experimental antes do plantio da *C. spectabilis* e da calagem e gessagem¹.

Camada	pH	MOS	P	S	Na	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
m	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³										%	
0,0 – 0,1	5,5	31,9	9,5	6,8	0,1	5,8	44	15,8	0,2	23	65,5	89	74	0,3
0,1 – 0,2	5,5	27,2	8,2	6,2	0,1	3,7	43	12,2	0,0	23	58,8	82	72	0,0
0,2 – 0,4	5,6	22,0	6,7	13,5	0,1	2,6	33	8,3	0,2	21	45,1	65	68	0,4
0,4 – 0,6	5,6	18,0	6,8	9,3	0,1	0,9	28	6,3	0,2	20	35,0	55	64	0,4
0,6 – 1,0	5,7	30,3	6,2	8,3	0,1	0,7	22	6,8	0,3	18	29,7	48	62	1,2

¹MOS – Matéria orgânica do solo; SB – Soma de bases; CTC – Capacidade de troca catiônica; V – Saturação por bases; m – Saturação por alumínio. Determinações: pH em CaCl₂ a 0,01 mol l⁻¹; MOS por oxidação por dicromato; P por resina; S por fosfato de cálcio; K, Ca e Mg por resina com determinação por fotometria de chama e espectrofotometria de absorção atômica, respectivamente, assim como o Al; H + Al por tampão SMP; Na por Mehlich (Raij *et al.*, 2001).

Tabela 2. Análise física e química do solo (ataque sulfúrico) da área experimental em outubro de 2012¹.

Camada m	Areia g kg ⁻¹	Argila g kg ⁻¹	Silte g kg ⁻¹	Densidade kg dm ⁻³	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	ki	kr
0,0 – 0,1	267	547	186	1,37	14,4	19,8	10,8	29,9	0,1	1,2	0,7
0,1 – 0,2	249	561	190	1,29	14,3	20,6	11,2	29,2	0,1	1,2	0,7
0,2 – 0,4	225	580	195	1,23	15,0	21,8	10,0	30,2	0,1	1,2	0,7
0,4 – 0,6	226	599	175	1,20	14,8	21,3	9,6	28,5	0,1	1,2	0,7
0,6 – 1,0	234	595	171	1,19	15,4	20,2	9,8	30,1	0,1	1,3	0,7

¹Areia, argila e silte determinados pelo método da pipeta (Embrapa, 2011); Densidade determinada através do método do anel volumétrico (Gee & Bauder, 1986).

2.2.2. Instalação do experimento

A área experimental foi conduzida em sistema de plantio direto, sendo essa dividida em dois manejos, i) com rotação de cultura (*Crotalaria spectabilis*) na renovação do canavial e ii) sem rotação de cultura, permanecendo em pousio até o plantio da cana-de-açúcar. Na segunda quinzena de novembro de 2012 foi realizada dessecação das plantas presentes na área, com posterior roçagem, realizada no início de dezembro de 2012. Em seguida, 10 dias após esse procedimento, plantou-se a cultura de rotação com auxílio de plantadora adequada para plantio direto. A crotalária foi plantada perpendicularmente às linhas da cana-de-açúcar, com densidade de semente de 25 kg ha⁻¹ permanecendo no campo por, aproximadamente, 70 dias, momento em que ocorreu a dessecação da cultura. Amostragens foram realizadas na crotalária, 10 dias após a dessecação, para quantificar a produção de biomassa seca e o acúmulo de nutrientes na biomassa da crotalária. A produção de biomassa seca foi de 8,1 Mg ha⁻¹, que continha 194 kg ha⁻¹ N, 19,4 kg ha⁻¹ P, 126,4 kg ha⁻¹ K, 73,7 kg ha⁻¹ Ca, 17,8 kg ha⁻¹ Mg, 13,8 kg ha⁻¹ S, 0,11 kg ha⁻¹ B, 0,15 kg ha⁻¹ Cu, 5,2 kg ha⁻¹ Fe, 0,35 kg ha⁻¹ Mn e 0,21 kg ha⁻¹ Zn (Tenelli, 2016).

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado em março de 2013 nas duas áreas (com e sem rotação). O sulco foi aberto com sulcador de duas linhas espaçadas em 1,5 m, realizando, também, a adubação de plantio com 500 kg ha⁻¹ do fertilizante 08 – 25 – 29, fornecendo 40 kg ha⁻¹ N, 125 kg ha⁻¹ P₂O₅ e 145 kg ha⁻¹ K₂O. A distribuição dos toletes-gema foi realizada manualmente com, aproximadamente, 13 gemas viáveis por metro. O fechamento do sulco foi realizado com cobridor de cana-planta, aplicando inseticida sobre os toletes, uma vez que a área possuía histórico de ataque de formiga. A variedade de cana-de-açúcar utilizada foi a RB96 6928, caracterizada por ser de ciclo médio, período de colheita entre abril e junho,

apresentar rusticidade, boa brotação em sistema de cana crua, boa produtividade e ser tolerante às principais doenças da cultura, como carvão, ferrugem marrom, ferrugem alaranjada, escaldadura e mosaico. O controle de plantas daninhas foi realizado conforme práticas usuais da Usina.

A colheita da cana-planta foi realizada em junho de 2014, sendo a produtividade determinada com a colheita mecanizada das 4 linhas centrais, pesadas em transbordo instrumentado com célula de carga. A produtividade de colmo por hectare (TCH) e os atributos tecnológicos, na cana-planta, foram de 168,4 Mg ha⁻¹, 16,5 % teor de sacarose aparente (pol%), 141,3 kg Mg⁻¹ açúcares totais recuperáveis (ATR) e 16,2 % sólidos solúveis (Brix) na área com rotação de cultura, e de 151,5 Mg ha⁻¹, 16,1 % pol, 138,5 kg Mg⁻¹ de ATR e 15,8 % Brix na área sem rotação. Após a colheita do experimento, foi realizada quantificação da biomassa de palha presente na área, que foi de 30,1 Mg ha⁻¹ em massa fresca e 16,6 Mg ha⁻¹ de massa seca de palha.

Em agosto de 2014, sessenta dias após a colheita, foi realizada a adubação da soqueira de cana-de-açúcar. Em cada uma das áreas (com e sem rotação) foi instalado um experimento no delineamento de blocos ao acaso, com quatro tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram doses de N de 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ N, mais o controle (sem N). Cada parcela continha 5 linhas de cana-de-açúcar e 9,0 m de comprimento. O fertilizante nitrogenado utilizado foi o nitrato de amônio (32% N), aplicado em faixa (cerca de 0,15 m de distância da linha) sobre a palha (anexo – Figura 10). Juntamente com o nitrato de amônio, também foi aplicado cloreto de potássio (KCl) na dose de 120 kg ha⁻¹ K₂O, para evitar deficiências nutricionais. A cana-de-açúcar foi cultivada até junho de 2015, quando se realizou a colheita da 1ª soqueira, avaliando os atributos tecnológicos e a TCH da cultura (Tabela 3). A quantidade de palha depositada sobre o solo após a colheita da 1ª soqueira foi de 16,3 Mg ha⁻¹ de massa de matéria seca.

Tabela 3. Produtividade de colmos (TCH) e atributos tecnológicos da cana-de-açúcar na 1ª soqueira (2015) em ambas as áreas e nas doses de N (Tenelli, 2016).

Dose N kg ha ⁻¹	Rotação de cultura							
	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem
	TCH (Mg ha ⁻¹)		Pol (%)		ATR (kg Mg ⁻¹)		Brix (%)	
0	150,0	140,1	12,7	13,2	127,8	132,4	14,8	15,2
60	163,9	146,9	13,4	12,9	134,2	130,1	15,4	15,0
120	167,9	150,6	13,4	13,1	134,0	131,2	15,4	15,0
180	171,3	163,3	13,2	13,4	132,6	134,1	15,3	15,3
Média	163,3	150,2	13,2	13,1	132,1	132,0	15,2	15,1

Em agosto de 2015, sessenta dias após a colheita da 1ª soqueira, os tratamentos foram reinstalados nas mesmas parcelas. Além da aplicação de nitrato de amônio e cloreto de potássio, também foram instaladas microparcelas com aplicação de nitrato de amônio duplamente marcado ($^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$), com abundância isotópica de 1,99% de átomos de ^{15}N . As microparcelas foram alocadas na linha central (LC) e no centro de cada parcela, conforme demonstrado na Figura 1. As linhas adjacentes (LA) foram utilizadas posteriormente para análises, assim como as plantas da LC.

Figura 1. Representação de uma parcela com a micro parcela já instalada. A 1ª e a 5ª linha são linhas de bordadura (B), e as avaliações foram realizadas na 3ª linha, linha central (LC), e na 2ª e 4ª linhas, linhas adjacentes (LA).

Durante o período de condução do experimento as variáveis climáticas, temperatura (°C) e precipitação (mm) foram registradas em estação meteorológica instalada próxima à área experimental. O balanço hídrico foi calculado para a 1ª soqueira (julho de 2014 a junho de 2015) e para a 2ª soqueira da cana-de-açúcar (julho de 2015 a maio de 2016), seguindo o método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). O coeficiente da cultura (Kc) utilizado no

cálculo da evapotranspiração seguiu os dados obtidos por *Dias* (2016). Foi considerada capacidade de água disponível (CAD) de 161 mm, conforme critérios de *Pereira et al.* (2007) e *Prado* (2014). O balanço hídrico foi calculado em planilhas eletrônicas desenvolvidas por *Rolim et al.* (1998) (Figura 2).

Figura 2. Balanço hídrico calculado através do método de Penman-Monteith para a 1ª e a 2ª soqueira da cana-de-açúcar durante condução do experimento. Setas indicam época de colheita (junho de 2015 e maio de 2016) e da aplicação do fertilizante nitrogenado e do cloreto de potássio (agosto de 2014 e agosto de 2015).

2.2.3. Avaliações

2.2.3.1. Produtividade e Atributos Tecnológicos

Em maio de 2016 foi estimada a produtividade de colmos (TCH) da cana-de-açúcar. O método utilizado foi a biometria: toda a parte aérea da planta presente em um metro de sulco foi cortada, sendo essa avaliação realizada nas três linhas centrais de cada parcela, tomando cuidado para que as amostras não fossem misturadas. Após o corte a planta foi separada nos compartimentos colmo, ponteiro e folha seca, sendo esses identificados, amarrados e pesados com auxílio de balança eletrônica para obtenção da massa de cada compartimento (anexo – Figura 14). A estimativa de biomassa foi realizada considerando a massa de colmos, folha seca e ponteiro presente em um metro e os 6.667 m presentes em 1 ha,

considerando o espaçamento de 1,5 m entrelinhas. Para fins de cálculo, foi considerada a biomassa média das três repetições.

Após a pesagem dos colmos cortados na biometria realizou-se a separação de 10 colmos, por parcela, para avaliação dos parâmetros tecnológicos: °Brix (teor de sólidos solúveis), Pureza (porcentagem de sacarose nos sólidos solúveis - %), ATR (Açúcar total recuperável – kg Mg⁻¹), AR (Açúcares redutores - %), Fibra (constituintes insolúveis - %) e Pol da cana (teor de sacarose aparente - %) (*Fernandes, 2000*). A produtividade de sacarose por hectare (TPH) foi obtida por meio do produto entre a TCH e a Pol da cana de cada parcela, dividido por 100.

2.2.3.2. Recuperação do ¹⁵N-fertilizante pela planta (RNP)

A recuperação do N-fertilizante pela planta (RNP) foi determinada na colheita da cana-de-açúcar, em maio de 2016, por meio da avaliação biométrica anteriormente descrita, assim como determinação do teor de N total e abundância isotópica dos compartimentos da planta. Foi removida toda folha seca aderida aos colmos da LC, sendo então armazenada em saco plástico e posteriormente pesada em balança de campo. Após a despalha realizou-se a despona dos colmos, onde os ponteiros foram retirados no ponto de quebra, prosseguindo com o corte dos colmos rente ao solo. As amostras de folha seca, ponteiro e colmo foram identificadas com o número da parcela e com a linha amostrada (LC). Posteriormente, foi realizado o mesmo procedimento nas linhas adjacentes (LA) em posição equivalente à LC. As amostras das duas LA's foram armazenadas conjuntamente, compondo a amostra LA.

As amostras foram pesadas em balança eletrônica de duas casas decimais e em seguida trituradas com o uso de picadora de forragem. A moagem do material foi realizada em ordem crescente de abundância de ¹⁵N e de umidade visando diminuir a contaminação cruzada entre as amostras. Após moagem, tomou-se uma sub-amostra de cada compartimento da cana-de-açúcar (cerca de 500 g de material fresco) as quais foram armazenadas em saco plástico e colocadas em câmara fria, evitando a deterioração e a perda de umidade.

No laboratório foi determinada a umidade das sub-amostras, as quais foram pesadas em balança analítica com duas casas decimais, obtendo a massa à umidade natural, e secas em estufa com circulação de ar a 65°C, até atingirem umidade constante. Após secas as amostras foram pesadas e realizou-se a correção do peso do material vegetal no campo, obtendo a massa seca de cada compartimento da cana-de-açúcar, dado utilizado no cálculo de

recuperação do ^{15}N -fertilizante. Posteriormente, foi realizada a moagem em moinho de faca do tipo Willey, sendo as amostras moídas em ordem crescente de abundância de ^{15}N , prosseguindo de limpeza cautelosa do moinho. As amostras foram pesadas, em micro-balança analítica com precisão de 1 μg , colocando-se 8 a 12 mg de material por cápsula de estanho, prosseguindo com a análise no espectrômetro de massa Hydra modelo 20/20 acoplado a um analisador automático Anca-GSL da Sercon, fornecendo resultados de N total (g kg^{-1}) e abundância isotópica (% át. ^{15}N). Com os dados de abundância de ^{15}N calculou-se o N na parte aérea da planta proveniente do fertilizante (NPPF), em porcentagem, por meio da equação abaixo:

$$\text{NPPF (\%)} = [(a - b) / (c - b)] \cdot 100 \quad [\text{Eq. 1}]$$

Em que: a – abundância em átomos de ^{15}N da planta; b – abundância natural em átomos de ^{15}N ; c – abundância em átomos de ^{15}N do fertilizante.

Na colheita da cana-de-açúcar, em maio de 2016, foi possível quantificar o QNPPF, em kg ha^{-1} , uma vez que foi realizada biometria. Em cada microparcela, obteve a biomassa de colmos, folha seca e ponteiros, assim como teor de N total e abundância isotópica em cada compartimento da planta, permitindo calcular o QNPPF e a recuperação do N-fertilizante pela planta (RNP%) conforme equações (Trivelin *et al.*, 1994):

$$\begin{aligned} \text{QNPPF}_{\text{LC}} (\text{kg ha}^{-1}) &= (\text{NPPF}_{\text{LC}}(\%) / 100) \cdot \text{N-total} \\ \text{QNPPF}_{\text{LA}} (\text{kg ha}^{-1}) &= 2 \cdot [(\text{NPPF}_{\text{LA}}(\%) / 100) \cdot \text{N-total}] \\ \text{QNPPF} (\text{kg ha}^{-1}) &= \text{NPPF}_{\text{LC}} (\text{kg ha}^{-1}) + \text{NPPF}_{\text{LA}} (\text{kg ha}^{-1}) \end{aligned} \quad [\text{Eq. 2}]$$

$$\text{RNP\%} = [\text{NPPF} (\text{kg ha}^{-1}) / \text{Dose N} (\text{kg ha}^{-1})] \cdot 100 \quad [\text{Eq. 3}]$$

Em que: N-total – nitrogênio total da parte aérea em kg ha^{-1} ; LC e LA significam linha central e adjacente da microparcela com aplicação de fertilizante ^{15}N ; RNP% - recuperação do N-fertilizante pela planta, em porcentagem; QNPPF – quantidade de N da parte aérea da planta proveniente do fertilizante, correspondente à soma do ^{15}N -fertilizante presente no colmo, folha seca e ponteiro; Dose N – a dose de N aplicado via fertilizante.

2.2.3.3. Recuperação do ^{15}N -fertilizante na palha (RNPa)

Após a avaliação biométrica, coletou-se a palha residual da cana-de-açúcar presente no solo, processo realizado para determinar a recuperação do ^{15}N -fertilizante na palha (RNPa). Dessa maneira, com o auxílio de um gabarito de 1,5 m de largura por 0,5 m de comprimento, o qual foi colocado no centro da microparcela, realizou-se a coleta de toda a palha presente sobre o solo em 0,75 m². Nesse procedimento, tomou-se cuidado para coletar apenas a palha residual, tentando evitar ao máximo a presença de solo (Figura 3). A palha foi armazenada em saco plástico devidamente identificado.

No laboratório, devido a presença de solo e às diversas granulometrias da palha, as amostras foram peneiradas com peneira de 4 mm. A palha foi separada em duas frações: palha fina (a qual passou pela peneira de 4 mm) considerada a transição entre a palha e o solo, e palha grossa (> 4 mm), sem presença de solo. As amostras foram pesadas antes e após secagem em estufa com circulação de ar a 65°C, determinando-se a umidade do material. Posteriormente, realizou-se a moagem desse material em moinho de faca tipo Willey, também em ordem crescente de abundância de ^{15}N e com cautela na limpeza, seguido da determinação da abundância de ^{15}N , em átomos %, e do N-total, em g kg⁻¹ em espectrômetro de massas IRMS-ANCA/GSL. Para essa quantificação foi pesado, em micro-balança analítica com precisão de 1 µg, aproximadamente 7 a 9 mg de material seco. A recuperação do ^{15}N -fertilizante na palha (RNPa%) foi obtida por meio das equações:

$$\begin{aligned} \text{QNPfPF (kg ha}^{-1}\text{)} &= (\text{NPfPF(\%)} / 100) \cdot \text{N-total} \\ \text{QNPgPF (kg ha}^{-1}\text{)} &= [(\text{NPgPF(\%)} / 100) \cdot \text{N-total}] \\ \text{QNPalhaPF (kg ha}^{-1}\text{)} &= \text{NPfPF (kg ha}^{-1}\text{)} + \text{NPgPF (kg ha}^{-1}\text{)} \\ \text{RNPa\%} &= [\text{NPalhaPF (kg ha}^{-1}\text{)} / \text{Dose N (kg ha}^{-1}\text{)}] \cdot 100 \end{aligned} \quad [\text{Eq. 4}]$$

Em que: QNPfPF – quantidade de N na palha fina proveniente do fertilizante; QNPgPF – quantidade de N na palha grossa proveniente do fertilizante; QNPalhaPF – quantidade de N na palha proveniente do fertilizante; RNPa% - recuperação do N-fertilizante na palha.

Figura 3. A – Gabarito posicionado na microparcela demarcando a região de coleta de palha (0,75 m²); B – Microparcela após a coleta de palha.

2.2.3.4. Recuperação do ^{15}N -fertilizante no solo (RNS)

A recuperação do ^{15}N -fertilizante no solo (RNS) foi avaliada na colheita (maio de 2016). A amostragem foi realizada na LC da microparcela, coletando-se três camadas de solo, 0 – 0,1, 0,1 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m. As duas primeiras camadas foram coletadas com o uso de sonda de aço inox com 5,5 cm de diâmetro interno, enquanto a última camada foi coletada com trado holandês. O solo foi amostrado no lado direito da microparcela, sendo dois pontos de amostragem a 0,15 m da linha (local do solo sob influência do fertilizante), e dois pontos a 0,75 m da linha, na entre linha da cana-de-açúcar (local sem a influência do fertilizante). Os pontos de amostragem em cada local estavam espaçados em 0,5 m (Figura 4). O solo amostrado a 0,15 m foi misturado e armazenado como amostra correspondente a linha, e o solo amostrado a 0,75 m foi misturado e armazenado como amostra correspondente a entre-linha. Após secas em estufa a 35°C, as amostras foram destorroadas e peneiradas a 2 mm para que ficassem homogêneas. Posteriormente, misturou-se 20 cm³ de solo de cada amostra, os quais compuseram a sub-amostra que foi processada em moinho de bola. Após moagem, cerca de 70 a 80 mg de solo foram pesados dentro de capsula de estanho, sendo em seguida analisadas no espectrômetro de massas para determinação do teor de N (g kg⁻¹) e abundância de átomos de ^{15}N (%).

Para determinar o acúmulo de N total no solo foi determinada a massa de solo de cada ponto de amostragem, na linha e na entre linha e em cada profundidade (0 – 0,1, 0,1 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m). A densidade do solo foi determinada em cada local de amostragem pelo método do anel volumétrico (Blake & Hartge, 1986). A massa de solo presente no anel volumétrico foi seca em estufa a 105°C por 24 horas, seguido da pesagem. Na área com rotação, a densidade média do solo foi de 1,27, 1,34 e 1,27 g cm⁻³ na linha e 1,31, 1,32 e

1,28 g cm⁻³ na entrelinha nas camadas de 0,0 – 0,1, 0,1 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m, respectivamente; na área sem rotação foi de 1,37, 1,29 e 1,24 g cm⁻³ na linha e 1,40, 1,40, 1,29 g cm⁻³ na entrelinha nas camadas de 0,0 – 0,1, 0,1 – 0,2 e 0,2 – 0,4 m, respectivamente. Para o cálculo do volume do solo foi considerada a camada representada pela amostragem, de 0,1 m para as duas primeiras camadas, e de 0,2 m para a última camada, a qual representou a faixa de solo amostrado. Com a massa, a abundância isotópica de ¹⁵N e o teor de N no solo, foi realizado o cálculo do NSPF, em % e kg ha⁻¹, e determinou-se a RNS em cada camada, conforme equações:

$$QNS_{0,0-0,1}PF \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = (NS_{0,0-0,1}PF(\%) / 100) \cdot N\text{-total}$$

$$QNS_{0,1-0,2}PF \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = (NS_{0,1-0,2}PF(\%) / 100) \cdot N\text{-total}$$

$$QNS_{0,2-0,4}PF \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = (NS_{0,2-0,4}PF(\%) / 100) \cdot N\text{-total}$$

$$QNSPF \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = NS_{0,0-0,1}PF + NS_{0,1-0,2}PF + NS_{0,2-0,4}PF \text{ (kg ha}^{-1}\text{)}$$

$$RNS\% = [QNSPF \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} / \text{Dose N (kg ha}^{-1}\text{)}] \cdot 100 \quad [\text{Eq. 5}]$$

Em que: QNS_{0,0-0,1}PF – quantidade de N no solo na camada de 0,0-0,1 m proveniente do fertilizante; QNS_{0,1-0,2}PF – quantidade de N no solo na camada de 0,1-0,2 m proveniente do fertilizante; QNS_{0,2-0,4}PF – quantidade de N no solo na camada de 0,2-0,4 m proveniente do fertilizante; QNSPF – quantidade de N no solo proveniente do fertilizante; RNS% - recuperação do N-fertilizante no solo.

Figura 4. Representação dos pontos de amostragem do solo. Os pontos 1 e 2 estão a 0,15 m da linha e os pontos 3 e 4 estão a 0,75 m da linha, sendo equidistantes a 0,5 m.

2.2.4. Análise estatística

Os dados foram analisados como grupo de experimento, a fim de comparar as áreas com e sem rotação de cultura. A análise de variância foi realizada comparando-se as médias pelo teste de Tukey com nível de significância de 10%. Quando necessário, realizou-se transformação de dados, de acordo com Box-Cox (*Box & Cox*, 1964). Para tais análises utilizou-se o programa estatístico R (*R Core Team*, 2014).

2.3. Resultados

2.3.1. Recuperação do ^{15}N -fertilizante pela cana-de-açúcar (RNP)

A biomassa de colmos variou de 121 a 143 Mg ha^{-1} na área com rotação e de 124 a 136 Mg ha^{-1} na área sem rotação, sem diferir entre os manejos e as doses de N (Tabela 4). A biomassa de folha seca foi maior na área sem rotação, porém também não foi influenciada pelas doses de N. Para biomassa de ponteiro, houve interação entre o manejo de rotação e as doses de N. A biomassa de ponteiro reduziu com as doses de N na área com rotação; no controle (sem N), a biomassa de ponteiro foi maior na área com rotação, enquanto para a dose de 180 kg ha^{-1} N a biomassa de ponteiro foi maior na área sem rotação. Comportamento semelhante foi observado para biomassa da planta toda, que reduziu com as doses de N somente na área com rotação (Tabela 4). Para biomassa seca, a associação de elevadas doses de N e rotação de cultura também diminuiu a biomassa de ponteiros e da planta toda (Tabela 4). A redução na biomassa da planta com o aumento nas doses de N na área com rotação pode ser um indicativo de excesso de N que causou toxidez à planta quando houve associação de rotação de cultura e elevadas doses de N na soqueira.

Tabela 4. Biomassa dos compartimentos da planta na colheita da 2ª soqueira (maio de 2016). Valores representam massa de matéria natural (biomassa) e massa de matéria seca (biomassa seca)¹.

Dose N			Rotação de cultura													
kg ha ⁻¹	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	
	Colmo			Folha seca			Ponteiro			Planta toda						
Biomassa (Mg ha ⁻¹)																
0	143,4	123,8	133,6	11,9	11,6	11,7	16,3	aA	12,2	B	14,2	171,6	aA	147,5	B	159,6
60	135,0	127,1	131,0	10,5	11,5	11,0	14,8	a	12,9		13,8	160,3	ab	151,4		155,8
120	134,0	129,5	131,7	10,7	13,2	12,0	13,6	ab	15,0		14,3	158,3	ab	157,6		158,0
180	121,2	136,5	128,8	9,6	11,4	10,5	10,4	bB	13,9	A	12,1	141,1	bB	161,8	A	151,4
Média	133,4	129,2		10,7	B	11,9	A		13,8		13,5	157,8		154,6		
P _{rotação}		0,418				0,053					0,684			0,586		
P _{doseN}		0,927				0,101					0,155			0,781		
P _{rotação*doseN}		0,143				0,319					0,008			0,089		
Biomassa seca (Mg ha ⁻¹)																
0	34,3	32,4	33,3	10,8	10,4	10,6	5,2	aA	3,6	B	4,4	50,3	a	46,3		48,3
60	33,5	30,4	31,9	9,6	10,3	9,9	4,5	a	3,9		4,2	47,6	ab	44,6		46,1
120	32,9	33,5	33,2	9,8	11,8	10,8	4,8	a	4,6		4,7	47,5	ab	49,9		48,7
180	29,0	34,7	31,8	8,8	10,3	9,5	3,3	bB	4,6	A	4,0	41,1	bB	49,5	A	45,3
Média	32,4	32,7		9,8	10,7		4,5		4,1			46,6		47,6		
P _{rotação}		0,811				0,129					0,211			0,597		
P _{doseN}		0,804				0,109					0,229			0,467		
P _{rotação*doseN}		0,160				0,321					0,004			0,080		

¹Letras minúsculas distintas indicam diferença entre a dose de N e letras maiúsculas distintas indicam diferença entre manejo de rotação pelo teste de Tukey (P < 0,10).

De forma semelhante ao observado para produção de biomassa, houve maior acúmulo de N na folha seca na área sem rotação e interação entre rotação e doses de N para acúmulo de N no ponteiro (Tabela 5). No tratamento controle (sem N), houve maior acúmulo de N no ponteiro na área com rotação; o inverso ocorreu para a maior dose de N (180 kg ha^{-1} N), que apresentou maior acúmulo de N na área sem rotação. Houve redução no acúmulo de N no ponteiro com o aumento nas doses de N somente na área com rotação (Tabela 5). Por outro lado, não foi detectada diferença significativa para acúmulo de N na planta inteira em função dos tratamentos.

O N na planta proveniente do fertilizante (NPPF %) não foi alterado pelo manejo da rotação em nenhum dos compartimentos da planta (Tabela 5). Por outro lado, as doses de N afetaram o NPPF no colmo, folha seca, ponteiro e na planta toda. Em todos estes compartimentos, o NPPF foi maior nas doses de 120 e 180 kg ha^{-1} quando comparados à dose de 60 kg ha^{-1} N (Tabela 5). Por outro lado, não houve diferença significativa de NPPF entre as doses de 120 e 180 kg ha^{-1} N.

Para a QNPPF (kg ha^{-1}), também foi observada diferença entre as doses de N, porém não entre os manejos de rotação. No colmo, o QNPPF seguiu a ordem $180 > 120 > 60 \text{ kg ha}^{-1}$ N, enquanto nos demais compartimentos não houve diferença entre as doses de 120 e 180 kg ha^{-1} N. Na planta toda, o QNPPF foi de 19,3, 33,2 e $45,0 \text{ kg ha}^{-1}$ respectivamente para as doses de 60, 120 e 180 kg ha^{-1} N (Tabela 5).

Como esperado, a RNP apresentou resultados variados em comparação ao QNPPF, uma vez que para o cálculo da RNP considera-se o acúmulo de N na planta e a dose de N aplicada. Da mesma forma ao observado para QNPPF, o manejo de rotação também não afetou a RNP (Tabela 5). A RNP somente foi afetada pelas doses de N nos compartimentos folha seca, ponteiro e planta toda. No colmo, que foi o compartimento que alocou a maior quantidade de QNPPF, não houve diferença entre as doses de N na RNP. Por outro lado, na folha seca a RNP diminuiu com o aumento das doses de N, enquanto que no ponteiro a dose de 180 kg ha^{-1} N apresentou menor RNP quando comparados às doses de 60 e 120 kg ha^{-1} N. Para a planta toda, a RNP foi muito próxima para as doses de 120 e 180 kg ha^{-1} N, variando de 25 a 28%, porém ambas foram inferiores à RNP observada na dose de 60 kg ha^{-1} N, que foi de 32% (Tabela 5).

Tabela 5. Acúmulo de N, N na planta proveniente do fertilizante (NPPF, % e QNPPF, kg ha⁻¹) e recuperação do N-fertilizante pela planta (RNP)¹.

(continua)

Dose N				Rotação de cultura											
kg ha ⁻¹	Com	Sem	Média				Com	Sem	Média				Com	Sem	Média
	Colmo			Folha seca			Ponteiro			Planta toda					
N-total (kg ha ⁻¹)															
0	80,3	71,5	75,9		27,9	27,5	27,7	54,9	aA	36,3	B	45,6	163,2	135,4	149,3
60	81,2	79,8	80,5		26,2	27,7	27,0	45,1	ab	39,7		42,4	152,6	147,2	149,9
120	78,8	85,8	81,8		26,9	30,8	28,6	47,8	a	44,5		46,4	153,4	161,1	156,7
180	90,2	95,1	92,6		23,6	28,1	25,8	33,4	bB	45,6	A	39,5	147,1	168,9	158,0
Média	82,6	82,9			26,1	B	28,4	A		45,3		41,4	154,1	152,6	
P _{rotação}	0,962				0,092				0,176				0,847		
P _{dose N}	0,151				0,457				0,333				0,774		
P _{rotação*dose N}	0,779				0,551				0,009				0,161		
NPPF (%)															
60	11,3	11,5	11,4	b	12,4	15,2	13,8	b	10,6	9,6	10,1	b	11,4	12,1	11,8
120	23,9	18,5	21,6	a	23,5	20,4	22,2	a	21,2	18,2	19,9	a	22,9	19,0	21,2
180	30,1	26,6	28,3	a	26,4	23,9	25,1	a	23,3	23,4	23,4	a	26,6	24,6	25,6
Média	21,7	18,9			20,8	19,8			18,4	17,1			20,3	18,6	
P _{rotação}	0,154				0,641				0,378				0,221		
P _{dose N}	<0,001				0,003				<0,001				<0,001		
P _{rotação*dose N}	0,726				0,443				0,708				0,480		

Tabela 5. Acúmulo de N, N na planta proveniente do fertilizante (NPPF, % e QNPPF, kg ha⁻¹) e recuperação do N-fertilizante pela planta (RNP)¹.

(conclusão)

Dose N				Rotação de cultura												
kg ha ⁻¹	Com	Sem	Média		Com	Sem	Média		Com	Sem	Média		Com	Sem	Média	
	Colmo				Folha seca				Ponteiro				Planta toda			
QNPPF (kg ha ⁻¹)																
60	10,5	9,3	9,9	c	3,9	5,2	4,5	b	5,5	4,1	4,8	b	19,9	18,6	19,3	b
120	17,9	16,7	17,4	b	6,4	6,7	6,5	a	9,6	8,7	9,2	a	34,0	32,1	33,2	ab
180	30,7	26,6	28,6	a	6,5	7,5	7,0	a	8,3	10,5	9,4	a	45,4	44,6	45,0	a
Média	19,7	17,5			5,6	6,5			7,8	7,8			33,1	31,8		
P _{rotação}	0,313				0,176				0,544				0,684			
P _{dose N}	<0,001				0,004				<0,001				<0,001			
P _{rotação*dose N}	0,982				0,589				0,106				0,992			
RNP (%)																
60	17,5	15,5	16,5		6,5	8,6	7,6	a	9,1	6,9	8,0	a	33,2	31,0	32,1	a
120	15,0	13,9	14,5		5,3	5,6	5,5	b	8,0	7,2	7,7	a	28,3	26,8	27,6	b
180	17,1	14,8	15,9		3,6	4,2	3,9	c	4,6	5,8	5,2	b	25,2	24,8	25,0	b
Média	16,5	14,7			5,2	6,1			7,3	6,6			28,9	27,5		
P _{rotação}	0,602				0,145				0,331				0,565			
P _{dose N}	0,586				<0,001				0,008				0,066			
P _{rotação*dose N}	0,950				0,563				0,113				0,927			

¹Letras minúsculas distintas indicam diferença entre a dose de N e letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre os manejos de rotação pelo teste de Tukey (P < 0,10).

2.3.2. Recuperação do ^{15}N -fertilizante na palha (RNPa)

A biomassa de palha foi $0,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ superior na área com rotação em relação à área sem rotação ($P < 0,10$, Tabela 6). Entre os tratamentos, a maior quantidade de palha foi obtida na dose de $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$, a qual foi $1,7$, $1,4$ e $0,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ maior do que a dose de 120 e $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ e o controle, respectivamente. Tais valores foram influenciados, principalmente, pela palha fina (Pf), fração que também apresentou diferença estatística entre as áreas e os tratamentos ($P < 0,10$) (Tabela 6). A área com rotação apresentou $0,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ a mais de Palha fina do que sem rotação. Ao comparar os tratamentos, a dose de $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ e o controle apresentaram quantidades semelhantes de palha, $3,3$ e $2,9 \text{ Mg ha}^{-1}$, as quais são, na média, 1 e $0,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ maior do que a dose de 120 e $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$. A biomassa seca da palha grossa não apresentou diferença estatística entre as áreas e os tratamentos, obtendo valor médio de $1,85 \text{ Mg ha}^{-1}$.

A variação no acúmulo de N na palha seguiu os padrões mencionados anteriormente, nos quais a palha apresentou diferença estatística entre as áreas e os tratamentos, assim como a Palha fina ($P < 0,10$) (Tabela 6). A área com rotação apresentou $9,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ a mais na palha do que a área sem rotação. No tratamento com $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$, o acúmulo de N na palha foi $25,4$, $21,2$ e $14,5 \text{ kg ha}^{-1}$ superior aos tratamentos com 120 , 60 e $0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$, respectivamente. A Palha fina variou da mesma maneira que a palha total, na qual a área com rotação apresentou $6,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ a mais do que a área sem rotação, e a dose de $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ foi $17,3$, $13,9$ e $9,1 \text{ kg ha}^{-1}$ maior do que a dose de 120 , $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ e o controle, respectivamente. Na palha grossa o acúmulo de N não apresentou diferença em nenhum dos fatores analisados, com acúmulo médio de $15,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de N.

O acúmulo de QNPalhaPF (kg ha^{-1}) apresentou interação entre os fatores de estudo ($P < 0,10$), sendo que o aumento da dose de N proporcionou maior acúmulo de N-fertilizante na palha, exceto na dose de $120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ na área sem rotação. Nessa área, o acúmulo de QNPalhaPF na dose de $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ foi $1,2 \text{ kg ha}^{-1}$ superior à dose de $120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ e $3,0 \text{ kg ha}^{-1}$ inferior à dose de $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$. O acúmulo de QNPfPF também apresentou interação entre os fatores. Ao comparar as áreas, a área com rotação apresentou menor valor de QNPfPF na dose de $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$, maior valor na dose de $120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ e valor semelhante à dose de $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$. Analisando os tratamentos dentro de cada área, as doses de 60 e $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ apresentaram maiores valores de QNPfPF na área sem rotação, $1,1$ e $2,8 \text{ kg ha}^{-1}$ a mais do que o valor obtido na dose de $120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$. Na área com rotação o QNPfPF foi

semelhante para as doses de 60 e 120 kg ha⁻¹ N. Na dose de 180 kg ha⁻¹ N, o QNPfPF foi 2,8 e 3,6 kg ha⁻¹ superior do que as doses de 120 e 60 kg ha⁻¹ N, respectivamente. Na Palha grossa o acúmulo de N foi 0,6 kg ha⁻¹ superior na área com rotação, sendo a dose 180 kg ha⁻¹ N a que proporcionou maior acúmulo de N-fertilizante, 1,6 kg ha⁻¹ a mais do que as demais doses.

A recuperação de N na palha (RNPa%) foi de 3,3%, valor baixo considerando a grande quantidade de palha depositada sobre o solo após a colheita da cana-de-açúcar (16,3 Mg ha⁻¹). A RNPa% apresentou interação entre os fatores estudados ($P < 0,10$) (Tabela 6). Na área com rotação a RNPa não apresentou diferença para doses de N, enquanto na área sem rotação a dose 120 kg ha⁻¹ N apresentou a menor RNPa, 2 e 3,4% inferior quando comparado às doses de 180 e 60 kg ha⁻¹ N, as quais são semelhantes estatisticamente. Nos tratamentos apenas a dose 120 kg ha⁻¹ N apresentou diferença entre as áreas, na qual a área com rotação apresentou, aproximadamente, RNPa duas vezes maior do que na área sem rotação.

Tabela 6. Biomassa seca, acúmulo de N, N na palha proveniente do fertilizante (NPalhaPF, % e QNPalha, kg ha⁻¹), e recuperação do N-fertilizante na palha (RNPa) para as duas frações de palha avaliadas¹.

(continua)

Dose N				Rotação de cultura													
kg ha ⁻¹	Com		Sem		Média	Com		Sem		Média	Com		Sem		Média		
	Palha Fina				Palha Grossa				Palha total								
Biomassa seca (Mg ha ⁻¹)																	
0	3,4		2,4		2,9	a	2,0		1,6		1,8	5,4		4,0		4,7	ab
60	2,5		2,4		2,5	ab	1,7		1,6		1,7	4,3		4,0		4,1	ab
120	2,4		1,8		2,1	b	1,9		1,4		1,7	4,3		3,3		3,8	b
180	3,6		2,9		3,3	a	2,4		2,1		2,2	6,0		5,0		5,5	a
Média	3,0	A	2,4	B			2,0		1,7			5,0	A	4,1	B		
P _{rotação}					0,014								0,029				
P _{doseN}					0,010								0,032				
P _{rotação*doseN}					0,563								0,762				
N-total (kg ha ⁻¹)																	
0	35,9		22,5		29,2	ab	16,7		13,3		15,0	52,5		35,8		44,2	ab
60	24,1		24,7		24,4	b	13,7		12,7		13,2	37,8		37,3		37,5	b
120	24,3		16,5		21,0	b	14,2		9,9		12,4	38,5		26,5		33,3	b
180	42,4		34,2		38,3	a	22,3		18,5		20,4	64,7		52,7		58,7	a
Média	31,7	A	25,0	B			16,7		13,9			48,4	A	38,9	B		
P _{rotação}					0,028								0,051				
P _{doseN}					0,005								0,012				
P _{rotação*doseN}					0,477								0,692				
NPalhaPF (%)																	
60	4,4	bB	7,8	aA	6,1		6,4		6,6		6,5	b	5,4	b	7,2	ab	6,3
120	8,4	aA	5,0	bB	7,0		10,4		7,9		9,3	ab	9,4	aA	6,5	bB	8,1
180	10,6	a	10,3	a	10,4		13,4		11		12,2	a	12	a	10,6	a	11,3
Média	7,8		7,7				10		8,5			8,9		8,1			
P _{rotação}					0,717								0,537				
P _{doseN}					0,001								0,002				
P _{rotação*doseN}					0,004								0,070				
QNPalhaPF (kg ha ⁻¹)																	
60	1,1	bB	1,9	aA	1,5		0,9		0,8		0,9	b	2,0	c	2,7	b	2,4
120	1,9	bA	0,8	bB	1,4		1,4		0,7		1,1	b	3,3	bA	1,5	cB	2,5
180	4,7	a	3,6	a	4,2		3,0		2,1		2,6	a	7,7	a	5,7	a	6,7
Média	2,6		2,1				1,8	A	1,2	B		4,3		3,3			
P _{rotação}					0,389								0,167				
P _{doseN}					<0,001								<0,001				
P _{rotação*doseN}					0,025								0,026				

Tabela 6. Biomassa seca de palha, acúmulo de N na palha, N na palha proveniente do fertilizante (NPalhaPF, % e QNPalhaPF, kg ha⁻¹), e recuperação do N-fertilizante na palha (RNPa) para as duas frações de palha avaliadas¹.

(conclusão)

Dose N		Rotação de cultura													
kg ha ⁻¹	Com		Sem		Média	Com		Sem		Média	Com		Sem		Média
	Palha Fina					Palha Grossa					Palha total				
RNP _a (%)															
60	1,8	B	3,2	aA	2,5	1,5	1,4	1,4	a	3,3	4,6	a	3,9		
120	1,6	A	0,7	bB	1,2	1,2	0,6	0,9	b	2,8	A	1,2	bB	2,1	
180	2,6		2,0	a	2,3	1,7	1,2	1,4	a	4,3	3,2	a	3,7		
Média	2,0		2,0			1,4	A	1,0	B	3,4	3,0				
P _{rotação}			0,432					0,075					0,112		
P _{doseN}			0,007					0,061					0,008		
P _{rotação*doseN}			0,026					0,414					0,045		

¹Letras minúsculas distintas indicam diferença entre a dose de N e letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre os manejos de rotação pelo teste de Tukey (P < 0,10)

2.3.3. Recuperação do ¹⁵N-fertilizante no solo (RNS)

Na área sem rotação as doses de N não proporcionaram diferenças no estoque de N-total no solo e nas camadas. Na área com rotação, apenas a dose de 120 kg ha⁻¹ N apresentou menor estoque de N total, sendo os demais tratamentos estatisticamente semelhantes (Tabela 7). Na camada de 0,1 - 0,2 m o mesmo comportamento foi encontrado, sendo que a dose de 120 kg ha⁻¹ N apresentou cerca de 321,5 kg ha⁻¹ N a menos do que os demais tratamentos. Na camada de 0,2 - 0,4 m outras diferenças ocorreram entre os tratamentos, sendo que o controle e a dose 180 kg ha⁻¹ N apresentaram os maiores estoques de N, seguidos pela dose de 60 e de 120 kg ha⁻¹ N. A camada de 0,0 - 0,1 m apresentou diferença estatística para N-total apenas entre os tratamentos, sem diferença entre os manejos de rotação. As doses de 60 e 180 kg ha⁻¹ N apresentaram os maiores estoques de N no solo, superior ao estoque observado na dose de 120 kg ha⁻¹ N. Dessa maneira, houve variação nos estoques de N nas camadas de solo, porém no acumulado nas três camadas praticamente não houve diferença entre as doses de N e manejo de rotação.

A variável QNSPF (kg ha⁻¹) apresentou interação entre os fatores de estudo no solo (somatório das camadas), e na camada 0,2 – 0,4 m (P<0,10) (Tabela 7). Em ambas as áreas, com e sem rotação de cultura, o aumento da dose de N-fertilizante proporcionou incremento no QNSPF. Na área com rotação as doses de 60 e 120 kg ha⁻¹ N apresentaram valores semelhantes de QNSPF, os quais são 51 kg ha⁻¹ menor do que a dose de 180 kg ha⁻¹ N. Na área sem rotação o QNSPF na dose de 120 kg ha⁻¹ N foi semelhante ao QNSPF das doses de

60 e 180 kg ha⁻¹ N, as quais diferem entre si em 21 kg ha⁻¹. O mesmo comportamento foi observado na última camada, contudo em proporções menores. Na camada 0,0 – 0,1 e 0,1 – 0,2 m, as quais apresentaram diferença apenas entre os tratamentos, a média de QNSPF é maior com o aumento da dose de N-fertilizante, como observado anteriormente dentro de cada manejo de rotação. O QNSPF na dose de 120 kg ha⁻¹ N foi semelhante ao observado nas doses de 60 e de 180 kg ha⁻¹ N, os quais diferem entre si em 18,1 e 7,4 kg ha⁻¹ na primeira e na segunda camada, respectivamente.

A RNS foi de 45 e 43% na área com e sem rotação de cultura, respectivamente ($P < 0,10$) (Tabela 7). Na área com rotação, os tratamentos com 60 e 180 kg ha⁻¹ N apresentaram RNS cerca de 17% superior à dose de 120 kg ha⁻¹ N. Na área sem rotação, a dose de 60 kg ha⁻¹ N apresentou maior RNS, cerca de 14 e 26% superior aos tratamentos com 120 e 180 kg ha⁻¹ N, respectivamente. A camada 0,2 – 0,4 m também apresentou interação entre os fatores, sendo o comportamento semelhante ao observado para a camada 0,0 – 0,4 m, mas em proporções menores uma vez que a RNS de 0,2 – 0,4 m foi 12 e 10% na área com e sem rotação de cultura, respectivamente. A RNS não variou entre os manejos nas camadas 0,0 – 0,1 e 0,1 – 0,2 m, porém houve diferença para doses de N. Na camada 0,0 – 0,1 m, a dose de 60 kg ha⁻¹ N apresentou maior RNS, cerca de 8,3% superior às demais doses de N. Por outro lado, na camada 0,1 – 0,2 m a dose de 120 kg ha⁻¹ N apresentou RNS semelhante à obtida na dose de 60 kg ha⁻¹ N, a qual diferiu apenas da dose de 180 kg ha⁻¹ N.

Tabela 7. Estoque de N total, N no solo proveniente do fertilizante (NSPF, % e QNSPF, kg ha⁻¹) e recuperação do N-fertilizante no solo (RNS)¹.

(continua)

Dose N					Rotação de cultura																			
kg ha ⁻¹	Com		Sem		Média	Com		Sem		Média	Com		Sem		Média	Com		Sem		Média				
	0,0 – 0,1 m					0,1 – 0,2 m					0,2 – 0,4 m					0,0 – 0,4 m								
N-total (kg ha ⁻¹)																								
0	2444		2441		2442	ab	2048		2891		2470		3943	aA	2562	B	32523		8435	a	7894		8165	
60	2571		2885		2728	a	2007	a	2227		2117		3046	bc	2844		2945		7624	a	7956		7790	
120	2242		2392		2306	b	1710	bB	2086	A	1871		2539	cB	3087	A	2774		6491	bB	7565	A	6951	
180	2790		2808		2799	a	2040	a	2002		2021		3388	ab	3085		3236		8218	a	7895		8057	
Média	2521		2679				1937		2228				3127		2931				7586		7837			
P _{rotação}	0,103					0,003					0,127					0,162								
P _{doseN}	0,005					0,032					0,037					0,001								
P _{rotação*doseN}	0,338					0,080					0,001					0,008								
NSPF (%)																								
60	0,6	b	0,6	b	0,6		0,4		0,3		0,4	c	0,3	b	0,3	b	0,3		0,4		0,4		0,4	b
120	0,9	b	1,2	a	1,0		0,5		0,6		0,6	b	0,4	b	0,4	ab	0,4		0,6		0,7		0,7	a
180	1,5	aA	1,0	aB	1,2		0,9		0,6		0,7	a	0,8	aA	0,5	aB	0,6		1,1		0,7		0,9	a
Média	1,0		0,9				0,6		0,5				0,5		0,4				0,7		0,6			
P _{rotação}	0,404					0,388					0,005					0,382								
P _{doseN}	<0,001					0,021					<0,001					<0,001								
P _{rotação*doseN}	0,070					0,531					<0,001					0,162								

Tabela 7. Estoque de N total, N no solo proveniente do fertilizante (NSPF, % e QNSPF, kg ha⁻¹) e recuperação do N-fertilizante no solo (RNS)¹.

(conclusão)

Dose N				Rotação de cultura												
	Com	Sem	Média		Com	Sem	Média		Com	Sem	Média		Com	Sem	Média	
kg ha ⁻¹	0,0 – 0,1 m				0,1 – 0,2 m				0,2 – 0,4 m				0,0 – 0,4 m			
QNSPF (kg ha ⁻¹)																
60	16,5	17,2	16,9	b	7,5	7,7	7,6	b	7,8	b	8,5	b	8,2	31,8	b	32,7
120	21,1	28,2	24,1	ab	9,4	11,6	10,3	ab	9,8	b	10,8	ab	10,3	40,3	b	44,7
180	41,8	28,1	35,0	a	17,9	12,1	15,0	a	27,2	aA	14,2	aB	20,7	87,0	aA	70,7
Média	26,5	24,5			11,6	10,5			14,9		11,2			53,0		
P _{rotação}	0,726				0,902				0,029				0,807			
P _{doseN}	0,004				0,023				<0,001				<0,001			
P _{rotação*doseN}	0,109				0,339				0,001				0,007			
RNS (%)																
60	27,5	28,7	28,1	a	12,5	12,9	12,7	a	13,1	a	14,2	a	13,6	53,0	a	54,4
120	17,6	23,5	20,1	b	7,8	9,7	8,6	ab	8,2	b	9,0	b	8,5	33,6	b	37,3
180	23,2	15,6	19,4	b	10,0	6,7	8,3	b	15,1	aA	7,9	bB	11,5	48,3	aA	39,3
Média	22,8	22,6			10,1	9,8			12,1		10,4			45,0		
P _{rotação}	0,927				0,841				0,143				0,529			
P _{doseN}	0,028				0,070				0,006				0,003			
P _{rotação*doseN}	0,177				0,497				0,012				0,027			

¹ Letras minúsculas distintas indicam diferença entre as doses de N e letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre os manejos de rotação pelo teste de Tukey (P < 0,10).

2.3.4. Balanço do ^{15}N -fertilizante no sistema solo-planta-palha

No presente experimento a recuperação do N-fertilizante no sistema solo-planta-palha foi de 77,3 e 73,5% na área com e sem rotação de cultura, respectivamente (Figura 5). A quantidade de N que não foi recuperada pelos compartimentos da cana-de-açúcar ou pelo solo considerou-se como N não contabilizado, o qual foi, na média, 25% do total de N-fertilizante aplicado. O solo foi o compartimento que apresentou maior RNS, que variou de 45 e 43% na área com rotação e sem rotação, respectivamente. A RNP foi de 28,9 e 27,6% na área com e sem rotação, respectivamente. Diferente do esperado, a RNPa foi baixa e variou de 3,4 a 3,2% na área com e sem rotação de cultura, respectivamente.

A menor recuperação do N-fertilizante ocorreu nas doses de 120 e 180 kg ha⁻¹ N. O solo foi o compartimento analisado que apresentou maior variação na recuperação do N-fertilizante a qual diminuiu, na área sem rotação, com o aumento da dose de adubo nitrogenado ($P < 0,10$).

Figura 5. Balanço do N-fertilizante no sistema solo-planta-palha na área com (A) e sem (B) rotação de cultura na renovação do canavial. Não houve diferença estatística entre as áreas pelo teste de Tukey ($P < 0,10$).

Figura 6. Balanço do N-fertilizante no sistema solo-planta-palha em função da rotação de culturas e doses de N. Letras minúsculas distintas indicam diferença entre a dose de N e letras maiúsculas distintas indicam diferença entre o manejo de rotação pelo teste de Tukey ($P < 0,10$).

2.3.5. Atributos tecnológicos da cana-de-açúcar

Os atributos tecnológicos não apresentaram interação entre o manejo de rotação e doses de N, assim como também não houve diferença entre a média dos tratamentos ($P < 0,10$) (Tabela 8), exceto para o teor de sólidos solúveis (Brix), de açúcares redutores (AR) e de fibra. O Brix e o AR foram 4 e 9% maiores, respectivamente, na área sem rotação. A fibra, diferente dessas variáveis, apresentou maior valor na área com rotação, com teor 2% superior a área sem rotação. O ATR, açúcares totais recuperáveis, a Pol, teor de sacarose, e a produção de açúcar por hectare, TPH, não foram alteradas pelo manejo da rotação e pela dose de N

Tabela 8. Atributos tecnológicos do colmo da cana-de-açúcar obtidos na colheita da 2ª soqueira (maio de 2016)¹.

Dose N	Rotação de cultura											
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
kg ha ⁻¹	ATR (kg t ⁻¹)			Brix (%)			Fibra (%)			Pol (%)		
0	122,3	133,2	127,8	14,7	15,9	15,3	10,9	10,8	10,8	12,0	13,2	12,6
60	119,1	118,5	118,8	14,5	14,5	14,5	10,8	10,7	10,7	11,7	11,6	11,6
120	125,5	130,9	128,2	15,0	15,8	15,4	10,9	10,8	10,8	12,4	12,9	12,6
180	127,4	131,3	129,3	15,0	15,5	15,3	10,9	10,5	10,7	12,6	13,0	12,8
Média	123,6	128,5		14,8 B	15,4 A		10,9 A	10,7 B		12,2	12,7	
P_{rotação}		0,149			0,085			0,046			0,160	
P_{doseN}		0,122			0,221			0,345			0,119	
P_{rotação*doseN}		0,673			0,662			0,487			0,663	
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
	Açúcar redutor (%)			Umidade (%)			Pureza (%)			TPH (Mg ha ⁻¹)		
0	1,1	1,2	1,2	74,5	73,3	73,9	81,7	83,0	82,3	17,3	16,3	16,8
60	1,1	1,1	1,1	74,8	74,9	74,8	80,6	80,2	80,4	15,7	14,8	15,2
120	1,1	1,2	1,2	74,1	73,5	73,8	82,5	82,0	82,2	16,6	16,8	16,7
180	1,1	1,2	1,2	72,9	74,0	73,4	84,2	83,7	83,9	15,3	17,7	16,5
Média	1,1 B	1,2 A		74,1	73,9		82,3	82,2		16,2	16,4	
P_{rotação}		0,086			0,765			0,947			0,854	
P_{doseN}		0,777			0,221			0,103			0,591	
P_{rotação*doseN}		0,616			0,400			0,873			0,523	

¹Letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre o sistema de manejo do solo, com e sem rotação de cultura, pelo teste de Tukey, com P < 0,10.

2.4. Discussão

2.4.1. Recuperação do ^{15}N -fertilizante pela cana-de-açúcar (RNP)

A biomassa de colmos variou de 121 a 143 Mg ha^{-1} na área experimental (Tabela 4). Esta produtividade de colmos pode ser considerada elevada se considerado que o experimento foi conduzido em ciclo de 2ª soqueira. A elevada produtividade pode estar relacionada à condições climáticas adequadas durante o ciclo, ao vigor de soqueira considerando a elevada produtividade obtida no ciclo anterior (Tabela 3) e condições químicas e físicas do solo que potencializaram o acúmulo de biomassa. De fato, o solo da área experimental apresenta elevada fertilidade em todo perfil do solo (Tabela 1), possibilitando obtenção de maiores produtividades de soqueira (Landell *et al.*, 2003). O plantio direto adotado na implantação do canavial também pode ter contribuído para a elevada produtividade. O plantio direto, apesar de pouco adotado em cana-de-açúcar, preserva a estrutura do solo, melhora a capacidade de infiltração e armazenamento de água, aumenta a penetração e desenvolvimento do sistema radicular e o aporte de matéria orgânica (Boddey *et al.*, 2010; Cerri *et al.*, 2007; Zotarelli *et al.*, 2012), podendo resultar em ganhos de produtividade quando comparados ao sistema convencional.

A rotação de culturas não aumentou a produção de biomassa de colmos no presente estudo (Tabela 4). Entretanto, no ano anterior à implantação do experimento, a rotação de culturas proporcionou ganhos de produtividade quando comparado à área sem rotação, com produtividades de 163,3 e de 150,2 Mg ha^{-1} , respectivamente (Tenelli, 2016). Diversos estudos relatam ganhos de produtividade de soqueiras em áreas manejadas sob rotação de culturas (Ambrosano *et al.*, 2011a; Caceres & Alcarde, 1995; Sánchez, 2017; Tenelli, 2016). No presente experimento, a estatística não evidência que as elevadas doses de N em associação à rotação de cultura diminuíssem a biomassa de colmos e da planta toda (Tabela 4), resultando em produtividade semelhante na área manejada com ou sem rotação de cultura.

As doses de N impactaram negativamente a produtividade de colmos na área com rotação e não afetaram a produtividade de colmos na área sem rotação (Tabela 4). Resultado semelhante foi obtido por Bell *et al.* (2003), que observou queda na produtividade de colmos com fornecimento de N em área manejada sob plantio direto e plantio de adubo verde. No presente experimento, a queda de produtividade com as doses de N na área com rotação podem estar associadas ao excesso de N fornecido pelo fertilizante e pelo resíduo vegetal da crotalaria. Na área sem rotação também não houve resposta à adubação nitrogenada. Apesar

de ser bem aceito que a soqueira da cana-de-açúcar responde à adubação nitrogenada (Cantarella *et al.*, 2007), estudos recentes tem demonstrado ausência de resposta em áreas de cana-crua (Mariano *et al.*, 2016; Nastaro-Boschiero, 2017; Otto *et al.*, 2016), especialmente em áreas manejadas previamente com plantio de leguminosas ou histórico de aplicação de resíduos orgânicos. De fato, o solo da área experimental apresenta elevado estoque de C e N total, o que pode ter reduzido a resposta à adubação nitrogenada, uma vez que o solo é a principal fonte de N para a cultura (Dourado-Neto *et al.*, 2010; Vieira-Megda *et al.*, 2015).

O incremento nas doses de N em cana-de-açúcar normalmente aumentam o acúmulo de N pela parte aérea da cultura, pois o aporte de N-inorgânico no sistema e condições ambientais que favoreçam o processo de mineralização aumentam a disponibilidade de N às plantas, favorecendo a absorção (Hajari *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2016). Entretanto, apesar de a quantidade relativamente elevada de N adicionado ao sistema por meio dos resíduos vegetais da crotalaria na renovação do canavial ($190 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$), a rotação de cultura não aumentou o acúmulo de N nos compartimentos da planta (Tabela 5). Na verdade, o acúmulo de N no ponteiro na área com rotação diminuiu com o aumento das doses de N, comprovando o possível efeito tóxico do excesso de N. Diferentemente do esperado, as doses de N também não promoveram aumento no acúmulo de N pela planta. Este resultado é um indicativo de que, nas condições do experimento, o estoque de N orgânico do solo pode ter suprido as plantas com quantidade suficiente de N independente da rotação de culturas ou dose de N aplicada (Vieira-Megda *et al.*, 2015).

A hipótese deste estudo era de que a rotação de cultura aumentaria a absorção do N-fertilizante pela soqueira de cana-de-açúcar. Entretanto, a rotação de cultura não aumentou o QNPPF em nenhum dos compartimentos da planta avaliados (Tabela 5). Somente houve efeito das doses de N, que proporcionaram aumento percentual (%) e absoluto (kg ha^{-1}) do NPPF em todos os compartimentos da planta. No presente estudo o NPPF variou de 12 a 26% pela planta toda, que foi superior aos 10% de NPPF observados no estudo de Gava *et al.* (2001) utilizando ureia como fonte de N. No estudo de Franco *et al.* (2011), o NPPF variou de 10 a 35% na colheita da soqueira, muito próximos aos valores observados neste estudo. Um fato importante é que a avaliação do NPPF no presente estudo foi realizada somente na colheita, quando normalmente a contribuição do N-fertilizante no total de N acumulado pela planta normalmente é baixo (Franco *et al.*, 2011; Vieira-Megda *et al.*, 2015).

A rotação de culturas também não afetou a RNP nos compartimentos da planta (Tabela 5). A RNP seguiu a ordem colmos > ponteiros > folha seca e, na planta toda, totalizou

cerca de 29% nas duas áreas. Ou seja, o efeito da rotação de culturas em disponibilizar N à cultura subsequente reduzindo a demanda de fertilizantes nitrogenados, como observado por *Park et al.* (2010), está mais relacionado ao N fornecido por meio da mineralização dos resíduos vegetais da leguminosa do que propriamente ao aumento na RNP em áreas anteriormente submetidas à rotação de culturas.

As doses de N influenciaram mais a RNP do que a rotação de cultura. Apesar do aumento do NPPF e QNPPF promovido pelas doses de N, houve redução da RNP com o aumento das doses (Tabela 5). Considerando a planta toda, a RNP foi de 32% para a dose de 60 kg ha⁻¹ N, superior à RNP observada para as doses de 120 e 180 kg ha⁻¹ N, que foi respectivamente de 28 e 25%. *Franco et al.* (2008) e *Hajari et al.* (2017) também observaram redução na RNP com o aumento das doses de N em cana-de-açúcar. O valor de RNP observado neste estudo é muito próximo à média de 26% de RNP observada na revisão de *Otto et al.* (2016). Como não houve aumento na produção de biomassa com o aumento das doses de N (Tabela 4), os resultados deste estudo indicam que não há vantagem em aumentar a dose de N se não houver ganho de produtividade, uma vez que há uma relação direta entre aumento nas doses de N e emissões ou perdas de N-fertilizantes para o ambiente (*Erisman et al.*, 2010).

2.4.2. Recuperação do ¹⁵N-fertilizante na palha (RNPa)

A palha, ao longo do ciclo da cana-de-açúcar, passa por processo de decomposição, reduzindo a quantidade de biomassa, disponibilizando nutrientes para a cultura e diminuindo a relação C/N (*Fortes et al.*, 2012). A taxa média de decomposição, após 12 meses do resíduo vegetal presente no campo, varia de 22 a 70% no Brasil, podendo alcançar redução na biomassa de 98% na Austrália (*Fortes et al.*, 2011; *Robertson & Thorburn*, 2007). Na colheita da primeira soqueira, a biomassa seca de palha era de 16,6 Mg ha⁻¹ e reduziu para 4,5 Mg ha⁻¹ na média das duas áreas (Tabela 6), ou seja, redução de 69% durante um ano no campo, o que está de acordo com evidências da literatura.

A biomassa de palha fina foi maior na área com rotação (3,0 Mg ha⁻¹) do que na área sem rotação (2,4 Mg ha⁻¹). A biomassa de palha total também foi maior na área com rotação, cerca de 0,9 Mg ha⁻¹ superior quando comparado à área sem rotação (Tabela 6). Devido à maior produção de biomassa, o N acumulado na palha também foi superior na área com rotação do que na área sem rotação. Estes resultados podem estar associados à maior produção de biomassa da parte aérea na área com rotação no ano anterior à instalação do

experimento (Tabela 3), que resultou na maior quantidade de palha depositada sobre o solo. O incremento na dose de N também proporcionou aumento na biomassa de palha total, assim como no acúmulo de N na palha fina e na palha total (Tabela 6), o que também está associado à maior produção de biomassa da parte aérea nos tratamentos com maior dose de N no ano anterior à instalação do experimento (Tenelli, 2016).

Apesar da rotação de cultura ter aumentado a quantidade de palha depositada sobre o solo, assim como a quantidade de N acumulado na palha, ela praticamente não influenciou o NP_aPF. Ou seja, o N adicionado ao sistema por meio dos resíduos da crotalaria parece não interferir na imobilização do N-fertilizante na palha da cana-de-açúcar. Efeito muito mais significativo no NP_aPF foi observado para doses de N, tanto em termos percentuais (%) como absoluto (kg ha^{-1}) (Tabela 6), indicando que o aumento na dose de N aumenta a imobilização do N-fertilizante na palha da cana-de-açúcar. Apesar dos valores relativamente elevados de QNP_aPF, que variou de 2,0 a 7,7 kg ha^{-1} na palha total na média das áreas, quando consideradas as doses de N-fertilizantes aplicadas, observa-se que a RN_aP (que refere-se à imobilização do N-fertilizante pela palha) foi limitada. Do total de N-fertilizante aplicado no início do ciclo de segunda soqueira, somente 2,0 e 1,2% foi imobilizado na fração palha fina e na fração palha grossa, respectivamente, resultando em RN_aP médio de 3,2% na fração de palha total. Trivelin *et al.* (2002) observou RN_aP de 15% quando solução de ureia foi aplicada juntamente com vinhaça e de 12% quando foi aplicada sem vinhaça. Gava *et al.* (2001) obtiveram RN_aP de 8%, também utilizando ureia como fonte de N, em contraste com o nitrato de amônio utilizado no presente estudo. Pode ser que a ureia seja mais imobilizada pelos microrganismos do que o nitrato de amônio, uma vez que há preferência de absorção de amônio frente a nitrato pelos microrganismos do solo (Meier *et al.*, 2006; Romero *et al.*, 2015).

A baixa RN_aP observada neste estudo é um indicativo de que a imobilização do N-fertilizante pela palha da cana-de-açúcar pode ser mais baixa do que se espera, possivelmente pela baixa qualidade do resíduo vegetal adicionado ao solo. Vieira-Megda *et al.* (2015) observou imobilização mais significativa do N-fertilizante quando aplicado sobre palha de cana-de-açúcar, porém em estudo de incubação em laboratório que utilizou palha finamente moída, situação diferente da observada em condições de campo. O resultado do presente estudo contradiz o atual interesse dos produtores pelo aumento na dose de N-fertilizante em áreas de cana-crua para compensar possível imobilização do N-fertilizante. Esta descoberta vai ao encontro às observações de Otto *et al.* (2016), de que parece não ser viável o aumento

nas doses de N em áreas de cana-crua em condições brasileiras, uma vez que não há ganho de produtividade com o N adicional aplicado.

2.4.3. Recuperação do ^{15}N -fertilizante no solo (RNS)

Apesar de a quantidade relativamente elevada de N adicionado ao solo pelo resíduo da crotalária ($190 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$), não houve modificação no estoque de N total no solo que variou de 7.600 a 7.800 kg ha^{-1} até $0,4 \text{ m}$ (Tabela 7). Em curto prazo, o plantio de leguminosas em rotação aumenta a disponibilidade do N no solo (Pereira, 2015), porém este aumento não foi verificado em termos de estoque de N total. O aumento na disponibilidade de N às plantas, assim como adição de material vegetal com baixa relação C/N (Ambrosano *et al.*, 2011b, 2003; Ambrosano *et al.*, 2013), poderia resultar em menor imobilização do N-fertilizante no solo nas parcelas previamente manejadas com rotação. Porém, a RNS não variou entre o manejo de rotação e foi, em média, de 23% na camada $0-0,2$, 10% na camada $0,1-0,2 \text{ m}$ e 11% na camada $0,2-0,4 \text{ m}$, totalizando 44% até $0,4 \text{ m}$ (Tabela 7). Trivelin *et al.* (2002) observou RNS de 40% com aplicação incorporada de ureia em soqueira de cana-de-açúcar, muito próximo ao observado neste estudo. O valor obtido no presente estudo foi ligeiramente maior do que a média de 32% de imobilização do N-fertilizante observado na revisão de Otto *et al.* (2016) e de 16% no estudo de Nastaro-Boschiero (2017). O reservatório de N da MOS é uma importante fonte de N para a cana-de-açúcar, sendo a longo prazo mais importante do que o próprio N-fertilizante fornecido pelos fertilizantes minerais, que constituem uma fonte momentânea de N às plantas (Dourado-Neto *et al.*, 2010).

Houve redução da RNS com o aumento das doses de N (Tabela 7), um indicativo de que pode haver mobilidade do N-fertilizante para camadas mais profundas do solo quando a dose de N excede o requerimento nutricional (Ghiberto *et al.*, 2015; Sattolo, 2016). Diferente do esperado, a rotação de cultura aumentou a RNS na camada $0 - 0,4 \text{ m}$ na dose de $180 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ (Tabela 7), que foi de 48% na área com rotação e de 30% na área sem rotação. Esse comportamento indica que a rotação de cultura pode preservar o N-fertilizante em frações menos sujeitas à lixiviação, como imobilizado na biomassa microbiana e constituindo a MOS, reservas de N que podem ser utilizadas pela planta nos próximos ciclos (Dourado-Neto *et al.*, 2010; Hemwong *et al.*, 2009).

2.4.4. Balanço de ^{15}N -fertilizante no sistema solo-planta-palha

A recuperação do ^{15}N -fertilizante no sistema solo-palha-planta totalizou 77% na área com rotação e 74% na área sem rotação, ou seja, somente 25% do N-fertilizante não foram contabilizados no sistema. Conforme *Otto et al.* (2016), do total de N-fertilizante aplicado na cana-de-açúcar, 32% é imobilizado no solo, 26% é absorvido pela cultura e restante pode ser perdido por volatilização (19%), lixiviação (5,6%), desnitrificação (1,8%) ou outras perdas (16%). No presente estudo, não foi quantificado o ^{15}N -fertilizante acumulado nas raízes e compartimentos subterrâneos, que pode totalizar 1,5 a 7,0% do total (*Gava et al.*, 2005; *Megda*, 2013). As perdas de amônia por volatilização possivelmente foram mínimas, considerando que a fonte de N foi o nitrato de amônio aplicado sobre a palha (*Vitti et al.*, 2007). No presente estudo, o N não contabilizado deve ter sido perdido, possivelmente, pela emissão de amônia pela parte aérea dos vegetais, que pode totalizar até 50 kg ha⁻¹ de N (*Ng Kee Kwong & Deville*, 1994; *Trivelin et al.*, 1996; *Mattsson et al.*, 1998; *Mattsson & Schjoerring*, 2003). Uma parcela pequena também pode ter sido perdida por lixiviação e desnitrificação, apesar de não quantificada no estudo.

2.4.5. Análise tecnológica dos colmos

Os atributos tecnológicos da cana, principalmente a produção de açúcar no colmo (ATR, Brix e Pol), são pouco influenciados pelo manejo nutricional da cultura e do solo, sendo esses fatores determinados principalmente pela variedade, pelo clima e pelo desenvolvimento da cultura (*Resende et al.*, 2006). A cana-de-açúcar quando apresenta resposta à adubação nitrogenada influencia normalmente a produtividade, a qual depende do ambiente de produção, da fertilidade do solo no qual a cultura está sendo cultivada (*Leite*, 2016; *Otto et al.*, 2016). Essa pequena influência do sistema de manejo na produção de açúcar pôde ser verificada no experimento, uma vez que apenas o teor médio de Brix variou de acordo com a rotação de cultura, resultado relacionado com teor de fibra. Quando o colmo possui maior quantidade de fibra há a tendência de ocorrer menor acúmulo de sacarose nesse compartimento, pois as situações que favorecem o acúmulo de açúcar diferem das que proporcionam maior produção de fibra. Como exemplo pode ser mencionado o trabalho desenvolvido por *Bonnett et al.* (2006), no qual o aumento da temperatura proporcionou aumento no número de internódios e de fibra, causando diminuição na altura e no teor de sacarose da cana.

Ambrosano *et al.* (2011a) ao estudarem o plantio de adubos verdes (leguminosas) na renovação do canavial, demonstraram que a *C. juncea* favoreceu a produção de açúcar, Pol, e de colmos, TCH, ao longo de 5 cortes. Contudo, como já mencionado, a variação no teor de sacarose provavelmente ocorreu devido às condições climáticas ao longo do experimento, enquanto a maior TCH ocorreu devido à maior produção de biomassa dessa cultura de rotação e da maior disponibilização, ao longo do tempo, dos nutrientes extraídos do solo, sendo pequena a influência do sistema de manejo adotado (Ambrosano *et al.*, 2011b). Tenelli (2016) ao analisar a TCH, ATR e Pol da cana-de-açúcar em área com solo fértil e argiloso também apresentou favorecimento do uso de adubo verde, contudo em solo arenoso e de baixa fertilidade o resultado diferiu do anterior, sendo que o plantio de *C. spectabilis* proporcionou menor ATR e Pol. Nesse estudo também houve áreas que não apresentaram diferença entre rotação de cultura e pousio no 2º corte da cana. Dessa maneira, devido às variações obtidas no trabalho, a autora demonstra que os atributos tecnológicos relacionam-se mais com as condições climáticas do que com o sistema de manejo adotado.

A adubação nitrogenada pode, em certos casos, prejudicar o acúmulo de açúcar no colmo da cana, devido favorecer o crescimento da cultura, mas também pode diminuir o teor de fibra. O aumento no crescimento da cana-de-açúcar irá proporcionar internódios e plantas mais compridos diminuindo o teor de fibra ao diminuir a densidade da parede celular (Bonnett *et al.*, 2006; Tasso Júnior *et al.*, 2007). Dessa maneira, os atributos tecnológicos além de variarem com a condição climática ao longo do ciclo e no período de maturação da cana-de-açúcar, também são influenciados pelo desenvolvimento dos perfilhos (Prado & Pancelli, 2006). No experimento esse comportamento em relação ao teor de fibra não ocorreu ao comparar os tratamentos, sendo ATR e Fibra semelhantes entre o controle e as doses de N-fertilizante aplicado.

2.5. Conclusões

A rotação de cultura não aumentou a recuperação do N-fertilizante pela planta na segunda soqueira da cana-de-açúcar cultivada em sistema de plantio direto, da mesma maneira que não interferiu na imobilização do N-fertilizante no solo e na palha.

O plantio de *C. spectabilis* na renovação do canavial não interferiu na produtividade e produção de açúcar no colmo da 2ª soqueira de cana-de-açúcar em plantio direto.

A maior RNP foi obtida com a menor dose de nitrato de amônio, demonstrando poder reduzir a dose de fertilizante nitrogenado aplicado na cana-de-açúcar cultivada em PD.

Essa dose também apresentou a menor perda de N-fertilizante para o ambiente, comprovando que, nesse sistema, a redução da dose de N aplicada irá diminuir os problemas ambientais causados pelo uso excessivo de nitrogênio.

Referências

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO. ed. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome.
- Ambrosano, E.J., Cantarella, H., Ambrosano, G.M.B., Schammas, E.A., Dias, F.L.F., Rossi, F., Trivelin, P.C.O., Muraoka, T., Sachs, R.C.C., Azcón, R. (2011a): Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. *Bragantia* 70, 810–818.
- Ambrosano, E.J., Cantarella, H., Ambrosano, G.M.B., Schammas, E.A., Rossi, F., Trivelin, P.C.O., Muraoka, T., Sachs, R.C.C., Azcón, R., Teramoto, J.R.S. (2013): Crop rotation biomass effects on sugarcane yield, in: Biomassa Now - Cultivation and Utilization. InTech, pp. 3–32.
- Ambrosano, E.J., Trivelin, P.C.O., Cantarella, H., Ambrosano, G.M.B., Schammas, E.A., Muraoka, T., Rossi, F. (2011b): ¹⁵N-labeled nitrogen from green manure and ammonium sulfate utilization by the sugarcane ratoon. *Sci. Agric.* 68, 361–368.
- Ambrosano, E.J., Foltran, D.E., Camargo, M.S., Rossi, F., Schammas, E.A., Silva, E.C., Ambrosano, G.M.B., Dias, F.L.F. (2013): Acúmulo de biomassa e nutrientes por adubos verdes e produtividade da cana- planta cultivada em sucessão , em duas localidades de São Paulo, Brasil. *Rev. Bras. Agroecol.* 8, 199–209.
- Ambrosano, E.J., Trivelin, P.C.O., Cantarella, H., Ambrosano, G.M.B., Schammas, E.A., Guirado, N., Rossi, F., Mendes, P.C.D., Muraoka, T. (2005): Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. *Sci. Agric.* 62, 534–542.
- Ambrosano, E.J., Trivelin, P.C.O., Cantarella, H., Rossetto, R., Muraoka, T., Bendassolli, J.A., Ambrosano, G.M.B., Tamiso, L.G., Vieira, F. de C., Prada Neto, I. (2003): NITROGEN-15 LABELING OF *Crotalaria juncea* GREEN MANURE. *Sci. Agric.* 60, 181–184.
- Bell, M.J., Halpin, N. V, Garside, A.L., Moody, P.W., Stirling, G.R., Robotham, B.J. (2003): Evaluating Combinations of Fallow Management, Controlled Traffic and Tillage Options in Prototype Sugarcane Farming Systems At Bundaberg. *Aust. Soc. Sugar Cane Technol.J. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol* 25.
- Blake, G.R., Hartge, K.H. (1986): Bulk density, in: Klute, A. (ed.): Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. SSSA, Madison, pp. 363–376.
- Boddey, R.M., Jantalia, C.P., Conceição, P.C., Zanatta, J.A., Bayer, C., Mielniczuk, J., Dieckow, J., Dos Santos, H.P., Denardin, J.E., Aita, C., Giacomini, S.J., Alves, B.J.R., Urquiaga, S. (2010): Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. *Glob. Chang. Biol.* 16, 784–795.

- Bonnett, G.D., Hewitt, M.L., Glassop, D. (2006): Effects of high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes. *Aust. J. Agric. Res.* 57, 1087.
- Box, G.E.P., Cox, D.R. (1964): An analysis of transformations. *J. R. Stat. Soc. B* 26, 211–252.
- Caceres, N.T., Alcarde, J.C. (1995): Adubação Verde com Leguminosas em Rotação com Cana-de-Açúcar (*Saccharum* spp). *Rev. STAB* 13, 16–20.
- Cantarella, H., Trivelin, P.C.O., Vitti, A.C. (2007): Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar, in: Yamada, T., Stipp e Abdalla, S.R., Vitti, G.C. (eds.): Nitrogênio E Enxofre Na Agricultura Brasileira. IPNI Brasil, Piracicaba, pp. 355–412.
- Carvalho, A.M., Bustamante, M.M.C., Alcântara, F.A., Resck, I.S., Lemos, S.S. (2009): Characterization by solid-state CPMAS ¹³C NMR spectroscopy of decomposing plant residues in conventional and no-tillage systems in Central Brazil. *Soil Tillage Res.* 102, 144–150.
- Carvalho, A.M. de, Bustamante, M.M. da C., Sousa Junior, J.G. de A., Vivaldi, L.J. (2008): Decomposição de resíduos vegetais em latossolo sob cultivo de milho e plantas de cobertura. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 32, 2831–2838.
- Cerri, C.E.P.C., Sparovek, G., Bernoux, M., Easterling, W.E., Melillo, M., Cerri, C.E.P.C., Melillo, J.M., Cerri, C.E.P.C. (2007): Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. *Sci. Agric.* 64, 83–99.
- Cheruiyot, E.K., Mumera, L.M., Nakhone, L.N., Mwonga, S.M. (2003): Effect of legume-managed fallow on weeds and soil nitrogen in following maize (*Zea mays* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) crops in the Rift Valley highlands of Kenya. *Aust. J. Exp. Agric.* 43, 597.
- Dias, H.B. (2016): Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil. Universidade de São Paulo.
- Dourado-Neto, D., Powlson, D., Bakar, R.A., Bacchi, O.O.S., Basanta, M.V., Cong, P.T., Keerthisinghe, G., Ismaili, M., Rahman, S.M., Reichardt, K., Safwat, M.S.A., Sangakkara, R., Timm, L.C., Wang, J.Y., Zagal, E., van Kessel, C. (2010): Multiseason Recoveries of Organic and Inorganic Nitrogen-15 in Tropical Cropping Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 139–152.
- Embrapa, E.B.D.P.A. (2006): Sistema brasileiro de classificação de solos, Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- Embrapa, E.B.D.P.A. (2011): Manual de Métodos de Análise de Solo, 2^a. ed. Embrapa, Rio de Janeiro.
- Erisman, J.W., van Grinsven, H., Leip, A., Mosier, A., Bleeker, A. (2010): Nitrogen and biofuels; an overview of the current state of knowledge. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 86, 211–223.
- FAOSTAT (2016): Statistics Division [WWW Document]. *Food Agric. Organ. the United Nations*.
- Fernandes, A.C. (2000): Cálculos na agroindústria canavieira. STAB, Piracicaba.
- Fortes, C., Trivelin, P.C.O., Vitti, A.C. (2012): Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. *Biomass and Bioenergy* 42, 189–198.

- Fortes, C., Trivelin, P.C.O., Vitti, A.C., Ferreira, D.A., Franco, H.C.J., Otto, R. (2011): Recovery of Nitrogen (^{15}N) by Sugarcane from Previous Crop Residues and Urea Fertilisation Under a Minimum Tillage System. *Sugar Tech* 13, 42–46.
- Franco, H.C.J., Otto, R., Faroni, C.E., Vitti, A.C., Almeida de Oliveira, E.C., Trivelin, P.C.O., Oliveira, E.C.A. de, Trivelin, P.C.O., Almeida de Oliveira, E.C., Trivelin, P.C.O. (2011): Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. *F. Crop. Res.* 121, 29–41.
- Franco, H.C.J., Trivelin, P.C.O., Faroni, C.E., Vitti, A.C., Otto, R. (2008): Aproveitamento pela cana-de-açúcar da adubação nitrogenada de plantio. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 32, 2763–2770.
- Garside, A.L., Bell, M.J. (2001): Fallow legumes in the australian sugar industry: review of recent research findings and implications for the sugarcane cropping system, in: Australian Society of Sugar Cane Technologists. pp. 230–235.
- Garside, A.L., Berthelsen, J.E., Richards, C.L. (1997): Effect of fallow history on cane and sugar yield of a following plant cane crop, in: Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists. p. 7.
- Gava, G.J. de C., Trivelin, P.C.O., De Oliveira, M.W., Penatti, C.P. (2001): Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 36, 1347–1354.
- Gava, G.J. de C., Trivelin, P.C.O., Vitti, A.C., Oliveira, M.W. de (2005): Urea and sugarcane straw nitrogen balance in a soil-sugarcane crop system. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 40, 689–695.
- Gee, G.W., Bauder, J.W. (1986): Particle-size analysis, in: Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy, Madison, pp. 383–411.
- Ghiberto, P.J., Libardi, P.L., Trivelin, P.C.O. (2015): Nutrient leaching in an Ultisol cultivated with sugarcane. *Agric. Water Manag.* 148, 141–149.
- Hajari, E., Snyman, S.J., Watt, M.P. (2017): The effect of form and level of inorganic N on nitrogen use efficiency of sugarcane grown in pots. *J. Plant Nutr.* 40, 248–257.
- Hemwong, S., Toomsan, B., Cadisch, G., Limpinuntana, V., Vityakon, P., Patanothai, a. (2009): Sugarcane residue management and grain legume crop effects on N dynamics, N losses and growth of sugarcane. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 83, 135–151.
- Landell, M.G. de A., Prado, H. do, Vasconcelos, A.C.M., Perecin, D., Rossetto, R., Bidoia, M.A.P., Silva, M.D.A., Xavier, M.A. (2003): Oxisol Subsurface Chemical Attributes Related to Sugarcane Productivity. *Sci. Agrícola* 60, 741–745.
- Leite, J.M. (2016): Eficiência agrônômica da adubação nitrogenada associada à aplicação de substâncias húmicas em cana-de-açúcar. Universidade de São Paulo.
- Mariano, E., Leite, J.M., Vieira-Megda, M.X., Ciampitti, I.A., Vitti, A.C., Faroni, C.E., Franco, H.C.J., Trivelin, P.C.O. (2016): Biomass and nutrient content by sugarcane as affected by fertilizer nitrogen sources. *Crop Sci.* 56, 1234–1244.

- Mattsson, M., Husted, S., Schjoerring, J.K. (1998): Influence of nitrogen nutrition and metabolism on ammonia volatilization in plants. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 51, 35–40.
- Mattsson, M., Schjoerring, J.K. (2003): Senescence-induced changes in apoplastic and bulk tissue ammonia concentrations of ryegrass leaves. *New Phytologist* 160, 489–499.
- Megda, M.X.V. (2013): Transformações do N derivado do fertilizante no solo e a eficiência de utilização pela cultura da cana-de-açúcar cultivada em solo coberto por palha. Universidade de São Paulo.
- Meier, E. A., Thorburn, P.J., Wegener, M.K., Basford, K.E. (2006): The availability of nitrogen from sugarcane trash on contrasting soils in the wet tropics of North Queensland. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 75, 101–114.
- Nastaro-Boschiero, B. (2017): Adubação nitrogenada em soqueiras de cana-de-açúcar : influência do uso em longo prazo de fontes e / ou doses de nitrogênio. Universidade de São Paulo.
- Ng Kee Kwong, K.F., Deville, J. (1994): Application of ^{15}N -labelled urea to sugar cane through a drip-irrigation system in Mauritius. *Fertilizer Research* 39, 223–228.
- Otto, R., Castro, S.A.Q., Mariano, E., Castro, S.G.Q., Franco, H.C.J., Trivelin, P.C.O. (2016): Nitrogen Use Efficiency for Sugarcane-Biofuel Production: What Is Next? *Bioenergy Res.* 9, 1272–1289.
- Pankhurst, C.E., Stirling, G.R., Magarey, R.C., Blair, B.L., Holt, J.A., Bell, M.J., Garside, A.L. (2005): Quantification of the effects of rotation breaks on soil biological properties and their impact on yield decline in sugarcane. *Soil Biol. Biochem.* 37, 1121–1130.
- Park, S.E., Webster, T.J., Horan, H.L., James, A.T., Thorburn, P.J. (2010): A legume rotation crop lessens the need for nitrogen fertiliser throughout the sugarcane cropping cycle. *F. Crop. Res.* 119, 331–341.
- Pereira, A.R., Angelocci, L.R., Sentelhas, P.. (2007): Meteorologia agrícola. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz,” Piracicaba.
- Pereira, G.L. (2015): Transformação do nitrogênio no solo e a resposta da cana-planta à adubação nitrogenada em função da rotação com crotalária. Universidade de São Paulo.
- Prado, H. (2014): Pedologia fácil: aplicação em solos tropicais. UFV, Viçosa.
- Prado, R.D.M., Pancelli, M.A. (2006): Nutrição Nitrogenada em Soqueiras e a Qualidade Tecnológica da Cana-de-Açúcar. *STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos* 25, 2–4.
- Raij, B. van, Andrade, J.C., Cantarella, H., Tavares, S., Quaggio, J.A. (2001): Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Instituto Agrônomo, Campinas.
- Resende, A.S. de, Santos, A., Xavier, R.P., Coelho, C.H., Gondim, A., Oliveira, O.C., Alves, B.J.R., Boddey, R.M., Urquiaga, S. (2006): Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 30, 937–941.

- Robertson, F.A., Thorburn, P.J. (2007): Decomposition of sugarcane harvest residue in different climatic zones. *Aust. J. Soil Res.* 45, 1–11.
- Rolim, G.S., Sentelhas, P.C., Barbieri, V. (1998): Planilhas no ambiente ExcelTM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Rev. Bras. Agrometeorol.* 6, 133–137.
- Romero, C.M., Engel, R., Chen, C., Wallander, R. (2015): Microbial Immobilization of Nitrogen-15 Labelled Ammonium and Nitrate in an Agricultural Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79, 595–602.
- Sánchez, C.E.B. (2017): Produtividade da cana-de-açúcar e qualidade química do solo em função da rotação de cultura e remoção da palha. Universidade de São Paulo.
- Sattolo, T.M.S. (2016): Adubação nitrogenada em cana-de-açúcar: efeitos na fertilidade do solo, transformações microbianas e estoques de carbono e nitrogênio. Universidade de São Paulo.
- Soil Survey Staff (2014): Keys to soil taxonomy. *Soil Conserv. Serv.* 12, 410.
- Tasso Júnior, L.C., Marques, M.O., Franco, A., Nogueira, G. de A., Nobile, F.O. de, Camilotti, F., Da Silva, A.R. (2007): Produtividade e qualidade de Cana-de-Açúcar cultivada em solo tratado com lodo de esgoto, Vinhaça e adubos minerais. *Eng. Agrícola Jaboticabal* 27, 276–283.
- Team, R.C. (2014): R: A language and environment for statistical computing.
- Tenelli, S. (2016): Disponibilidade do nitrogênio no solo e produtividade da cana-de-açúcar em função da rotação de culturas. Universidade de São Paulo.
- Trivelin, P.C.O., Oliveira, M.W. de, Vitti, A.C., Gava, G.J. de C., Bendassolli, J.A. (2002): Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 37, 193–201.
- Trivelin, P.C.O., Rodrigues, J.C.S., Victoria, R.L. (1996): Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia-¹⁵N e ureia-¹⁵N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 31, 89–99.
- Trivelin, P.C.O., Lara Cabezas, W.A.R., Victoria, R.L., Reichardt, K. (1994): Evaluation of a ¹⁵N plot design for estimating plant recovery of fertilizer nitrogen applied to sugar cane. *Sci. Agri.* 51, 226–234.
- Vieira-Megda, M.X., Mariano, E., Leite, J.M., Franco, H.C.J., Vitti, A.C., Megda, M.M., Khan, S.A., Mulvaney, R.L., Trivelin, P.C.O. (2015): Contribution of fertilizer nitrogen to the total nitrogen extracted by sugarcane under Brazilian field conditions. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 101, 241–257.
- Vitti, A.C., Trivelin, P.C.O., Gava, G.J.C., Penatti, C.P., Bologna, I.R., Faroni, C.E., Franco, H.C.J. (2007): Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 42, 249–256.
- Zhu, S., Vivanco, J.M., Manter, D.K. (2016): Nitrogen fertilizer rate affects root exudation, the rhizosphere microbiome and nitrogen-use-efficiency of maize. *Appl. Soil Ecol.* 107, 324–333.

Zotarelli, L., Zatorre, N.P., Boddey, R.M., Urquiaga, S., Jantalia, C.P., Franchini, J.C., Alves, B.J.R. (2012): Influence of no-tillage and frequency of a green manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C stocks. *F. Crop. Res.* 132, 185–195.

3. A PALHA DA CANA-DE-AÇÚCAR AFETA A RECUPERAÇÃO DO NITROGÊNIO PROVENIENTE DO FERTILIZANTE?

RESUMO

A baixa qualidade e elevada quantidade de palha no sistema de cana-crua pode interferir na recuperação do nitrogênio pela cana-de-açúcar (RNP). Foi instalado um experimento com níveis de remoção de palha após o 2º corte da cana-de-açúcar, em áreas manejadas com e sem rotação com crotalária na renovação do canavial, para testar a hipótese de que a aplicação de fertilizante nitrogenado sobre a palha reduz a RNP pela soqueira de cana-de-açúcar. Os tratamentos (0, 50 e 100% de palha) foram instalados em delineamento de blocos ao acaso com quatro repetições, após a colheita da 1ª soqueira. Em cada parcela foi aplicado 120 kg ha^{-1} de N na forma de nitrato de amônio sobre a linha (sem incorporação), além de microparcels (1 linha de 2,0 m) que receberam $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ com abundância isotópica de 1,99% de át de ^{15}N . O N na planta proveniente do fertilizante (NPPF) foi avaliado ao longo do ciclo e na colheita. Também foi avaliada a recuperação do N-fertilizante pela planta (RNP), pelo solo (RNS) e na palha residual (RNPa). A rotação de cultura exerceu pouca influência na dinâmica do N, aumentando a RNP na ausência de palha e diminuindo a RNS ao final do ciclo da cana-de-açúcar. A manutenção de palha aumentou a RNP ao longo do ciclo da cultura, exercendo maior influência no início da rebrota. A RNPa foi baixa e variou de 0,2 a 2,4%. A biomassa de colmos foi favorecida pela manutenção de 100% da palha. Os resultados demonstraram que, em sistema de plantio direto, o uso de leguminosa na renovação do canavial teve efeito limitado na RNP. Apesar de ter favorecido a RNP no sistema de cana-crua, a remoção de palha deve ser avaliada com cautela devido ao potencial de reduzir a produtividade de colmos.

Palavras-chave: Eficiência de uso do nitrogênio; Produtividade de cana-de-açúcar; Imobilização do nitrogênio; Solo; Plantio direto

ABSTRACT

The low quality and high amount of straw in the green sugarcane system can avoid the nitrogen recovery by sugarcane (NRP). An experiment with straw removal levels was installed after the second harvest of sugarcane in areas with and without sunn hemp in the sugarcane renewal, to test the hypothesis that the N-fertilizer application on the straw decreases NRP by sugarcane ratoon. The treatments (0, 50 e 100% of straw) were installed in randomized complete block designs with four samples after the first ratoon harvest. In each plot 120 kg ha^{-1} of N in ammonium nitrate was applied on the line (without incorporation), beside the microplots (1 line of 2.0 m) that received $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ with isotopic abundance of 1,99% de at de ^{15}N . The N in the plant derived from the fertilizer (NDFP) was

evaluated during the cycle and in the harvest. The N-fertilizer recovery by the plant (NRP), the soil (NRS) and the straw (NRSt) was also evaluated. The crop rotation had little influence on N dynamics, increasing NRP in the absence of straw and decreasing NRS at the end of the sugarcane cycle. Straw maintenance increased the NRP during the crop cycle exerting greater influence at the beginning of the regrowth. The NRSt was low and ranged from 0.2 to 2.4%. The stalk biomass was favored by the maintenance of 100% of the straw. The results showed that in a no-tillage system the use of legumes in the renewal of the sugarcane had NRP limited effects. Despite having favored NRP in the green cane system the straw removal should be evaluated with caution due to the potential to reduce the sugarcane stalk yield.

Keywords: Nitrogen use efficiency; Sugarcane yield; Nitrogen immobilization; Soil; No-tillage.

3.1. Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com área cultivada de 10,0 milhões de hectares e produção de 27,8 bilhões de litros de etanol e 37,8 milhões de toneladas de açúcar (CONAB, 2016). O etanol produzido a partir da cana-de-açúcar pode reduzir até 85% a emissão de gases de efeito estufa - GEE (Cavalett *et al.*, 2013; Macedo *et al.*, 2008; Zabed *et al.*, 2017) e pode contribuir com a demanda mundial por etanol que será de 220 bilhões de litros em 2021 (Goldemberg *et al.*, 2014). Um dos problemas associados à produção de bioenergia refere-se à baixa recuperação do N (RNP) pelas culturas agrícolas (Otto *et al.*, 2016), que pode impactar a sustentabilidade da produção de biocombustíveis do ponto de vista ambiental (Crutzen *et al.*, 2007; Erisman *et al.*, 2010).

A quantidade de palha que recobre o solo no sistema de cana-crua varia de 8 a 30 Mg ha⁻¹ (Carvalho *et al.*, 2013; Fortes *et al.*, 2012; Franco *et al.*, 2013). Quando o fertilizante nitrogenado é aplicado diretamente sobre a palha, uma fração do N-fertilizante pode ser imobilizada pelos microrganismos tornando-se indisponível para a cultura (Vieira-Megda *et al.*, 2015). O potencial de imobilização do N-fertilizante em áreas de cana-crua resultou no aumento das doses de N normalmente empregadas em soqueira, porém sem resultar no tão esperado aumento de produtividade (Otto *et al.*, 2016).

O alto potencial energético da palha da cana-de-açúcar despertou o interesse da indústria para remoção do material para produção de energia ou etanol a partir de hidrólise enzimática – o etanol de 2ª geração (Cantarella *et al.*, 2013; Carvalho *et al.*, 2016; Sordi & Manechini, 2013). Se a presença de palha na superfície do solo pode afetar a RNP, a remoção parcial da palha poderá diminuir a imobilização do N-fertilizante e aumentar a RNP.

Entretanto, a manutenção da palha da cana-de-açúcar apresenta benefícios ao sistema (Carvalho *et al.*, 2016; Leal *et al.*, 2013) e um deles é a ciclagem de nutrientes, que pode reduzir a demanda de fertilizantes nitrogenados a longo prazo (Robertson & Thorburn, 2007; Trivelin *et al.*, 2013).

O plantio de leguminosas em rotação com cana-de-açúcar tem potencial de adicionar quantidades significativas de N ao sistema (Ambrosano *et al.*, 2003a; Garside *et al.*, 1997; Resende *et al.*, 2003). O N do resíduo vegetal é liberado gradualmente por meio da mineralização (Ambrosano *et al.*, 2005), podendo contribuir também para a nutrição das soqueiras. Estudos de modelagem indicam que é possível reduzir a dose de N em soqueira de cana-de-açúcar manejada com plantio de leguminosas em rotação, sem prejuízos à produtividade e com ganhos ambientais (Park *et al.*, 2010). A adoção de sistemas conservacionistas de manejo do solo, como o plantio direto, também pode influenciar a quantidade de resíduo vegetal a ser removido para fins industriais (Leal *et al.*, 2013). Portanto, o plantio de leguminosas em rotação associado ao plantio direto poderia compensar a menor ciclagem de N promovida pela remoção da palha do campo e manter a produtividade da cultura a longo prazo.

A hipótese deste estudo é de que a palha irá reduzir a RNP pela cana-de-açúcar pela imobilização do N-fertilizante e que o plantio de leguminosa em rotação pode favorecer a RNP pela cultura. O objetivo do estudo foi avaliar a RNP da cana-de-açúcar em função de níveis de remoção de palha em áreas manejada com e sem o plantio de leguminosa na renovação do canavial.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Caracterização da área

O experimento localizava-se no município de Quirinópolis – GO (18° 56' S e 50° 42' O). A temperatura e a pluviosidade média anual de 24,4 °C e 1400 mm, respectivamente, caracteriza o clima da região como tropical típico Aw, classificação de Koppen-Geiger. O solo classificado como Latossolo Vermelho Eutroférico típico de textura argilosa (Embrapa, 2006), correspondente a um Typic Eutrudox (Soil Survey Staff, 2014), foi caracterizado até a profundidade de 1 m através da realização de 6 trincheiras em outubro de 2012 (Tabelas 9 – 10).

Tabela 9. Análise química do solo da área experimental antes do plantio da *C. spectabilis* e da calagem e gessagem¹.

Camada	pH	MOS	P	S	Na	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
m	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³		----- mmol _c dm ⁻³ -----									%
0,0 – 0,1	5,5	31,9	9,5	6,8	0,1	5,8	44	15,8	0,2	23	65,5	89	74	0,3
0,1 – 0,2	5,5	27,2	8,2	6,2	0,1	3,7	43	12,2	0,0	23	58,8	82	72	0,0
0,2 – 0,4	5,6	22,0	6,7	13,5	0,1	2,6	33	8,3	0,2	21	45,1	65	68	0,4
0,4 – 0,6	5,6	18,0	6,8	9,3	0,1	0,9	28	6,3	0,2	20	35,0	55	64	0,4
0,6 – 1,0	5,7	30,3	6,2	8,3	0,1	0,7	22	6,8	0,3	18	29,7	48	62	1,2

¹MOS – Matéria orgânica do solo; SB – Soma de bases; CTC – Capacidade de troca catiônica; V – Saturação por bases; m – Saturação por alumínio. Determinações: pH em CaCl₂ a 0,01 mol l⁻¹; MOS por oxidação por dicromato; P por resina; S por fosfato de cálcio; K, Ca e Mg por resina com determinação por fotometria de chama e espectrofotometria de absorção atômica, respectivamente, assim como o Al; H + Al por tampão SMP; Na por Mehlich (*Raij et al.*, 2001).

Tabela 10. Análise física e química do solo (ataque sulfúrico) da área experimental em outubro de 2012¹.

Camada	Areia	Argila	Silte	Densidade	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	ki	kr
m	----- g kg ⁻¹ -----			kg dm ⁻³	----- % -----						
0,0 – 0,1	267	547	186	1,37	14,4	19,8	10,8	29,9	0,1	1,2	0,7
0,1 – 0,2	249	561	190	1,29	14,3	20,6	11,2	29,2	0,1	1,2	0,7
0,2 – 0,4	225	580	195	1,23	15,0	21,8	10,0	30,2	0,1	1,2	0,7
0,4 – 0,6	226	599	175	1,20	14,8	21,3	9,6	28,5	0,1	1,2	0,7
0,6 – 1,0	234	595	171	1,19	15,4	20,2	9,8	30,1	0,1	1,3	0,7

¹Areia, argila e silte determinados pelo método da pipeta (*Embrapa*, 2011); Densidade determinada através do método do anel volumétrico (*Gee & Bauder*, 1986).

3.2.2. Instalação do experimento

O experimento foi conduzido em área de plantio direto da cana-de-açúcar, sendo a área dividida em dois manejos, i) com rotação de cultura (*Crotalaria spectabilis*) na renovação do canavial e ii) sem rotação de cultura, permanecendo a área em pousio até o plantio da cana-de-açúcar. A crotalaria foi plantada na primeira quinzena de dezembro de 2012 com densidade de sementes de 25 kg ha⁻¹, permanecendo na área por 73 dias. Ao final do ciclo a cultura foi dessecada e avaliações nutricionais e de produção de biomassa foram realizadas 10 dias após a dessecação. A produção de biomassa seca foi de 8,1 Mg ha⁻¹, contendo 194 kg ha⁻¹ de N, 19,4 kg ha⁻¹ P, 126,4 kg ha⁻¹ K, 73,7 kg ha⁻¹ Ca, 17,8 kg ha⁻¹ Mg, 13,8 kg ha⁻¹ S, 0,11 kg ha⁻¹ B, 0,15 kg ha⁻¹ Cu, 5,2 kg ha⁻¹ Fe, 0,35 kg ha⁻¹ Mn e 0,21 kg ha⁻¹ Zn (*Tenelli*, 2016).

A cana-de-açúcar foi plantada em março de 2013 com espaçamento entrelinhas de 1,5 m. O plantio foi realizado manualmente posicionando-se 13 gemas viáveis por metro de sulco. A adubação de plantio foi com 500 kg ha⁻¹ do fertilizante 08 – 25 – 29, fornecendo

40 kg ha⁻¹ N, 125 kg ha⁻¹ P₂O₅ e 145 kg ha⁻¹ K₂O. A variedade utilizada foi a RB96 6928 por ser de ciclo médio, colheita entre abril e junho, apresentar boa produtividade e brotação em sistema de cana crua, rusticidade e tolerância ao carvão, ferrugem marrom e alaranjada, escaldadura e mosaico, as quais são as principais doenças da cultura. As plantas daninhas foram controladas seguindo as práticas adotadas na usina.

A cana-planta foi colhida em junho de 2014, sendo a produtividade determinada com a colheita mecanizada das 4 linhas centrais pesadas em transbordo instrumentado com célula de carga. A TCH e os atributos tecnológicos foram de 168,4 Mg ha⁻¹, 16,5% pol, 141,3 kg t⁻¹ ATR e 16,2% brix na área com rotação de cultura, e 151,5 Mg ha⁻¹, 16,2% pol, 138,5 kg t⁻¹ ATR e 15,8% brix na área sem rotação. Após a colheita permaneceu sobre o solo, 30,1 Mg ha⁻¹ de palha, massa fresca, e 16,6 Mg ha⁻¹ de palha, massa seca.

Aos 60 dias após a colheita, agosto de 2014, foi instalado um experimento com delineamento de blocos ao acaso em cada uma das áreas (com e sem rotação), os quais possuíam três tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram níveis de palha: 0 (remoção total), 50 (remoção parcial) e 100% (manutenção total) de palha. A remoção da palha foi realizada manualmente, utilizando-se rastelo e depositando a palha removida nos carregadores entre as parcelas. Para que permanecessem apenas 50% da palha nas parcelas correspondentes a esse tratamento, essas foram divididas ao meio, diagonalmente, e a palha presente em metade da parcela foi rastelada e removida. Posteriormente, a palha contida na outra metade da parcela foi redistribuída, manualmente, para a área total da parcela, tomando cuidado para que a redistribuição fosse homogênea, deixando toda a parcela com 50% da quantidade de palha residual (anexo – Figura 10). Cada parcela continha cinco linhas de cana-de-açúcar e nove metros de comprimento. Nessa mesma época foi realizada a adubação de soqueira aplicando-se 120 kg ha⁻¹ N, na forma de nitrato de amônio (32% N), em faixa (0,15 m de distância da linha) sobre a palha, nos tratamentos em que esse material foi mantido. Juntamente com o fertilizante nitrogenado foi aplicado 120 kg ha⁻¹ K₂O na forma de cloreto de potássio (KCl) a fim de evitar deficiências nutricionais.

A 1ª soqueira da cana-de-açúcar foi cultivada até junho de 2015. Na colheita determinou-se a TCH, pesando os colmos das duas linhas centrais de cada parcela em transbordo instrumentado com célula de carga, e avaliou-se os atributos tecnológicos (Tabela 11). A quantidade de palha depositada sobre o solo foi de 16,3 Mg ha⁻¹, em massa seca.

Tabela 11. Produtividade de colmos (TCH) e atributos tecnológicos da primeira soqueira de cana-de-açúcar (2015) em ambas as áreas e nos níveis de remoção de palha (Sánchez, 2017).

Palha	Rotação de cultura							
	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem	Com	Sem
%	TCH (Mg ha ⁻¹)		ATR (kg Mg ⁻¹)		Pol (%)		Brix (%)	
0	137,0	132,4	131,1	134,6	13,0	13,4	15,2	15,5
50	158,3	142,3	127,6	132,0	12,7	13,1	14,8	15,3
100	167,9	150,6	134,0	131,2	13,4	13,1	15,4	15,0
Média	154,4	141,8	130,9	132,6	13,0	13,2	15,1	15,3

Em agosto de 2015, 60 dias após a colheita da 1ª soqueira, os tratamentos foram reinstalados nas mesmas parcelas. Juntamente com a adubação de soqueira, 120 kg ha⁻¹ N, na forma de nitrato de amônio, e 120 kg ha⁻¹ K₂O, na forma de cloreto de potássio, foram instaladas microparcels com aplicação de nitrato de amônio duplamente enriquecido em ¹⁵N (¹⁵NH₄¹⁵NO₃) com abundância isotópica de 1,99% de átomos de ¹⁵N. As microparcels foram alocadas na linha central (LC) e no centro de cada parcela. As linhas adjacentes (LA) foram utilizadas posteriormente para análises, assim como as plantas da LC.

Durante o período de condução do experimento as variáveis climáticas, temperatura (°C) e precipitação (mm) foram registradas em estação meteorológica instalada próxima à área experimental. O balanço hídrico foi calculado para a 1ª (julho de 2014 a junho de 2015) e 2ª soqueira da cana-de-açúcar (julho de 2015 a julho de 2016), seguindo o método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). O coeficiente da cultura (Kc), utilizado no cálculo da evapotranspiração seguiu os dados obtidos por Dias (2016). A capacidade de água disponível (CAD) considerada foi de 161 mm, conforme critérios de Pereira *et al.* (2007) e Prado (2014). O balanço hídrico foi realizado com o uso das planilhas eletrônicas desenvolvidas por Rolim *et al.* (1998) (Figura 7).

Figura 7. Balanço hídrico calculado através do método de Penman-Monteith para a 1ª e a 2ª soqueira da cana-de-açúcar durante condução do experimento. Setas indicam época de colheita (junho de 2015 e maio de 2016) e da aplicação do fertilizante nitrogenado e do cloreto de potássio (agosto de 2014 e agosto de 2015).

3.2.3. Avaliações

3.2.3.1. Produtividade e atributos tecnológicos

Em maio de 2016 foi estimada a produtividade de colmos (TCH) da cana-de-açúcar. O método utilizado foi a biometria: toda a parte aérea da planta presente em um metro de sulco foi cortada, sendo essa avaliação realizada nas três linhas centrais de cada parcela, tomando cuidado para que as amostras não fossem misturadas. Após o corte a planta foi separada nos compartimentos colmo, ponteiro e folha seca, sendo esses identificados, amarrados e pesados com auxílio de balança eletrônica para obtenção da massa de cada compartimento (anexo – Figura 14). A estimativa de biomassa foi realizada considerando a massa de colmos, folha seca e ponteiro presente em um metro e os 6.667 m presentes em 1 ha, considerando o espaçamento de 1,5 m entrelinhas. Para fins de cálculo, foi considerada a biomassa média das três repetições.

Após a pesagem dos colmos cortados na biometria realizou-se a separação de 10 colmos, por parcela, para avaliação dos parâmetros tecnológicos: °Brix (teor de sólidos solúveis), Pureza (porcentagem de sacarose nos sólidos solúveis - %), ATR (Açúcar total

recuperável – kg Mg⁻¹), AR (Açúcares redutores - %), Fibra (constituintes insolúveis - %) e Pol da cana (teor de sacarose aparente - %) (*Fernandes, 2000*). A produtividade de sacarose por hectare (TPH) foi obtida por meio do produto entre a TCH e a Pol da cana de cada parcela, dividido por 100.

3.2.3.2. Recuperação do ¹⁵N-fertilizante pela planta (RNP)

Para avaliar a recuperação do N proveniente do fertilizante pela planta (RNP) ao longo do ciclo agrícola, foi realizada a amostragem de folha + 3 (F+3) em três épocas, em novembro de 2015 (92 dias após a adubação – DAA), fevereiro de 2016 (169 DAA) e maio de 2016 (264 DAA). A última amostragem coincidiu com a colheita da cana-de-açúcar. A F+3, identificada como a 3ª folha com a lígula visível, é a porção da planta que representa a abundância isotópica média de ¹⁵N na cana-de-açúcar (*Franco et al., 2011*). Foram coletadas quatro F+3 dentro de cada microparcela, tomando o cuidado para que as plantas amostradas estivessem na posição central da microparcela. Adicionalmente, quatro F+3 foram amostradas em cada linha adjacente (LA) em posição equivalente à LC, compondo outra amostra. Dessa maneira, cada parcela possuía duas amostras, F+3 LC (com 4 folhas), e F+3 LA (com 8 folhas). Após a amostragem retirou-se a nervura central das folhas e armazenou-se o limbo das folhas em saco de papel.

Em todas as épocas de avaliação e na colheita final (maio de 2016), foi realizada avaliação biométrica para quantificar o acúmulo de biomassa e teor de N total. Na avaliação biométrica aos 92 e 169 DAA a parte aérea da cultura foi amostrada sem subdivisão dos compartimentos. Na avaliação biométrica aos 264 DAA, a planta foi subdividida em três compartimentos (colmo, folha seca e ponteiro). A folha seca foi separada dos colmos da LC, sendo então armazenada em saco plástico e posteriormente pesada em balança de campo. Após a despalha realizou-se a desponta dos colmos, onde os ponteiros foram retirados no ponto de quebra, prosseguindo com o corte dos colmos rente ao solo. As amostras de folha seca, ponteiro e colmo foram identificadas com o número da parcela e com a linha amostrada (LC). Posteriormente, foi realizado o mesmo procedimento nas linhas adjacentes (LA) em posição equivalente à LC. As amostras das duas LA foram armazenadas conjuntamente, compondo a amostra LA.

As amostras foram pesadas em balança eletrônica de duas casas decimais e em seguida trituradas com o uso de picadora de forragem. A moagem do material foi realizada em ordem crescente de abundância de ¹⁵N e de umidade visando diminuir a contaminação

cruzada entre as amostras. Após moagem, tomou-se uma sub-amostra de cada compartimento da cana-de-açúcar (cerca de 500 g de material fresco) as quais foram armazenadas em saco plástico e colocadas em câmara fria, evitando a deterioração e a perda de umidade.

No laboratório foi determinada a umidade das sub-amostras, as quais foram pesadas em balança analítica com duas casas decimais, obtendo a massa à umidade natural, e secas em estufa com circulação de ar a 65°C, até atingirem umidade constante. Após secas as amostras foram pesadas e realizou-se a correção do peso do material vegetal no campo, obtendo a massa seca de cada compartimento da cana-de-açúcar, dado utilizado no cálculo de recuperação do ^{15}N -fertilizante. Posteriormente, foi realizada moagem em moinho de faca do tipo Willey das amostras de planta e de F+3, sendo as amostras moídas em ordem crescente de abundância de ^{15}N , prosseguindo de limpeza cautelosa do moinho. A limpeza consistiu em três processos, retirada do material que permaneceu no moinho com aspirador de pó e ar comprimido, limpeza com água deionizada e álcool, seguido de secagem do moinho com papel e ar. As amostras foram pesadas, em balança analítica com precisão de 1 µg, colocando-se 8 a 12 mg de material por cápsula de estanho, prosseguindo com a análise no espectrômetro de massa Hydra modelo 20/20 acoplado a um analisador automático Anca-GSL da Sercon, fornecendo resultados de N total (g kg^{-1}) e abundância isotópica (% át. ^{15}N). O NPPF (%) foi calculado conforme Equação 1 e o QNPPF (kg ha^{-1}) foi calculado conforme Eq. 2 (Trivelin *et al.*, 1994). A recuperação do N-fertilizante pela planta foi calculada conforme Eq. 3:

$$\text{NPPF (\%)} = [(a - b) / (c - b)] \cdot 100 \quad [\text{Eq. 1}]$$

Em que: a – abundância em átomos de ^{15}N da planta; b – abundância natural em átomos de ^{15}N ; c – abundância em átomos de ^{15}N do fertilizante.

$$\begin{aligned} \text{QNPPF}_{\text{LC}} (\text{kg ha}^{-1}) &= (\text{NPPF}_{\text{LC}}(\%) / 100) \cdot \text{N-total} \\ \text{QNPPF}_{\text{LA}} (\text{kg ha}^{-1}) &= 2 \cdot [(\text{NPPF}_{\text{LA}}(\%) / 100) \cdot \text{N-total}] \\ \text{QNPPF Total} (\text{kg ha}^{-1}) &= \text{NPPF}_{\text{LC}} (\text{kg ha}^{-1}) + \text{NPPF}_{\text{LA}} (\text{kg ha}^{-1}) \end{aligned} \quad [\text{Eq. 2}]$$

Em que: N-total – N total da parte aérea em kg ha^{-1} ; LC e LA significam linha central e adjacente da micro parcela com aplicação de fertilizante ^{15}N .

$$\text{RNP\%} = [\text{QNPPF (kg ha}^{-1}) / \text{Dose N (kg ha}^{-1})] \cdot 100 \quad [\text{Eq. 3}]$$

Em que: RNP% - recuperação do N-fertilizante pela planta, em porcentagem; QNPPF – quantidade de N da parte aérea da planta proveniente do fertilizante, correspondente à soma do ^{15}N -fertilizante presente no colmo, folha seca e ponteiro; Dose N – a dose de N aplicado via fertilizante.

3.2.3.3. Recuperação do ^{15}N -fertilizante na palha (RNPa)

Após a avaliação biométrica, coletou-se a palha residual da cana-de-açúcar presente no solo, processo realizado para determinar a recuperação do ^{15}N -fertilizante na palha (RNPa). Dessa maneira, com o auxílio de um gabarito de 1,5 m de largura por 0,5 m de comprimento, o qual foi colocado no centro da microparcela, realizou-se a coleta de toda a palha presente sobre o solo em 0,75 m². Nesse procedimento, tomou-se cuidado para coletar apenas a palha residual, tentando evitar ao máximo a presença de solo. A palha foi armazenada em saco plástico devidamente identificado.

No laboratório, devido à presença de solo e às diversas granulometrias da palha, as amostras foram peneiradas com peneira de 4 mm. A palha foi separada em duas frações: palha fina (a qual passou pela peneira de 4 mm) considerada a transição entre a palha e o solo, e palha grossa (> 4 mm), sem presença de solo. As amostras foram pesadas antes e após secagem em estufa com circulação de ar a 65°C, determinando-se a umidade do material. Posteriormente, realizou-se a moagem desse material em moinho de faca tipo Willey, também em ordem crescente de abundância de ^{15}N e com cautela na limpeza, seguido da determinação da abundância de ^{15}N , em átomos %, e do N-total, em g kg⁻¹ em espectrômetro de massas IRMS - ANCA/GSL. Para essa quantificação foi pesado, em balança analítica de quatro casas decimais, aproximadamente 7 a 9 mg de material seco. A recuperação do ^{15}N -fertilizante na palha (RNPa%) foi obtida por meio das equações:

$$\begin{aligned}
 \text{QNPfPF (kg ha}^{-1}\text{)} &= (\text{NPfPF}(\%) / 100) \cdot \text{N-total} \\
 \text{QNPgPF (kg ha}^{-1}\text{)} &= [(\text{NPgPF}(\%) / 100) \cdot \text{N-total}] \\
 \text{QNPalhaPF (kg ha}^{-1}\text{)} &= \text{NPfPF (kg ha}^{-1}\text{)} + \text{NPgPF (kg ha}^{-1}\text{)} \\
 \text{RNPa\%} &= [\text{NPalhaPF (kg ha}^{-1}\text{)} / \text{Dose N (kg ha}^{-1}\text{)}] \cdot 100
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 4}$$

Em que: QNPfPF – quantidade de N na palha fina proveniente do fertilizante; QNPgPF – quantidade de N na palha grossa proveniente do fertilizante; QNPalhaPF – quantidade de N na palha proveniente do fertilizante; RNPa% - recuperação do N-fertilizante na palha.

3.2.3.4. Recuperação do ^{15}N -fertilizante no solo (RNS)

A recuperação do ^{15}N -fertilizante no solo (RNS) foi avaliada na colheita (maio de 2016). A amostragem foi realizada na LC da microparcela, coletando-se quatro camadas de solo, 0 – 0,1, 0,1 – 0,2, 0,2 – 0,4 e 0,4 – 0,6 m. As duas primeiras camadas foram coletadas com o uso de sonda de aço inox com 5,5 cm de diâmetro interno, enquanto as outras duas camadas foram coletadas com trado holandês. Este procedimento foi adotado para evitar contaminação entre as camadas de solo. O solo foi amostrado no lado direito da microparcela, sendo dois pontos de amostragem a 0,15 m da linha (local do solo sob influência do fertilizante), e dois pontos a 0,75 m da linha, na entre linha da cana-de-açúcar (local sem a influência do fertilizante). Os pontos de amostragem em cada local estavam espaçados em 0,5 m. O solo amostrado a 0,15 m foi misturado e armazenado como amostra correspondente a linha, e o solo amostrado a 0,75 m foi misturado e armazenado como amostra correspondente a entre-linha. Após secas em estufa a 35°C, as amostras foram destorroadas e peneiradas a 2 mm, para que fossem homogêneas. Posteriormente, misturou-se 20 cm³ de solo de cada amostra, os quais compuseram a sub-amostra que foi processada em moinho de bola. Após moagem, cerca de 70 a 80 mg de solo foram pesados dentro de capsula de estanho, sendo em seguida analisadas no espectrômetro de massas para determinação do teor de N (g kg⁻¹) e abundância de átomos de ^{15}N (%).

Para determinar o acúmulo de N total no solo foi determinada a massa de solo de cada ponto de amostragem, na linha e entre linha e em cada profundidade (0 – 0,1, 0,1 – 0,2, 0,2 – 0,4 e 0,4 – 0,6 m). A densidade do solo foi determinada em cada local de amostragem pelo método do anel volumétrico (*Blake & Hartge*, 1986). A massa de solo presente no anel volumétrico foi seca em estufa a 105°C por 24 horas, seguido da pesagem. Na área com

rotação, a densidade média do solo foi de 1,27, 1,34, 1,27 e 1,24 g cm⁻³ na linha e 1,31, 1,32, 1,28 e 1,23 g cm⁻³ na entrelinha nas camadas de 0,0 – 0,1, 0,1 – 0,2, 0,2 – 0,4 e 0,4 – 0,6 m, respectivamente; na área sem rotação foi de 1,37, 1,29, 1,24 e 1,22 g cm⁻³ na linha e 1,40, 1,40, 1,29 e 1,21 g cm⁻³ na entrelinha nas camadas de 0,0 – 0,1, 0,1 – 0,2, 0,2 – 0,4 e 0,4 – 0,6 m, respectivamente). Para o cálculo do volume do solo foi considerada a camada representada pela amostragem, de 0,1 m para as duas primeiras camadas, e de 0,2 m para as duas últimas camadas, a qual representou a faixa de solo amostrado. Com a massa, a abundância isotópica de ¹⁵N e o teor de N no solo, foi realizado o cálculo do NSPF, em %, e do QNSPF, em kg ha⁻¹, e determinou-se a RNS em cada camada, conforme equações:

$$\begin{aligned}
 QNS_{0,0-0,1}PF \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} &= (NS_{0,0-0,1}PF(\%) / 100) \cdot N\text{-total} \\
 QNS_{0,1-0,2}PF \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} &= (NS_{0,1-0,2}PF(\%) / 100) \cdot N\text{-total} \\
 QNS_{0,2-0,4}PF \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} &= (NS_{0,2-0,4}PF(\%) / 100) \cdot N\text{-total} \\
 QNS_{0,4-0,6}PF \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} &= (NS_{0,4-0,6}PF(\%) / 100) \cdot N\text{-total} \\
 QNSPF \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} &= NS_{0,0-0,1}PF + NS_{0,1-0,2}PF + NS_{0,2-0,4}PF + NS_{0,4-0,6}PF \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} \\
 RNS\% &= [NSPF \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} / \text{Dose N (kg ha}^{-1}\text{)}] \cdot 100
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 5}$$

Em que: QNS_{0,0-0,1}PF – quantidade de N no solo na camada de 0,0-0,1 m proveniente do fertilizante; QNS_{0,1-0,2}PF – quantidade de N no solo na camada de 0,1-0,2 m proveniente do fertilizante; QNS_{0,2-0,4}PF – quantidade de N no solo na camada de 0,2-0,4 m proveniente do fertilizante; QNS_{0,4-0,6}PF – quantidade de N no solo na camada de 0,4-0,6 m proveniente do fertilizante; QNSPF – quantidade de N no solo proveniente do fertilizante; RNS% - recuperação do N-fertilizante no solo.

3.2.4. Análise estatística

Os dados foram analisados como grupo de experimento, a fim de comparar as áreas estudadas, com e sem rotação de cultura. A análise de variância foi realizada comparando-se as médias pelo teste de Tukey com nível de significância de 10%. Quando necessário, realizou-se transformação de dados, de acordo com Box-Cox (*Box & Cox*, 1964). Para tais análises utilizou-se o programa estatístico R (*R Core Team*, 2014).

3.3. Resultados

3.3.1. Recuperação do ^{15}N -fertilizante ao longo do ciclo

Como era esperado, houve aumento da biomassa ao longo do ciclo da cultura em ambas as áreas e tratamentos, sendo a maior produção aos 264 dias após a adubação (DAA), momento em que foi realizada a colheita (Tabela 12). Aos 92 DAA (novembro de 2015) a biomassa não diferiu entre as áreas com e sem rotação de cultura, com produção média de $55,8 \text{ Mg ha}^{-1}$. Os níveis de palha dentro da área sem rotação de cultura diferiram entre si, na qual 100% de palha proporcionou aumento médio de $22,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ em relação aos tratamentos com remoção parcial e total da palha. Aos 169 DAA (fevereiro de 2016) a biomassa no tratamento com 100% de palha diferiu entre as áreas, sendo sem rotação 30% ($37,2 \text{ Mg ha}^{-1}$) superior a área com rotação. Os demais tratamentos não diferiram entre os experimentos, nos quais a biomassa foi de $96,3$ e $120,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ com 0 e 50% de palha, respectivamente. Os níveis de remoção de palha diferiram entre si em ambas as áreas, no qual a manutenção de 50 e 100% de palha foram, na média, 26 Mg ha^{-1} superiores à biomassa obtida com 0% de palha na área com rotação. Na área sem rotação a manutenção de 100% de palha proporcionou aumento médio de $57,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomassa em relação aos tratamentos com remoção total e parcial. Aos 264 DAA (maio de 2016), época de avaliação com a maior biomassa ($146,3 \text{ Mg ha}^{-1}$), não houve diferença entre os manejos de rotação. Na área com rotação foi constatada diferença entre os tratamentos, com biomassa de $12,5$ e $23,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ superior no tratamento com 100% de palha quando comparado aos tratamentos com 0 e 50% de palha (Tabela 12).

O crescimento e desenvolvimento da planta proporcionou aumento na taxa de acúmulo de N, sendo a menor taxa obtida com a remoção total de palha, a qual apresentou máximo acúmulo de N apenas na última avaliação (264 DAA), $59,7$ e $110,2 \text{ kg ha}^{-1}$ N superior ao acúmulo aos 92 e 169 DAA. Nos tratamentos com manutenção de 50 ou 100% de palha, o acúmulo de N aos 169 DAA foi semelhante ao encontrado aos 264 DAA, os quais foram $84,7$ e $74,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, respectivamente, superiores à avaliação inicial (92 DAA). O manejo de rotação também diferiu em relação à taxa de acúmulo de N na parte aérea da cana-de-açúcar. A área sem rotação, aos 169 DAA, possuía valor semelhante ao acúmulo médio de N obtido aos 264 DAA, média de $150,4 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, o qual foi $95,2 \text{ kg ha}^{-1}$ de N maior do que aos 92 DAA. O acúmulo de N na área com rotação diferiu nas três avaliações, sendo a última época (maio 2016) $38,9$ e $85,7 \text{ kg ha}^{-1}$ N superior a fevereiro 2016 e novembro 2015.

Dentro de cada época também houve diferença entre os manejos e tratamentos no acúmulo de N na parte aérea da planta. Aos 92 DAA o tratamento com 100% de palha foi 18,6 kg ha⁻¹ N (32%) superior aos demais, assim como a área com rotação a qual foi 17,3 kg ha⁻¹ N (31%) superior a área sem rotação. Aos 169 DAA o tratamento com manutenção 100% de palha continuou sendo superior ao tratamento com 0% de palha, contudo no tratamento com 50% de palha o acúmulo de N na parte aérea foi semelhante ao tratamento com 100% de palha. A área com rotação, nessa avaliação, apresentou menor acúmulo de N na cana-de-açúcar, 18,7 kg ha⁻¹ N (16%) a menos do que a área sem rotação. Aos 264 DAA não houve diferença entre os tratamentos e entre os manejos, sendo o acúmulo médio de N na parte aérea da cultura de 160,4 kg ha⁻¹.

O NPPF (%) foi maior nas primeiras avaliações e diminuiu com o tempo (Tabela 12). O tratamento com 0% de palha apresentou NPPF semelhante aos 92 e aos 169 DAA, média de 25,7%, os quais foram 9,1% superior ao valor obtido na avaliação aos 264 DAA. Os tratamentos com 50 e 100% de palha, diferente do que ocorreu com 0% de palha, apresentaram decréscimo de NPPF nas avaliações. Aos 92 DAA, o NPPF no tratamento com 50% de palha foi 6,3 e 14,7% superior ao obtido aos 169 e 264 DAA, respectivamente. Aos 92 DAA, o NPPF no tratamento com 100% de palha foi 8,2 e 19,6% superior aos valores obtidos em aos 169 e 264 DAA. Ao comparar os tratamentos dentro de cada avaliação, apenas aos 92 DAA houve diferença, sendo o NPPF com 100% de palha superior aos tratamentos com 50 e 0% de palha. Aos 169 e aos 264 DAA o valor médio NPPF foi respectivamente de 28,6 e 18,6%. O QNPPF (kg ha⁻¹) apresentou variação muito semelhante ao já discutido para NPPF (%).

A RNP foi menor nas áreas e nos tratamentos aos 92 DAA, exceto na área com rotação associada à manutenção total da palha, onde o N-fertilizante na planta foi constante ao longo do tempo, média de 28,4%. A RNP no tratamento com 0% de palha foi semelhante ao tratamento com 50% de palha aos 92 DAA, tanto na área sem como na área com rotação. A RNP nesses tratamentos foi 9 e 12,3% inferior à obtida com 100% da palha em ambos manejos de rotação, demonstrando o benefício da palha na RNP no início da rebrota da cana-de-açúcar. Aos 169 DAA a área com rotação não diferiu entre os tratamentos, obtendo RNP média de 28,6%. Na área sem rotação o tratamento com 100% de palha continuou apresentando a maior RNP na parte aérea da cana-de-açúcar, cerca de 13 e 22% superior aos tratamentos com 50 e 0% de palha.

Ao comparar os manejos de rotação dentro de cada tratamento (nível de palha), a RNP diferiu, aos 169 DAA, apenas com 100% de palha, na qual a área sem rotação foi 13,5%

superior. Dessa maneira, o benefício da manutenção da palha continuou interferindo na RNP na área sem rotação aos 169 DAA, enquanto na área com rotação a quantidade de palha não proporcionou diferenças. Aos 264 DAA houve diferença entre os tratamentos e entre as áreas na RNP, exceto para 100% de palha, não diferindo entre as áreas (média de 26,1%). No tratamento com 50% de palha a RNP foi 10,2% superior na área sem rotação, enquanto no tratamento com 0% de palha a área com rotação foi 9,9% superior à área sem rotação. Na área com rotação o tratamento com 0% de palha apresentou maior RNP ao final do ciclo, 8,9 e 4,8% a mais do que os tratamentos com 50 e 100% de palha, respectivamente. Na área sem rotação os tratamentos com 50 e 100% de palha apresentaram maior RNP do que o tratamento com 0% de palha. Assim, no final do ciclo da cana-de-açúcar, a presença de 100% de palha pouco interfere na RNP e na produção de biomassa pela planta na adoção do sistema de rotação.

Palha				Rotação de cultura							
%	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média		
	92 DAA			169 DAA			264 DAA				
Biomassa (Mg ha ⁻¹)											
0	55,7 C	42,5 C b	49,1	99,5 B b	93,2 B b	96,3	145,8 A ab	141,0 A	143,4		
50	55,3 B	47,4 C b	51,4	128,1 A a	112,8 B b	120,5	134,7 A b	148,4 A	141,6		
100	69,5 C	67,3 B a	68,6	122,9 B a B	160,1 A a A	138,9	158,3 A a	157,6 A	158,0		
Média	60,2	51,1	55,8	116,8	118,6	117,7	146,3	149,0	146,3		
P _{rotação} = 0,754; P _{palha} = 0,001; P _{rotaçãoxpalha} = 0,059; P _{tempo} = <0,001; P _{tempoxrotação} = 0,329; P _{tempoxpalha} = 0,031; P _{rotaçãoxpalhaxtempo} = 0,035											
Acúmulo de N (kg ha ⁻¹)											
0	65,2	46,9	56,0 C b	102,0	111,0	106,5 B b	170,1	162,4	166,2 A		
50	69,3	52,9	61,1 B b	130,7	136,9	133,8 A ab	151,0	164,4	157,7 A		
100	83,1	69,4	77,2 B a	125,1	175,5	146,7 A a	153,4	161,1	156,7 A		
Média	72,5 C A	55,2 B B	64,2	119,3 B B	138,0 A A	128,2	158,2 A	162,8 A	160,4		
P _{rotação} = 0,439; P _{palha} = 0,040; P _{rotaçãoxpalha} = 0,251; P _{tempo} = <0,001; P _{tempoxrotação} = 0,004; P _{tempoxpalha} = 0,050; P _{rotaçãoxpalhaxtempo} = 0,580											
NPPF (%)											
0	25,6	23,7	24,7 A c	27,1	26,4	26,7 A	17,9	15,3	16,6 B		
50	34,4	34,2	34,3 A b	27,4	28,6	28,0 B	17,0	22,2	19,6 C		
100	37,4	42,4	39,5 A a	31,2	31,4	31,3 B	21,5	17,8	19,9 C		
Média	32,5	32,6	32,5	28,6	28,5	28,6	18,8	18,5	18,6		
P _{rotação} = 0,841; P _{palha} = 0,002; P _{rotaçãoxpalha} = 0,469; P _{tempo} = <0,001; P _{tempoxrotação} = 0,871; P _{tempoxpalha} = 0,001; P _{rotaçãoxpalhaxtempo} = 0,229											

Tabela 12. Biomassa, acúmulo de N na parte aérea (colmo, ponteiro e folha seca), N na planta proveniente do fertilizante (NPPF, % e QNPPF, kg ha⁻¹) e recuperação do N-fertilizante na planta (RNP), nas épocas de avaliação (novembro de 2015, fevereiro e maio de 2016)¹.

(conclusão)

Palha	Rotação de cultura																	
	Com			Sem			Média			Com			Sem			Média		
	92 DAA			169 DAA			264 DAA											
%	QNPPF (kg ha ⁻¹)																	
0	16,6	C b	11,1	B b	13,8	27,9	B	29,2	A b	28,5	37,8	A a A	25,9	A b B	31,9			
50	24,0	B ab	18,3	B b	21,2	35,8	A	39,9	A ab	37,8	27,1	AB b B	39,4	A a A	33,2			
100	31,2	a	29,4	B a	30,4	39,1	B	55,3	A a A	46,0	32,0	ab	30,5	B ab	31,3			
Média	24,0		18,7		21,4	34,3		40,2		37,1	32,3		32,1		32,2			
P _{rotação} = 0,739; P _{palha} = 0,011; P _{rotaçãoxpalha} = 0,237; P _{tempo} = <0,001; P _{tempoxrotação} = 0,017; P _{tempoxpalha} = 0,001; P _{rotaçãoxpalhaxtempo} = 0,010																		
	RNP (%)																	
0	13,9	C b	9,2	B b	11,5	23,3	B	24,3	A b	23,8	31,5	A a A	21,6	A b B	26,5			
50	20,0	B ab	15,2	B b	17,6	29,8	A	33,2	A ab	31,5	22,6	AB b B	32,8	A a A	27,7			
100	26,0	a	24,5	B a	25,4	32,6	B	46,1	A a A	38,4	26,7	ab	25,4	B ab	26,1			
Média	20,0		15,6		17,9	28,6		33,5		30,9	26,9		26,7		26,8			
P _{rotação} = 0,738; P _{palha} = 0,101; P _{rotaçãoxpalha} = 0,237; P _{tempo} = <0,001; P _{tempoxrotação} = 0,017; P _{tempoxpalha} = 0,001; P _{rotaçãoxpalhaxtempo} = 0,010																		

¹Letras minúsculas distintas indicam diferença entre os níveis de palha dentro de cada manejo de rotação, letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre as épocas de avaliação dentro de cada manejo e letras maiúsculas em itálico indicam diferença entre o manejo de rotação, dentro da época de avaliação, pelo teste de Tukey (P < 0,10).

3.3.2. Recuperação do ^{15}N -fertilizante pela planta no final do ciclo

A biomassa de colmos não foi influenciada pelo manejo de rotação, assim como a biomassa de ponteiro e da planta toda (Tabela 13). Por outro lado, a biomassa de folha seca foi maior na área sem rotação do que na área com rotação. Os níveis de remoção de palha, por sua vez, interferiram na biomassa de colmos, que foi maior no tratamento com 100% de palha em relação ao tratamento com 50% de palha. Ou seja, a remoção de palha afetou a biomassa de colmos nas condições experimentais do estudo. O tratamento com 0% de palha apresentou o valor intermediário de biomassa de colmos, sem diferir dos demais. Não houve efeito da remoção de palha na biomassa nos demais compartimentos da planta. Também não houve variação da biomassa seca nem entre o manejo de rotação nem para os níveis de manutenção da palha.

Diferente do observado para acúmulo de biomassa, o compartimento colmo apresentou maior acúmulo de N no tratamento com 0% de palha, diferenciando-se dos tratamentos com 50 e 100% de palha. Para os demais compartimentos da planta, não houve variação no acúmulo de N.

O NPPF (%) aumentou com os níveis de manutenção da palha no compartimento folha seca, somente na área com rotação (Tabela 14). O manejo de rotação ou os níveis de remoção de palha não afetaram o NPPF para os demais compartimentos da planta. De forma semelhante, o QNPPF (kg ha^{-1}) também foi maior na folha seca no tratamento com 50% de palha em relação aos demais tratamentos, porém na média das áreas com e sem rotação de culturas. Também não houve efeito dos tratamentos no QNPPF nos demais compartimentos. A RNP seguiu comportamento semelhante ao observado para QNPPF, sendo observada diferença somente para o compartimento folha seca. Nos colmos, ponteiros ou na planta toda, a RNP não foi afetada pelo manejo de rotação ou níveis de manutenção da palha (Tabela 14). A RNP (%) média foi de 30,2%, sendo 17% alocado no colmo, 7,5% no ponteiro e 5,7% na folha seca, demonstrando que o colmo é o compartimento com maior quantidade e a folha seca o compartimento com menor quantidade de N derivado do fertilizante.

Tabela 13. Biomassa de colmo, folha seca, ponteiro e da planta toda na colheita (maio de 2016). Valores representam massa de matéria úmida (Biomassa) e massa de matéria seca (Biomassa seca)¹.

Palha				Rotação de cultura									
	Com	Sem	Média		Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
%	Colmo				Folha seca			Ponteiro			Planta toda		
Biomassa (Mg ha ⁻¹)													
0	120,8	117,6	119,2	ab	11,1	11,3	11,2	13,9	12,2	13,0	145,8	141,0	143,4
50	109,0	122,4	115,7	b	12,2	13,4	12,8	13,6	12,7	13,1	134,7	148,4	141,6
100	134,0	129,5	131,7	a	10,7	13,2	12,0	13,6	15,0	14,3	158,3	157,6	158,0
Média	121,3	123,1			11,3	B	12,6	A	13,7	13,3	146,3	149,0	
P _{rotação}	0,738				0,095			0,613			0,676		
P _{palha}	0,078				0,224			0,372			0,113		
P _{rotaçãoxpalha}	0,360				0,462			0,288			0,487		
Biomassa seca (Mg ha ⁻¹)													
0	30,4	30,8	30,6		10,1	10,1	10,1	4,6	4,3	4,4	45,1	45,2	45,2
50	27,2	31,6	29,4		11,1	11,9	11,5	4,3	4,4	4,4	42,6	47,9	45,3
100	32,9	33,5	33,2		9,8	11,8	10,8	4,8	4,6	4,7	47,5	49,9	48,7
Média	30,2	32,0			10,4	11,3		4,5	4,4		45,1	47,7	
P _{rotação}	0,275				0,178			0,527			0,246		
P _{palha}	0,171				0,226			0,387			0,338		
P _{rotaçãoxpalha}	0,522				0,475			0,634			0,608		

¹Letras minúsculas distintas indicam diferença entre a dose de N e letras maiúsculas distintas indicam diferença entre manejo de rotação pelo teste de Tukey (P < 0,10).

Tabela 14. Acúmulo de N, N na planta proveniente do fertilizante (NPPF, % e kg ha⁻¹) e recuperação do N-fertilizante pela planta (RNP) na colheita (maio de 2016)¹.

(continua)

Palha				Rotação de cultura												
	Com	Sem	Média		Com	Sem	Média		Com	Sem	Média		Com	Sem	Média	
%	Colmo				Folha seca				Ponteiro				Planta toda			
N-total (kg ha ⁻¹)																
0	95,7	91,0	93,4	a	27,9	28,1	28,0		46,5	43,2	44,9		170,1	162,4	166,2	
50	77,2	86,8	82,0	b	31,3	32,9	32,1		42,4	44,7	43,6		151,0	164,4	157,7	
100	78,8	85,8	81,8	b	26,9	30,8	28,6		47,8	44,5	46,4		153,4	161,1	156,7	
Média	83,9	88,1			28,7	30,6			45,6	44,1			158,2	162,8		
P _{rotação}		0,335				0,253				0,502				0,435		
P _{palha}		0,070				0,110				0,585				0,364		
P _{rotação*palha}		0,341				0,873				0,442				0,330		
NPPF (%)																
0	21,2	24,1	22,7		16,9	bB	21,5	A	19,2	17,3	18,2	17,8	18,5	21,3	19,9	
50	20,6	25,8	23,2		21,0	ab	24,3		22,6	18,9	20,2	19,5	20,2	23,4	21,8	
100	23,9	18,5	21,6		23,5	a	20,4		22,2	21,2	18,2	19,9	22,9	19,0	21,2	
Média	21,9	23,2			20,5		22,2			19,1	18,9		20,5	21,5		
P _{rotação}		0,634				0,242				0,921				0,589		
P _{palha}		0,894				0,129				0,590				0,640		
P _{rotação*palha}		0,387				0,075				0,733				0,277		

Tabela 14. Acúmulo de N, N na planta proveniente do fertilizante (NPPF, % e kg ha⁻¹) e recuperação do N-fertilizante pela planta (RNP) na colheita (maio de 2016)¹.

(conclusão)

Palha				Rotação de cultura									
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média		Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
%	Colmo			Folha seca				Ponteiro			Planta toda		
	QNPPF (kg ha ⁻¹)												
0	25,4	22,5	23,9	5,7	6,4	6,0	b	9,7	7,8	8,7	40,7	36,6	38,7
50	15,3	23,6	19,4	7,4	8,4	7,9	a	8,7	9,2	9,0	31,4	41,2	36,3
100	17,9	16,7	17,4	6,4	6,7	6,5	b	9,6	8,7	9,2	34,0	32,1	33,2
Média	19,5	21,3		6,5	7,2			9,3	8,6		35,4	37,0	
P _{rotação}		0,458			0,164				0,503			0,402	
P _{palha}		0,111			0,019				0,951			0,394	
P _{rotação*palha}		0,153			0,452				0,675			0,186	
	RNP (%)												
0	21,1	18,7	20,0	4,7	5,3	5,0	b	8,1	6,5	7,3	33,9	30,5	32,2
50	12,7	19,6	16,2	6,2	7,0	6,6	a	7,3	7,7	7,5	26,2	34,3	30,2
100	15,0	13,9	14,5	5,3	5,6	5,5	b	8,0	7,2	7,7	28,3	26,8	27,6
Média	16,3	17,7		5,4	6,0			7,8	7,1		29,5	30,9	
P _{rotação}		0,458			0,165				0,504			0,402	
P _{palha}		0,111			0,019				0,951			0,394	
P _{rotação*palha}		0,153			0,453				0,673			0,186	

¹Letras minúsculas distintas indicam diferença entre os níveis palha e letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre o manejo de rotação pelo teste de Tukey (P < 0,10).

3.3.3. Recuperação do ^{15}N -fertilizante na palha (RNPa)

A palha fina assim como a palha grossa e a soma dessas frações apresentaram diferença entre os manejos apenas no tratamento com 0% de palha ($P < 0,10$) (Tabela 15). A biomassa de palha foi $0,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ superior na área sem rotação. Nos tratamentos com 50 e 100% de palha, não houve diferença na biomassa de palha entre os manejos e os níveis de palha sendo, na média, 2,0, 1,7 e $3,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ de palha fina, palha grossa e palha total, respectivamente. O mesmo é válido para o acúmulo de N na palha o qual, em ambas as frações de palha e na palha total, também apresentou interação entre os fatores de estudo. O manejo de rotação afetou a biomassa de palha somente no tratamento com 0% de palha, que apresentou $3,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ a mais na área sem rotação, enquanto os tratamentos com 50 e 0% de palha apresentaram acúmulo de N na palha semelhante entre os manejos, com valores de 19,8, 12,6 e $32,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ na palha fina, palha grossa e na palha total, respectivamente.

O NPalhaPF (%) e o QNPalhaPF (kg ha^{-1}) apresentaram diferenças pontuais entre os manejos de rotação, níveis de manutenção da palha e interação entre os fatores (Tabela 15). O manejo de rotação afetou muito pouco o NPalhaPF e o QNPalhaPF. Por outro lado, a manutenção da palha aumentou o NPalhaPF e o QNPalhaPF em praticamente todos os compartimentos. O efeito final foi observado na RNPa, que foi muito mais influenciada pela manutenção da palha do que pela rotação de cultura (Tabela 15). A manutenção de 50 e 100% de palha aumentou a RNPa em praticamente todas as frações de palha (Tabela 15). Porém, mesmo com o efeito da palha na RNPa, esta totalizou somente 2,1 a 2,4% para os tratamentos com 50 e 100% de palha, respectivamente, demonstrando o efeito limitado da palha na imobilização do N-fertilizante.

Tabela 15. Biomassa seca de palha, acúmulo de N na palha, N na palha proveniente do fertilizante (NPalhaPF, % e QNPalhaPF, kg ha⁻¹), e recuperação do N-fertilizante na palha (RNPa%)¹.

(continua)

Palha			Rotação de cultura												
%	Com		Sem		Média	Com		Sem		Média	Com		Sem		Média
	Palha fina			Palha grossa			Palha total								
Biomassa seca (Mg ha ⁻¹)															
0	0,0	bB	0,3	bA	0,2	0,2	bB	0,5	bA	0,3	0,2	bB	0,8	bA	0,5
50	2,0	a	1,9	a	1,9	1,5	a	1,9	a	1,7	3,5	a	3,8	a	3,6
100	2,4	a	1,8	a	2,1	1,9	a	1,2	a	1,6	4,3	a	3,3	a	3,8
Média	1,5		1,3			1,2		1,2			2,65		2,59		
P _{rotação}			0,001					0,008					0,003		
P _{palha}			<0,001					<0,001					<0,001		
P _{rotação*palha}			<0,001					0,002					<0,001		
N-total (kg ha ⁻¹)															
0	0,2	bB	2,0	bA	1,1	0,9	bB	3,1	bA	2,0	1,1	bB	5,0	bA	3,1
50	19,0	a	19,3	a	19,2	12,1	a	14,3	a	13,2	31,2	a	33,6	a	32,4
100	24,3	a	16,5	a	21,0	14,2	a	9,9	a	12,4	38,5	a	26,5	a	33,3
Média	14,5		12,2			9,1		9,0			23,6		21,3		
P _{rotação}			0,006					0,002					0,011		
P _{palha}			<0,001					<0,001					<0,001		
P _{rotação*palha}			<0,001					<0,001					<0,001		
NPalhaPF (%)															
0	5,0	b	7,2		6,1	4,9		7,6		6,3	b	3,3	b	4,9	4,1
50	9,2	a	8,0		8,6	10,3		8,8		9,6	a	6,5	a	5,6	6,1
100	8,4	aA	5,0	B	7,0	10,4		7,9		9,3	a	6,3	aA	4,3	B
Média	7,5		6,9			8,5		8,1				5,4		5,0	
P _{rotação}			0,478					0,698					0,558		
P _{palha}			0,092					0,046					0,051		
P _{rotação*palha}			0,068					0,165					0,081		

Tabela 15. Biomassa seca de palha, acúmulo de N na palha, N na palha proveniente do fertilizante (NPalhaPF, % e QNPalhaPF, kg ha⁻¹), e recuperação do N-fertilizante na palha (RNPa%)¹.

(conclusão)									
Palha	Rotação de cultura								
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
%	Palha fina			Palha grossa			Palha total		
	QNPalhaPF (kg ha ⁻¹)								
0	0,0 bB	0,1 cA	0,1	0,0 bB	0,2 bA	0,1	0,1 bB	0,4 bA	0,2
50	1,7 a	1,5 a	1,6	1,3 a	1,3 a	1,3	3,0 a	2,8 a	2,9
100	1,9 aA	0,8 bB	1,4	1,4 aA	0,7 aB	1,1	3,3 aA	1,5 aB	2,5
Média	1,2	0,8		0,9	0,7		2,1	1,6	
P _{rotação}		0,766			0,065			0,039	
P _{palha}		<0,001			<0,001			<0,001	
P _{rotação*palha}		0,001			<0,001			<0,001	
	RNPa (%)								
0	0,0 bA	0,1 cB	0,1	0,0 bB	0,2 bA	0,1	0,0 bB	0,3 bA	0,2
50	1,4 a	1,3 a	1,4	1,0 a	1,1 a	1,1	2,5 a	2,3 a	2,4
100	1,6 aA	0,7 bB	1,2	1,2 aA	0,6 aB	0,9	2,8 aA	1,2 aB	2,1
Média	1,0	0,7		0,7	0,6		1,8	1,3	
P _{rotação}		0,463			0,062			0,040	
P _{palha}		<0,001			<0,001			<0,001	
P _{rotação*palha}		0,001			<0,001			<0,001	

¹Letras minúsculas distintas indicam diferença entre os níveis palha e letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre os manejos de rotação pelo teste de Tukey (P < 0,10).

3.3.4. Recuperação do ^{15}N -fertilizante no solo (RNS)

Na primeira camada, 0,0 - 0,1 m, a área sem rotação apresentou a densidade média de 1372 g dm^{-3} , a qual foi 7% superior a área com rotação, não havendo diferença entre os tratamentos ($P < 0,10$). Nas demais camadas a densidade média das áreas foram semelhantes, as quais apresentaram valores de 1341, 1285 e 1227 g dm^{-3} nas camadas de 0,1 - 0,2, 0,2 - 0,4 e 0,4 - 0,6 m, respectivamente. Entre os tratamentos, as densidades médias nas camadas do solo diferiram entre si, exceto na camada 0,0 - 0,1 m ($P < 0,10$). Na segunda e na terceira camada houve interação entre os fatores de estudo. O tratamento com 50% de palha apresentou os maiores valores de densidade, 207 e 109 g dm^{-3} superior aos demais na área com crotalária. Na área sem rotação os valores na camada 0,1 - 0,2 m foram semelhantes, 1329 g dm^{-3} , enquanto na camada 0,2 - 0,4 m o tratamento com 100% apresentou densidade maior do que os demais níveis de remoção de palha.

O N-total do solo, nas camadas e na soma dessas, apresentou interação entre área e tratamento, exceto nas camadas 0,0 - 0,1 e 0,4 - 0,6 m ($P < 0,10$). Na primeira camada houve diferença entre as áreas no estoque médio de N-total, o qual foi 8% superior na área sem rotação. Entre os tratamentos, a remoção parcial de palha apresentou 8 e 10% a mais de N-total no solo, na camada 0,0 - 0,1 m, do que os tratamentos com 0 e 100% de palha. Na camada 0,4 - 0,6 m não houve diferença entre as áreas e os tratamentos, sendo o estoque médio de N-total igual a $1977 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$. Nas camadas 0,1 - 0,2 e 0,2 - 0,4 m o estoque médio de N no solo não diferiu entre os tratamentos na área sem rotação, as quais apresentaram 2060 e $3181 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$. Na área com rotação, os tratamentos com remoção parcial e total foram $559 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ superior ao tratamento com 100% de palha, na camada de 0,1 - 0,2 m, enquanto na terceira camada a manutenção de 50% de palha foi 474 e $1011 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ superior a remoção e a manutenção total da palha. Na soma das camadas o estoque de N-total foi diferente apenas na área com rotação, onde o tratamento com 100% de palha foi 1617 kg ha^{-1} inferior aos demais tratamentos e 1015 kg ha^{-1} inferior a área sem rotação. Na área sem rotação o estoque de N-total na soma das camadas foi de 9712 kg ha^{-1} de N (Tabela 16).

O NSPF (%) apresentou diferença estatística entre os manejos apenas na primeira camada do solo, sendo a área sem rotação 0,3% maior do que a área com rotação, aumento de 33% no NSPF. Ao comparar a média do NSPF entre os tratamentos, apenas a camada de 0,2 - 0,4 m diferiu entre esses, na qual o tratamento com 50% de palha foi 0,2% maior do que o tratamento com 100% de palha. Nas demais camadas o NSPF foi semelhante entre os

tratamentos, possuindo valor médio de 0,6, 0,5, 0,3 e 0,8% na camada 0,1 – 0,2, 0,2 – 0,4, 0,4 – 0,6 e 0,0 – 0,6 m. O QNSPF (kg ha^{-1}) não apresentou interação estatística entre as áreas e os tratamentos em nenhuma das camadas e na soma dessas. A variação no QNSPF entre as áreas ocorreu na camada 0,0 – 0,1 m e na soma dessas (0,0 – 0,6 m), sendo a quantidade de N-fertilizante na área com rotação 7,7 e 11,4 kg ha^{-1} inferior a área sem rotação. Ao comparar a média de QNSPF entre os tratamentos, apenas na camada de 0,2 – 0,4 m ocorreu diferença, na qual o tratamento com 50% de palha foi semelhante ao tratamento com 0% de palha, sendo esses 7 kg ha^{-1} superior ao tratamento com manutenção total do resíduo vegetal.

A RNS total (Tabela 17) diferiu entre as áreas, na qual a área sem rotação apresentou valor 9,5% superior à área com rotação, RNS média de 44,6%. Na camada 0,0 – 0,1 m também houve diferença entre as áreas, sendo 6,5% maior a RNS na área sem rotação do que na área com rotação, RNS média de 17,9%. Nas demais camadas a RNS foi semelhante entre as áreas, média de 10,4, 12,7 e 5,2% na camada 0,1 – 0,2, 0,2 – 0,4 e 0,4 – 0,6 m, respectivamente. Apenas a camada de 0,2 – 0,4 m houve diferença entre os níveis de palha, sendo 0 e 50% de palha 7,1% superior ao tratamento com 100% de palha, na média das áreas. Contudo, os tratamentos não diferiram entre si ao analisar RNS, sendo semelhantes na soma das camadas.

Tabela 16. Densidade do solo (média dos dados da linha e da entrelinha), estoque de N total, N no solo proveniente do fertilizante (NSPF, %, e QNSPF, kg ha⁻¹) e recuperação do N-fertilizante no solo (RNS) nas camadas analisadas¹.

(continua)

Palha				Rotação de cultura													
%	Com		Sem	Média	Com		Sem	Média	Com		Sem	Média	Com		Sem	Média	
	0,0 – 0,1 m			0,1 – 0,2 m			0,2 – 0,4 m			0,4 – 0,6 m							
Densidade do solo (g dm ⁻³)																	
0	1287	1351	1319		1366		1319		1343	1269	bA	1288	bB	1278	1193	1237	1215
50	1271	1383	1327		1449	aA	1328	B	1388	1345	aA	1267	cB	1306	1280	1244	1262
100	1274	1382	1328		1242	bB	1341	A	1292	1236	bB	1309	aA	1272	1218	1190	1204
Média	1277	B	1372	A	1352		1330			1283		1288			1231	A	1224
P _{rotação}			0,019				0,335					0,615				0,017	
P _{palha}			0,972				<0,001					<0,001				0,001	
P _{rotação*palha}			0,829				<0,001					<0,001				0,706	
N-total (kg ha ⁻¹)																	
0	2227	2478	2353	ab	2268	a	2094		2181	3076	bB	3373	A	3225	2047	2097	2072
50	2474	2611	2542	a	2270	aA	2005	B	2137	3550	aA	3060	B	3305	2040	1958	1999
100	2242	2392	2306	b	1710	bB	2086	A	1871	2539	cB	3087	A	2774	1868	1809	1843
Média	2314	B	2503	A	2083		2060			3055		3181			1985	1968	
P _{rotação}			0,033				0,892					0,156				0,852	
P _{palha}			0,078				0,017					0,001				0,153	
P _{rotação*palha}			0,724				0,003					0,001				0,801	
NSPF (%)																	
0	0,9	1,2	1,0		0,6		0,7		0,7	0,4		0,5	0,5	ab	0,4	0,3	0,3
50	1,0	1,2	1,1		0,5		0,7		0,6	0,5		0,6	0,6	a	0,3	0,3	0,3
100	0,9	1,2	1,0		0,5		0,6		0,6	0,4		0,4	0,4	b	0,4	0,2	0,3
Média	0,9	B	1,2	A	0,6		0,7			0,5		0,5			0,3	0,3	
P _{rotação}			0,091				0,193					0,587				0,610	
P _{palha}			0,965				0,440					0,066				0,580	
P _{rotação*palha}			0,847				0,734					0,823				0,252	

Tabela 16. Densidade do solo (média dos dados da linha e da entrelinha), estoque de N total, N no solo proveniente do fertilizante (NSPF, %, e QNSPF, kg ha⁻¹) e recuperação do N-fertilizante no solo (RNS) nas camadas analisadas¹.

(conclusão)

Palha				Rotação de cultura																			
		Com		Sem		Média				Com		Sem		Média				Com		Sem		Média	
				0,0 – 0,1 m						0,1 – 0,2 m								0,2 – 0,4 m				0,4 – 0,6 m	

¹ Letras minúsculas distintas indicam diferença entre os níveis de palha e letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre os manejos de rotação pelo teste de Tukey (P < 0,10).

Tabela 17. Estoque de N, N no solo proveniente do fertilizante (NSPF, %, e QNSPF, kg ha⁻¹) e recuperação do N-fertilizante no solo (RNS) na soma das camadas (0,0 – 0,6 m)¹.

Palha					Rotação de cultura											
	Com		Sem	Média	Com		Sem	Média	Com		Sem	Média	Com		Sem	Média
%	N-total (kg ha ⁻¹)				NSPF (%)			QNSPF (kg ha ⁻¹)				RNS (%)				
0	9618	a	10043	9830	0,8	0,9	0,8	54,2	68,4	61,3	45,2	57,0	51,1			
50	10334	a	9635	9984	0,8	0,9	0,8	59,4	68,9	64,1	49,5	57,4	53,4			
100	8359	bB	9374	A 8794	0,7	0,8	0,8	46,8	55,1	50,4	39,0	45,9	42,0			
Média	9437		9712		0,8	0,9		53,5	B 64,9	A	44,6	B 54,1	A			
P _{rotação}			0,294			0,159			0,087			0,087				
P _{palha}			0,006			0,722			0,201			0,201				
P _{rotação*palha}			0,049			0,964			0,886			0,886				

¹Letras minúsculas distintas indicam diferença entre os níveis de palha e letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre o sistema de rotação, com e sem rotação de cultura, ambos pelo teste de Tukey, com P < 0,10.

3.3.5. Balanço do ^{15}N -fertilizante no sistema solo-planta-palha

No sistema solo-planta-palha a recuperação média do N-fertilizante na área com e sem rotação foi de, respectivamente, 75,8 e 86,3% (Figura 8). Dessa maneira, o plantio de *Crotalaria spectabilis* na renovação do canavial aumentou 10,5% o N-não contabilizado quando comparado à área sem rotação. Já a recuperação média do N-fertilizante aplicado nos tratamentos com 0, 50 e 100% de palha foi respectivamente de 83,5, 86,1 e 71,7% (Figura 9). Tal resultado demonstra que a maior quantidade de resíduo vegetal depositada sobre o solo diminui a recuperação do N-fertilizante no sistema, aumentando o N-não contabilizado em, aproximadamente, 13%. A menor recuperação do N-fertilizante na área com rotação com 100% de palha foi devido à menor RNS, uma vez que a RNP (%) e RNPa (%) foram semelhantes entre os manejos.

Figura 8. Balanço do N-fertilizante no sistema solo-planta-palha na área com (A) e sem (B) rotação de cultura na renovação do canavial. Letras maiúsculas distintas indicam diferença entre as áreas pelo teste de Tukey ($P < 0,10$).

Figura 9. Balanço do N-fertilizante no sistema solo-planta-palha em função da rotação de culturas e níveis de palha. Letras minúsculas distintas indicam diferença entre os níveis de palha e letras maiúsculas distintas indicam diferença entre os manejos de rotação pelo teste de Tukey ($P < 0,10$).

3.3.6. Atributos tecnológicos do colmo da cana-de-açúcar

Os parâmetros tecnológicos analisados do colmo da cana-de-açúcar não diferiram entre os manejos, com e sem rotação de cultura, e entre os níveis de manutenção de palha, exceto para fibra e pureza (Tabela 18). As diferenças obtidas nessas variáveis tecnológicas foram pequenas, interferindo pouco na qualidade da matéria-prima. A pureza do caldo foi a única variável que diferiu entre os manejos, com aumento da pureza em 1,1% na área sem rotação de cultura. A quantidade de fibra presente no colmo foi o único atributo tecnológico que apresentou diferença entre os tratamentos (Tabela 18). O tratamento com 0% de palha apresentou porcentagem de fibra semelhante ao tratamento com manutenção total de palha, os quais foram 1,6% superior ao tratamento com 50% de palha. A produção de açúcar (ATR) e de sacarose (Pol e TPH) não variou entre os tratamentos e entre os manejos ($P < 0,10$). O ATR médio foi de 129,1 e 129,7 kg Mg⁻¹ de colmo, a TPH média foi de 15,5 e 15,8 Mg ha⁻¹ de sacarose nas áreas com e sem rotação, enquanto a Pol média foi semelhante entre as áreas, obtendo valor de 12,8%.

Tabela 18. Atributos tecnológicos do colmo da cana-de-açúcar na colheita (maio de 2016)¹.

Palha				Rotação de cultura									
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média		Com	Sem	Média
%	ATR (kg t ⁻¹)			Brix (%)			Fibra (%)				Pol (%)		
0	132,5	131,4	131,9	15,7	15,6	15,7	10,85	11,18	10,013	a	13,1	13,0	13,1
50	129,2	126,9	128,0	15,3	15,4	15,3	10,78	10,73	10,750	b	12,8	12,5	12,6
100	125,5	130,9	128,2	15,0	15,8	15,4	10,93	10,75	10,838	ab	12,4	12,9	12,6
Média	129,1	129,7		15,3	15,6		10,85	10,88			12,8	12,8	
P _{rotação}		0,825			0,444			0,718				0,919	
P _{palha}		0,496			0,641			0,091				0,468	
P _{rotação*palha}		0,541			0,536			0,102				0,522	
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média		Com	Sem	Média
	Açúcar redutor (%)			Umidade (%)			Pureza (%)				TPH (Mg ha ⁻¹)		
0	1,2	1,2	1,2	73,5	73,2	73,3	83,5	83,2	83,4		15,9	15,3	15,6
50	1,2	1,2	1,2	74,0	73,9	73,9	83,6	81,1	82,3		13,9	15,3	14,6
100	1,1	1,2	1,2	74,1	73,5	73,8	82,5	82,0	82,2		16,6	16,8	16,7
Média	1,2	1,2		73,8	73,6		83,2	A	82,1	B	15,5	15,8	
P _{rotação}		0,640			0,450			0,065				0,732	
P _{palha}		1,000			0,376			0,228				0,208	
P _{rotação*palha}		0,433			0,826			0,235				0,672	

¹Letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre os manejos de rotação pelo teste de Tukey (P < 0,10).

3.4. Discussão

3.4.1. Recuperação do ^{15}N -fertilizante pela planta ao longo do ciclo

Diversos trabalhos já comprovaram que a participação do N do fertilizante no total acumulado pela cana-de-açúcar é maior no início do ciclo e diminui com o tempo, devido à participação cada vez maior do N da MOS na nutrição da planta (*Franco et al.*, 2011; *Vieira-Megda et al.*, 2015; *Vitti*, 2003). Resultados semelhantes foram observados neste estudo, no qual o NPPF foi de 33, 29 e 19% aos 92, 169 e 264 DAA (Tabela 12). Entretanto, o NPPF obtido na primeira avaliação, de 33% na média dos tratamentos, foi inferior aos valores reportados por *Franco et al.* (2011) e *Vieira-Megda et al.* (2015) nas suas avaliações iniciais. O menor NPPF observado neste estudo pode estar relacionado ao elevado estoque de MOS do solo, que pode ter contribuído de forma mais significativa para a nutrição nitrogenada da planta do que nos demais trabalhos.

A hipótese deste estudo é de que a remoção de palha para fins de produção de bioenergia, seguindo o atual interesse do setor produtivo (*Sordi & Manechini*, 2013), poderia diminuir a imobilização do N-fertilizante e com isso aumentar a RNP pela cana-de-açúcar. Entretanto, diferente do esperado, a RNP foi maior nos tratamentos com 50 e 100% de palha do que no tratamento com 0% de palha no início do ciclo (Tabela 12). Este resultado pode ser explicado pela presença de raízes finas na interface solo-palha em sistemas de cana-crua (*Faroni*, 2004; *Vitti et al.*, 2008). A maior umidade do solo preservada pela palha permite que haja maior absorção de nutrientes pela planta, aumentando o vigor e o desenvolvimento (*Grof et al.*, 2014; *Tanguilig et al.*, 1987). De fato, a falta de água é um dos principais fatores que causam a morte do sistema radicular da cana-de-açúcar (*Otto et al.*, 2009; *Smith et al.*, 2005) e a palha parece ter um efeito benéfico na manutenção da atividade do sistema radicular da cana-de-açúcar e nas reduções de perdas de água do solo. Apesar do QNPPF ter se estabilizado nos demais tratamentos ao longo do ciclo, os resultados temporais do QNPPF indicaram que, ao contrário do esperado, a palha pode ser benéfica à RNP especialmente em regiões sujeitas à déficit hídrico.

A manutenção da palha apresentou benefícios na RNP em todas as épocas na área sem rotação, enquanto na área com rotação o benefício ocorreu somente no início do ciclo. O plantio de crotalária pode trazer benefícios à microbiota e favorecer a associação do sistema radicular, proporcionando maior exploração do solo além de aumentar o conteúdo de N nesse compartimento devido à fixação biológica (*Ambrosano et al.*, 2010). A leguminosa, associada

ao plantio direto e a presença da palha, diminui a demanda por N-fertilizante e o uso desse, ao longo do ciclo, a qual se torna constante, enquanto na ausência do resíduo vegetal a utilização iniciasse baixa, provavelmente devido a menor umidade do solo e desenvolvimento do sistema radicular, aumentando a RNP com o início do período úmido (*Ambrosano et al.*, 2005; *Smith et al.*, 2005).

3.4.2. Recuperação do ^{15}N -fertilizante pela planta no final do ciclo

A biomassa de colmos foi favorecida pela manutenção da palha, com valores de 132, 116 e 119 Mg ha⁻¹ para os níveis de 100, 50 e 0% de manutenção de palha (Tabela 13). A resposta em produtividade à manutenção de palha é bastante variável (*Carvalho et al.*, 2016). *Manechini et al.* (2005) obteve resultados positivos, negativos ou nulos em termos de produtividade com níveis de manutenção da palha em três experimentos conduzidos durante três ciclos da cana-de-açúcar. Esta divergência de resultados parece estar relacionada às condições climáticas da região aonde o estudo é realizado. A manutenção da palha em regiões frias, especialmente com colheita da cana-de-açúcar no inverno, tende a diminuir o perfilhamento e prejudicar a produtividade (*Campos et al.*, 2008; *Landell et al.*, 2013). A área em que o experimento foi conduzido, entretanto, não apresenta nenhuma dessas características, justificando o efeito positivo da palha na biomassa de colmos. Em regiões de temperaturas elevadas, a presença da palha sobre o solo promove uma série de benefícios à cultura por manter a umidade do solo por um período maior, impedir a incidência direta da luz sobre o solo, diminuindo a variação de temperatura nesse e mantendo a atividade biológica, além de promover ciclagem de nutriente e aumento do teor de C no solo (*Carvalho et al.*, 2016; *Manechini et al.*, 2005; *Trivelin et al.*, 2013). Por outro lado, diferente do esperado, a rotação de culturas não aumentou a biomassa de colmos no presente estudo, possivelmente devido às condições químicas e físicas adequadas do solo que permitiram elevadas produtividades mesmo sem adoção da rotação de culturas.

O NPPF (%) obtido na colheita não foi influenciado nem pelo manejo de rotação nem pelos níveis de manutenção da palha e variaram de 21 a 22% (Tabela 14). Este resultado está de acordo com observações prévias da literatura (*Franco et al.*, 2011). De forma semelhante, a RNP também não foi influenciada pelo manejo de rotação ou níveis de manutenção da palha. Na colheita, a RNP foi de 32, 30 e 28% respectivamente para os níveis de 0, 50 e 100% de palha, valores próximos à média de 26% de RNP reportada na revisão de

Otto et al. (2016). Os resultados deste estudo indicaram que, caso a remoção de palha do campo se torne uma realidade para produção de bioenergia (*Sordi & Manechini*, 2013), não é esperado que ocorram variações na RNP quando aplicado em sistemas com ou sem manutenção da palha na superfície. Pelo mesmo motivo, não é esperado que ocorra aumento ou diminuição na quantidade de N recomendada para adubação de soqueira nestas condições, como recentemente relatado por *Otto et al.* (2016).

3.4.3. Recuperação do ^{15}N -fertilizante no solo (RNS) e na palha (RNPa)

A taxa de decomposição do material vegetal depositado no campo após a colheita da cana-de-açúcar é determinada pela atividade e quantidade da biomassa microbiana, assim como pelas condições climáticas do local, sendo favorecida em ambiente com baixo déficit hídrico e com temperatura amena. Solos mais férteis comumente possuem valores superiores, fazendo com que a degradação da palha seja acelerada (*An et al.*, 2015). Essa tendência pode explicar a baixa quantidade de biomassa seca de palha sobre o solo após um ano no campo (Tabela 15). Com a decomposição do material vegetal ocorre disponibilização dos nutrientes para o ambiente, sendo esses utilizados pelas plantas ou imobilizados no solo, permanecendo fixado aos minerais ou na estrutura dos microrganismos (*Moritsuka et al.*, 2004; *Pan et al.*, 2017). O N da palha é liberado como amônio (N-NH_4^+), o que pode criar uma competição entre a absorção pela planta ou pelos microrganismos, que tem preferência de absorção de amônio (*Burger & Jackson*, 2003).

A decomposição da palha da cana-de-açúcar, associado à aplicação de fertilizantes nitrogenados sobre a palha, poderia causar imobilização microbiana do N-fertilizante, causando redução na disponibilidade do N à planta e redução na RNP (*Cantarella et al.*, 2007; *Vieira-Megda et al.*, 2015; *Vitti et al.*, 2007). Entretanto, a RNPa variou de 2,1 a 2,4% para os tratamentos com manutenção de 50 e 100% de palha (Tabela 15), demonstrando ser muito baixa a quantidade de N-fertilizante imobilizada no processo de decomposição microbiana. Este resultado difere de evidências da literatura que indicam que a imobilização do N-fertilizante pode ser intensa quando o fertilizante é aplicado sobre a palha (*Vieira-Megda et al.*, 2015). Entretanto, os autores utilizaram palha de cana-de-açúcar finamente moída em seu estudo, o que pode ter superestimado a imobilização do N-fertilizante. Além disso, deve-se considerar também a baixa qualidade da palha da cana-de-açúcar (*Fortes et al.*, 2012; *Leal et al.*, 2013), que dificulta a decomposição microbiana em condições de campo.

A RNS na área com *Crotalaria spectabilis* foi menor provavelmente devido à maior diversidade e a quantidade da biomassa microbiana presente nesse local em comparação ao pousio (Hemwong *et al.*, 2009; Lupwayi *et al.*, 1998). O uso de leguminosa na renovação do canavial proporciona essa modificação devido à variação na constituição do resíduo vegetal, favorecendo a multiplicação e a associação de outros microrganismos, o que pode acarretar em outras perdas de N como a desnitrificação. De fato, Lisboa *et al.* (2011) observaram que o manejo como manutenção da palha no solo aumenta o potencial de perdas de N por desnitrificação, devido à manutenção de umidade e maior atividade microbiana no solo.

3.4.4. Atributos tecnológicos dos colmos da cana-de-açúcar

A mudança no sistema de manejo do solo e da cultura pode alterar os atributos tecnológicos da cana-de-açúcar, os quais são afetados indiretamente pela produtividade. Com o aumento da biomassa há tendência de que ocorra menor acúmulo de açúcar no colmo devido ao maior gasto de energia demandado para o crescimento e desenvolvimento da planta. Além disso, para que o caldo apresente melhores características tecnológicas é necessária a ocorrência de um período seco e com intensidade luminosa adequada à cultura, antes da colheita, para que ocorra a translocação dos carboidratos e aumente a quantidade de açúcar no colmo (Allison *et al.*, 2007; Inman-Bamber *et al.*, 2002). A ausência de palha no campo deixa o solo descoberto e mais susceptível à evaporação de água (Resende *et al.*, 2006) e, com menor umidade do solo e maior propensão à ocorrência de déficits hídricos, a planta apresenta menor desenvolvimento e maior translocação de açúcar para o colmo, aumentando o valor de ATR. Contudo, os dados obtidos no experimento não seguiram essa tendência, o valor de ATR não alterou entre os níveis de palha e a rotação de cultura, devido a condição climática adequada durante o período de máximo desenvolvimento da cultura (Figura 7).

A cana-de-açúcar quando apresenta menor crescimento, possui a tendência de aumentar o conteúdo de fibra presente no colmo, uma vez que o comprimento dos internódios é menor, deixando a parede celular mais densa (Bonnett *et al.*, 2006). Com o uso dos materiais ligno-celulósicos para cogeração de energia e produção de etanol de segunda geração, o maior teor de fibra pode vir a ser um fator desejado pelas usinas sucroenergéticas. Até então essa era uma variável indesejável nos atributos tecnológicos da cana-de-açúcar, dificultando a extração do caldo e a moagem do colmo, além de diminuir o acúmulo de açúcar nesse compartimento (Gravois & Milligan, 1992). Com a manutenção no teor de ATR e

ligeiro aumento no teor de fibra a indústria sucroenergética diversificará e aumentará a produção dos derivados da cana-de-açúcar, gerando maior renda. A influência da palha nessas variáveis pôde ser verificada no experimento apenas no valor de Fibra, não alterando ATR, Pol, Brix e Pureza. Resultado contrastante foi obtido por *Manechini et al.* (2005), nos quais a manutenção da palha causou diminuição no valor de Pol em duas das três áreas analisadas, apresentando aumento de Pol com 100% da palha em apenas uma das áreas. Essa variação ocorreu principalmente devido as diferenças nas condições climáticas durante a condução dos experimentos.

A pureza da cana-de-açúcar (Pza) é a relação entre a massa de sacarose, em porcentagem (Pol%), e o conteúdo de sólidos solúveis, também em porcentagem (Brix%) (*Lavanholi*, 2008). Essa variável demonstra a representatividade da sacarose no total de açúcar presente no caldo, sendo que quanto maior for a pureza da cana melhor a qualidade do caldo obtido. Contudo, a Pza da cana não pode ser avaliada sem analisar os dados de Pol e de Brix, o que é comprovado pelos resultados obtidos no experimento. Analisando apenas a Pza a área com *C. spectabilis* produz caldo com melhor qualidade do que a área sem rotação, entretanto, o Pol% das áreas são semelhantes, sendo o Brix menor na área com rotação de cultura. Dessa maneira, a qualidade do caldo não difere estatisticamente entre os manejos, uma vez que as variáveis utilizadas para determinação da Pureza são semelhantes, podendo inferir apenas que há maior porcentagem de sacarose na área com rotação do que na área sem rotação.

3.5. Conclusões

A influência da palha na RNP ocorre, principalmente, no início da rebrota da soqueira de cana-de-açúcar, trazendo efeitos positivos para a absorção do N-fertilizante.

A associação da rotação de cultura com o sistema de plantio direto permite que a palha seja removida do campo em local com pluviosidade bem distribuída, ao longo do ciclo da cultura, com fase de maior desenvolvimento da cana-de-açúcar ocorrendo em época úmida.

A RNP pela cana-de-açúcar é menor, ao longo do ciclo e na colheita, em área sem rotação de cultura, não sendo viável a remoção da palha nesse sistema de manejo.

A produtividade de colmo e de planta de cana-de-açúcar é semelhante com 0 e 100% de palha em sistema de plantio direto independente da rotação de cultura.

A palha imobiliza pequena quantidade do N-fertilizante ao final do ciclo quando a cana-de-açúcar é cultivada em solo fértil com teor adequado de nitrogênio no solo, não variando entre 50 e 100% de manutenção da palha.

Grande parte do N-fertilizante aplicado no início da 2ª soqueira é imobilizado no solo, sendo que a área com rotação de cultura, por utilizar mais o N-fertilizante no início do ciclo, possui menor teor de QNSPF no momento da colheita.

Referências

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998): Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, FAO. ed. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome.
- Allison, J.C.S., Pammenter, N.W., Haslam, R.J. (2007): Why does sugarcane (*Saccharum* sp. hybrid) grow slowly? *South African J. Bot.* 73, 546–551.
- Ambrosano, E.J., Azcon, R., Cantarella, H., Bovi Ambrosano, G.M., Schammas, E.A., Muraoka, T., Trivelin, P.C.O., Rossi, F., Guirado, N., Ungaro, M.R.G., Teramoto, J.R.S. (2010): Crop rotation biomass and arbuscular mycorrhizal fungi effects on sugarcane yield. *Sci. Agric.* 67, 692–701.
- Ambrosano, E.J., Trivelin, P.C.O., Cantarella, H., Ambrosano, G.M.B., Muraoka, T. (2003): Nitrogen mineralization in soils amended with sunnhemp, velvet bean and common bean residues. *Sci. Agric.* 60, 133–137.
- Ambrosano, E.J., Trivelin, P.C.O., Cantarella, H., Ambrosano, G.M.B., Schammas, E.A., Guirado, N., Rossi, F., Mendes, P.C.D., Muraoka, T. (2005): Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. *Sci. Agric.* 62, 534–542.
- An, T., Schaeffer, S., Zhuang, J., Radosevich, M., Li, S., Li, H., Pei, J., Wang, J. (2015): Dynamics and distribution of ¹³C-labeled straw carbon by microorganisms as affected by soil fertility levels in the Black Soil region of Northeast China. *Biol. Fertil. Soils* 51, 605–613.
- Blake, G.R., Hartge, K.H. (1986): Bulk density, in: Klute, A. (ed.): *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. SSSA, Madison, pp. 363–376.
- Bonnett, G.D., Hewitt, M.L., Glassop, D. (2006): Effects of high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes. *Aust. J. Agric. Res.* 57, 1087.
- Box, G.E.P., Cox, D.R. (1964): An analysis of transformations. *J. R. Stat. Soc. B* 26, 211–252.
- Burger, M., Jackson, L.E. (2003): Microbial immobilization of ammonium and nitrate in relation to ammonification and nitrification rates in organic and conventional cropping systems. *Soil Biol.* 35, 29–36.
- Campos, L.H.F., Carvalho, S.J.P., Christoffoleti, P.J., Fortes, C., Silva, J.S. (2008): Crescimento e Produtividade da Cana-de-Açúcar (Var . SP83-2847) Submetida a Três Manejos da Palhada. *STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos* 26, 33–36.

- Cantarella, H., Cerri, C.E.P., Carvalho, J.L.N., Magalhães, P.S.G. (2013): How much sugarcane trash should be left on the soil? *Sci. Agric.* 70, 1–2.
- Cantarella, H., Trivelin, P.C.O., Vitti, A.C. (2007): Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar, in: Yamada, T., Stipp e Abdalla, S.R., Vitti, G.C. (eds.): Nitrogênio E Enxofre Na Agricultura Brasileira. IPNI Brasil, Piracicaba, pp. 355–412.
- Carvalho, J.L.N., Nogueirol, R.C., Menandro, L.M.S., Bordonal, R. de O., Borges, C.D., Cantarella, H., Franco, H.C.J. (2016): Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal : a major review. *Glob. Chang. Biol. Bioenergy* 1–16.
- Carvalho, J.L.N., Otto, R., Franco, H.C.J., Trivelin, P.C.O. (2013): Input of sugarcane post-harvest residues into the soil. *Sci. Agric.* 70, 336–344.
- Cavalett, O., Chagas, M.F., Seabra, J.E.A., Bonomi, A. (2013): Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 647–658.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (2016): Acompanhamento da safra brasileira. Cana-de-açúcar. Safra 2016/2017. Terceiro levantamento. Dezembro 2016. Monitoramento agrícola. 78.
- Crutzen, P.J., Mosier, a. R., Smith, K. a., Winiwarter, W. (2007): N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 7, 11191–11205.
- Dias, H.B. (2016): Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil. Universidade de São Paulo.
- Embrapa, E.B.D.P.A. (2006): Sistema brasileiro de classificação de solos, Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- Embrapa, E.B.D.P.A. (2011): Manual de Métodos de Análise de Solo, 2^a. ed. Embrapa, Rio de Janeiro.
- Erisman, J.W., van Grinsven, H., Leip, A., Mosier, A., Bleeker, A. (2010): Nitrogen and biofuels; an overview of the current state of knowledge. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 86, 211–223.
- Faroni, C.E. (2004): Sistema radicular de cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas. Universidade de São Paulo.
- Fernandes, A.C. (2000): Cálculos na agroindústria canavieira. STAB, Piracicaba.
- Fortes, C., Trivelin, P.C.O., Vitti, A.C. (2012): Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. *Biomass and Bioenergy* 42, 189–198.
- Franco, H.C.J., Otto, R., Faroni, C.E., Vitti, A.C., Oliveira, E.C.A., Trivelin, P.C.O. (2011): Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. *F. Crop. Res.* 121, 29–41.
- Franco, H.C.J., Pimenta, M.T.B., Carvalho, J.L.N., Magalhães, P.S.G., Rossell, C.E. V, Braunbeck, O.A., Vitti, A.C., Kolln, O.T., Rossi Neto, J. (2013): Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. *Sci. Agric.* 70, 305–312.

- Garside, A.L., Berthelsen, J.E., Richards, C.L. (1997): Effect of fallow history on cane and sugar yield of a following plant cane crop, in: Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists. p. 7.
- Gee, G.W., Bauder, J.W. (1986): Particle-size analysis, in: Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. American Society of Agronomy, Madison, pp. 383–411.
- Goldemberg, J., Mello, F.F.C., Cerri, C.E.P., Davies, C.A., Cerri, C.C. (2014): Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. *Energy Policy* 69, 14–18.
- Gravois, K.A., Milligan, S.B. (1992): Genetic Relationship between Fiber and Sugarcane Yield Components. *Crop Sci.* 32, 62.
- Grof, C.P.L., Byrt, C.S., Patrick, J.W. (2014): Phloem Transport of Resources, in: Moore, P.H., Botha, F.C. (eds.): Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology. John Wiley & Sons Ltd, pp. 267–306.
- Hemwong, S., Toomsan, B., Cadisch, G., Limpinuntana, V., Vityakon, P., Patanothai, a. (2009): Sugarcane residue management and grain legume crop effects on N dynamics, N losses and growth of sugarcane. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 83, 135–151.
- Inman-Bamber, N.G., Muchow, R.C., Robertson, M.J. (2002): Dry matter partitioning of sugarcane in Australia and South Africa. *F. Crop. Res.* 76, 71–84.
- Landell, M.G. de A., Scarpari, M.S., Xavier, M.A., Anjos, I.A. dos, Baptista, A.S., Aguiar, C.L. de, Silva, D.N. da, Bidóia, M.A.P., Bracalião, S.R., Bressiani, J.A., Campos, M.F. de, Miguel, P.E.M., Silva, T.N. da, Silva, V.H.P. da, Anjos, L.O.S., Ogata, B.H. (2013): Residual biomass potential of commercial and pre-commercial sugarcane cultivars. *Sci. ...* 70, 299–304.
- Lavanholi, M. das G.D.P. (2008): Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de açúcar e álcool, in: Dinardo-Miranda, L.L., Vasconcelos, A.C.M. de, Landell, M.G. de A. (eds.): Cana-de-Açúcar. Campinas, pp. 697–724.
- Leal, M.R.L. V, Galdos, M. V., Scarpore, F. V., Seabra, J.E. a, Walter, A., Oliveira, C.O.F. (2013): Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. *Biomass and Bioenergy* 53, 11–19.
- Lisboa, C.C., Butterbach-Bahl, K., Mauder, M., Kiese, R. (2011): Bioethanol production from sugarcane and emissions of greenhouse gases - known and unknowns. *GCB Bioenergy* 3, 277–292.
- Lupwayi, N.Z., Rice, W.A., Clayton, G.W. (1998): Soil microbial diversity and community structure under wheat as influenced by tillage and crop rotation. *Soil Biol. Biochem.* 30, 1733–1741.
- Macedo, I.C., Seabra, J.E.A., Silva, J.E.A.R. (2008): Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy* 32, 582–595.

- Manechini, C., Júnior, A.R., Donzelli, J.L. (2005): Benefits and problems of trash left in the field, in: Hassuani, J.S., Leal, M.R.L.V., Macedo, I. de C. (eds.): Biomass Power Generation: Sugar Cane Bagasse and Trash. PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento & CTC - Centro de Tecnologia Canavieira, Piracicaba, pp. 27–35.
- Moritsuka, N., Yanai, J., Mori, K., Kosaki, T. (2004): Biotic and abiotic processes of nitrogen immobilization in the soil-residue interface. *Soil Biol. Biochem.* 36, 1141–1148.
- Otto, R., Castro, S.A.Q., Mariano, E., Castro, S.G.Q., Franco, H.C.J., Trivelin, P.C.O. (2016): Nitrogen Use Efficiency for Sugarcane-Biofuel Production: What Is Next? *Bioenergy Res.* 9, 1272–1289.
- Otto, R., Franco, H.C.J., Faroni, C.E., Vitti, A.C., Trivelin, P.C.O. (2009): Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 44, 398–405.
- Pan, F.-F., Yu, W.-T., Ma, Q., Zhou, H., Jiang, C.-M., Xu, Y.-G., Ren, J.-F. (2017): Influence of ¹⁵N-labeled ammonium sulfate and straw on nitrogen retention and supply in different fertility soils. *Biol. Fertil. Soils* 53, 303–313.
- Park, S.E., Webster, T.J., Horan, H.L., James, A.T., Thorburn, P.J. (2010): A legume rotation crop lessens the need for nitrogen fertiliser throughout the sugarcane cropping cycle. *F. Crop. Res.* 119, 331–341.
- Pereira, A.R., Angelocci, L.R., Sentelhas, P.. (2007): Meteorologia agrícola. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz,” Piracicaba.
- Prado, H. (2014): Pedologia fácil: aplicação em solos tropicais. UFV, Viçosa.
- Raij, B. van, Andrade, J.C., Cantarella, H., Tavares, S., Quaggio, J.A. (2001): Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Instituto Agrônomo, Campinas.
- Resende, A.S. de, Santos, A., Xavier, R.P., Coelho, C.H., Gondim, A., Oliveira, O.C., Alves, B.J.R., Boddey, R.M., Urquiaga, S. (2006): Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 30, 937–941.
- Resende, A.S. de, Xavier, R.P., Quesada, D.M., Urquiaga, S., Alves, B.J.R., Boddey, R.M. (2003): Use of green manures in increasing inputs of biologically fixed nitrogen to sugar cane. *Biol. Fertil. Soils* 37, 215–220.
- Robertson, F.A., Thorburn, P.J. (2007): Management of sugarcane harvest residues: Consequences for soil carbon and nitrogen. *Aust. J. Soil Res.* 45, 13–23.
- Rolim, G.S., Sentelhas, P.C., Barbieri, V. (1998): Planilhas no ambiente ExcelTM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Rev. Bras. Agrometeorol.* 6, 133–137.
- Sánchez, C.E.B. (2017): Produtividade da cana-de-açúcar e qualidade química do solo em função da rotação de cultura e remoção da palha. Universidade de São Paulo.

- Smith, D.M., Inman-Bamber, N.G., Thorburn, P.J. (2005): Growth and function of the sugarcane root system. *F. Crop. Res.* 92, 169–183.
- Soil Survey Staff (2014): Keys to soil taxonomy. *Soil Conserv. Serv.* 12, 410.
- Sordi, R. de A., Manechini, C. (2013): Utilization of trash: a view from the agronomic and industrial perspective. *Sci. Agric.* 70, 1–2.
- Tanguilig, V.C., Yambao, E.B., O'toole, J.C., De Datta, S.K. (1987): Water stress effects on leaf elongation, leaf water potential, transpiration, and nutrient uptake of rice, maize, and soybean. *Plant Soil* 103, 155–168.
- Team, R.C. (2014): R: A language and environment for statistical computing.
- Tenelli, S. (2016): Disponibilidade do nitrogênio no solo e produtividade da cana-de-açúcar em função da rotação de culturas. Universidade de São Paulo.
- Trivelin, P.C.O., Franco, H.C.J., Otto, R., Ferreira, D.A., Vitti, A.C., Fortes, C., Faroni, C.E., Oliveira, E.C.A., Cantarella, H. (2013): Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. *Sci. Agric.* 70, 345–352.
- Trivelin, P.C.O., Lara Cabezas, W.A.R., Victoria, R.L., Reichardt, K. (1994): Evaluation of a ^{15}N plot design for estimating plant recovery of fertilizer nitrogen applied to sugar cane. *Sci. Agri.* 51, 226–234.
- Vieira-Megda, M.X., Mariano, E., Leite, J.M., Franco, H.C.J., Vitti, A.C., Megda, M.M., Khan, S.A., Mulvaney, R.L., Trivelin, P.C.O. (2015): Contribution of fertilizer nitrogen to the total nitrogen extracted by sugarcane under Brazilian field conditions. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 101, 241–257.
- Vitti, A.C. (2003): Adubação nitrogenada da cana-de-açúcar (soqueira) colhida mecanicamente sem a queima prévia: Manejo e efeito na produtividade. Universidade de São Paulo.
- Vitti, A.C., Cesar, P., Trivelin, O., Cantarella, H., Franco, C.J., Faroni, C.E., Otto, R., Olivetti, M. (2008): Mineralização da palhada e crescimento de raízes de cana-de-açúcar relacionados com a adubação nitrogenada de plantio. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 32, 2757–2762.
- Vitti, A.C., Trivelin, P.C.O., Gava, G.J.C., Penatti, C.P., Bologna, I.R., Faroni, C.E., Franco, H.C.J. (2007): Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. *Pesqui. Agropecu. Bras.* 42, 249–256.
- Zabed, H., Sahu, J.N., Suely, A., Boyce, A.N., Faruq, G. (2017): Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 1–27.

ANEXOS

Figura 10. Reinstalação dos tratamentos. A e B – Representação das parcelas após a remoção de palha realizada após a colheita. C – Parcela com 0% de palha em agosto de 2015. D – Representação da aplicação de fertilizante nitrogenado, notando que na LC a aplicação foi realizada após a aplicação do ^{15}N nas microparcels. E e F – Representação das microparcels com ^{15}N nas parcelas com 100 e 0% de palha.

Figura 11. Avaliações realizadas em novembro de 2015. A – Representação da quantidade de palha na parcela com 100% de palha. B – Representação da quantidade de palha na parcela com 50% de palha. C – Representação da quantidade de palha na parcela com 0% de palha. D – Biometria realizada para determinação do acúmulo de N na planta. E – Pesagem dos perfilhos após a biometria. F – Moagem dos perfilhos.

Figura 12. Avaliações realizadas em fevereiro de 2016. A – Representação da quantidade de palha na parcela com 100% de palha. B – Representação da quantidade de palha na parcela com 50% de palha. C – Representação da quantidade de palha na parcela com 0% de palha. D – Biometria realizada para determinação do acúmulo de N na planta. E – Pesagem dos perfilhos após a biometria. F – Moagem dos perfilhos.

Figura 13. Avaliações realizadas em maio de 2016. A – Representação da quantidade de palha na parcela com 100% de palha. B – Representação da quantidade de palha na parcela com 50% de palha. C – Representação da quantidade de palha na parcela com 0% de palha. D – Representação da parcela após a remoção da palha. E – Demonstração dos pontos de coleta de solo. F – Camada abaixo de 0,2 m coletada com auxílio de trado.

Figura 14. Biometria realizada em maio de 2016. A e B – Representação da remoção da folha seca e armazenamento em saco plástico. C – Corte do colmo da cana-de-açúcar após despalha. D – Parcela após a biometria nas 3 linhas (LC e duas LA). E – Compartimentos da cana-de-açúcar separados para remoção do ponteiro. F – Retirada do ponteiro.

Figura 15. Moagem em maio de 2016. A – Organização das amostras para moagem em ordem crescente de abundância de ^{15}N . B – Moagem da folha seca da cana-de-açúcar. C – Moagem do ponteiro da cana-de-açúcar. D – Colmos organizados para moagem. E – Homogeneização da amostra após moagem. F – Armazenamento em saco plástico devidamente identificados.