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

Produtividade da cana-de-açúcar e qualidade química do solo em função da
rotação de cultura e remoção da palha

Camilo Ernesto Bohórquez Sánchez

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

Piracicaba
2017

Camilo Ernesto Bohórquez Sánchez
Engenheiro Agrônomo

Produtividade da cana-de-açúcar e qualidade química do solo em função da rotação de cultura e
remoção da palha
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**

Bohórquez Sánchez, Camilo Ernesto

Produtividade da cana-de-açúcar e qualidade química do solo em função da rotação de cultura e remoção da palha / Camilo Ernesto Bohórquez Sánchez. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2017.

81 p.

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

1. *Saccharum* sp 2. Cobertura vegetal 3. Adubo verde 4. Crotalária I. Título

A minha mãe **Ana Silvia**, mulher admirável, de enorme coragem e gigante coração.

A meu pai **Daniel**, anjo da guarda que do céu tem cuidado de mim.

A meus irmãos **Daniel e Oscar**, melhores amigos e confidentes da minha vida.

A **Don Fabio** (*in memoriam*), homem sábio e exemplar que me ensinou o caminho da Agronomia.

DEDICO.

Ao receptivo e alegre povo Brasileiro,

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

A **Deus** por todas as bênçãos recebidas a cada minuto deste caminho percorrido.

A minha família, especialmente minha mãe **Ana Silvia** e meu pai **Daniel** (*in memoriam*) pela milagre da vida, pelo amor irrestrito e carinho recebido. A meus irmãos **Daniel e Oscar**, por cada palavra dita e cada ação feita, sempre visando o melhor para mim. A meu sobrinho **Samuel** por ser mais um motivo de alegria e união familiar. A meu padrinho **Fabio Adolfo** por sempre estar presente como meu segundo pai.

À **Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-USP)**, ao **Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas** e ao Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade de me formar como mestre em tão exemplar e prestigiosa instituição.

Ao Prof. Dr. **Rafael Otto** pela confiança oferecida desde o início do mestrado, pelos ensinamentos, orientação e paciência durante mais de dois anos de trabalho em conjunto.

À **Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)** pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa. Ao **CNPq** e ao programa **PEC-PG** pela bolsa de estudos concedida.

Aos colegas de Pós-Graduação: **Sarah Tenelli, Acácio Mira, Thales Sattolo, Lillian Moreira e Rafaela Migliavacca** pelos momentos compartilhados, auxílio recebido e grande companheirismo. Agradeço especialmente ao **Saulo Q. de Castro** pela parceria, imenso apoio em cada uma das fases do mestrado, e por ser um grande exemplo de pesquisador e profissional do setor agrário.

Ao **Grupo de Apoio à Pesquisa e Extensão (GAPE)** pela infraestrutura e toda ajuda ofertada; a seu fundador, o Prof. Dr. **Godofredo Cesar Vitti** por sua paixão contagiante pela nossa bela profissão.

Às usinas Boa Vista e Iracema (**Grupo São Martinho**), usina Quatá (**Grupo Zilor**), e usina Porto das Águas (**Grupo Cerradinho**) pela concessão das áreas experimentais, e a seus trabalhadores pela colaboração durante todos os trabalhos de campo dos experimentos.

Ao **Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE)** pela colaboração mútua durante o desenvolvimento desta pesquisa, em especial ao **João Luis Nunes Carvalho** pelas sugestões feitas com o fim de aprimorar esta pesquisa.

À **Silvia Helena Carvalho** pelo suporte administrativo e pela ajuda e paciência na coordenação de todas as viagens de campo.

A todos os colegas que foram de grande ajuda na avaliação dos experimentos em campo e preparo de amostras: **Eduardo Zavachi, Leandro Barbosa, Leandro Carolino, Oriel Kölln, Alessandra Rigotto, Acácio Mira, Aline Pertuzati, Caroline Marchi, Kauê Tonelli, Bianca Machado, Pedro Miguel Silva, Felipe Brito, Leonardo Vargas, Gabrieli Camargo, Giovane Moreno, Lilian Moreira, Paula Carneiro, Laura Landucci, Ana Carolina da Silva, Geovânia Rezende, Breno Nyssen, Bruno Loman, Mariana Leite, Miller Ruiz e Matheus Docema.**

À **Paula Andrea Ortega** pela valiosa ajuda em campo e laboratório, e por sua capacidade de ter sempre uma palavra certa para cada momento de estresse e dificuldade durante a pós-graduação.

Aos técnicos de laboratório **Luiz Silva** (Química e fertilidade do solo) e **Cleusa Pereira Cabral** (Nutrição de plantas – CENA) pelos ensinamentos e ajuda recebida durante as análises de solo e planta. Ao **José Roberto dos Santos e Luiz Carlos Mathias** pelo auxílio no preparo de amostras de solo.

À Prof. **Renata Alcarde** e ao **Eduardo Mattos** pelo auxílio recebido nas análises estatísticas

À **Maria Gmach** pela ajuda na revisão deste trabalho e por ter sido um constante apoio para a bem-sucedida finalização do mestrado.

Aos membros da banca examinadora: **Prof. Dr. Carlos Eduardo Cerri, Dr. João Luis Nunes Carvalho e Dr. Mauricio Cherubin** pelas valiosas correções e contribuições neste trabalho

A **Los Caravanas**, colombianos de nascimento e por adoção que trouxeram um pouco da minha pátria a Piracicaba. A **Eliana Méndez e Vannesa Díaz**, que mesmo de longe, sempre ajudaram com sua força e motivação.

À **República Matadouro**, seus moradores, ex-moradores e agregados, por ser essa família que me adoptou desde meu primeiro dia no Brasil e me permitiu compartilhar momentos inesquecíveis que enaltecem o valor da amizade.

A **você** caro leitor ou leitora, que com seu interesse em consultar esta dissertação faz com que todo o esforço e dedicação tenham valido a pena. Finalmente agradeço a **todos** aqueles que diretamente ou indiretamente contribuíram para o bom êxito desta maravilhosa etapa.

Quando a gratidão é tão absoluta, as palavras sobram. Álvaro Mutis.

EPÍGRAFE

“Certo cinismo tradicional no estudo da história humana tende a apresentar a “habilidade” como um fator fundamental para o êxito, enquanto que em si mesma, sem a ajuda de uma forte convicção, é incapaz de provocar uma mudança realmente decisiva.”

Michel Houellebecq

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO	11
REFERÊNCIAS	13
2. PARÂMETROS PRODUTIVOS DA CANA-DE-AÇÚCAR SUBMETIDA A ROTAÇÃO DE CULTURA E REMOÇÃO DE PALHA	15
RESUMO	15
ABSTRACT	15
2.1. INTRODUÇÃO	16
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	18
2.2.1. <i>Caracterização da área experimental</i>	18
2.2.2. <i>Tratamentos e delineamento experimental</i>	22
2.2.3. <i>Avaliações</i>	24
2.2.4. <i>Análise estatística</i>	25
2.3. RESULTADOS	25
2.3.1. <i>Perfilhamento</i>	25
2.3.2. <i>Índice SPAD</i>	27
2.3.3. <i>Teor foliar de N</i>	27
2.3.4. <i>Produtividade</i>	29
2.4. DISCUSSÃO	32
2.4.1. <i>Perfilhamento</i>	32
2.4.2. <i>Índice SPAD e teor foliar de N</i>	33
2.4.3. <i>Produtividade</i>	35
2.5. CONCLUSÕES	37
REFERENCIAS	38
3. EFEITO DA ROTAÇÃO DE CULTURA E REMOÇÃO DE PALHA NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO	45
RESUMO	45
ABSTRACT	45
3.1. INTRODUÇÃO	46
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	48
3.2.1. <i>Caracterização da área experimental</i>	48
3.2.2. <i>Tratamentos e delineamento experimental</i>	49
3.2.3. <i>Amostragem e análises químicas de solo</i>	51
3.2.4. <i>Calculo de estoques de C e N</i>	52
3.2.5. <i>Análise estatística</i>	52
3.3. RESULTADOS	52
3.3.1. <i>Atributos químicos</i>	52
3.3.2. <i>Estoques de C e N</i>	62
3.4. DISCUSSÃO	66
3.4.1. <i>Atributos químicos</i>	66
3.4.2. <i>Estoques de C e N</i>	70
3.5. CONCLUSÕES	72
REFERENCIAS	72

RESUMO

Produtividade da cana-de-açúcar e qualidade química do solo em função da rotação de cultura e remoção da palha

Limitações nas reservas de combustíveis fósseis e a crescente concentração de gases de efeito estufa na atmosfera tem aumentado o interesse para incrementar a participação da cana-de-açúcar como fonte de biomassa para geração de energia renovável. O uso dos resíduos de colheita da cana-de-açúcar para produção de eletricidade e etanol de segunda geração foi intensificado nos últimos anos, sem haver conhecimento claro das implicações da retirada total ou parcial da palha na produtividade da cultura e qualidade do solo a médio e longo prazo. O objetivo deste estudo foi avaliar a produtividade da cana-de-açúcar, os atributos químicos e os estoques de C e N no solo sob níveis de remoção de palha em áreas com e sem rotação com crotalária. Os parâmetros produtivos da cana-de-açúcar foram avaliados em áreas experimentais localizadas em Quirinópolis/GO, Chapadão do Céu/GO, Iracemápolis/SP e Quatá/SP, enquanto os atributos químicos e os estoques de C e N do solo foram avaliados em Quirinópolis/GO e Quatá/SP, locais com solos de textura argilosa e arenosa, respectivamente. Em cada local, foram instalados dois experimentos, um com rotação com crotalária e outro sem rotação com crotalária (pousio) na renovação do canavial. Após a colheita da cana-planta, foram instalados os tratamentos de soqueira referentes aos níveis de 0, 50 e 100% de manutenção de palha. Os parâmetros produtivos foram avaliados nos dois anos seguintes, enquanto os efeitos no solo foram avaliados no final do segundo ciclo agrícola. A manutenção de palha aumentou a produtividade de colmos em três áreas (Quirinópolis/GO, Chapadão do Céu/GO e Quatá/SP) e reduziu a produtividade em um local (Iracemápolis/SP). O efeito benéfico da rotação com crotalária foi menos persistente no tempo do que a manutenção da palha. Os atributos químicos do solo foram mais influenciados pelos tratamentos no solo argiloso do que no solo arenoso. No solo argiloso, a interação da rotação com crotalária e manutenção da palha aumentou os teores de Mg e o V%, e reduziu a acidez potencial do solo. A rotação aumentou os teores de P, K nos dois solos estudados e a CTC no solo argiloso. A rotação com crotalária não afetou os estoques de C e N, enquanto que a manutenção de palha favoreceu o acúmulo de C nos dois tipos de solo.

Palavras-chave: *Saccharum* sp.; Cobertura vegetal; Adubo verde; Crotalária

ABSTRACT

Sugarcane productivity and chemical soil quality as a function of crop rotation and straw removal

The limited fossil reserves and the growing concentration of greenhouse gases in the atmosphere, have augmented the interest for a greater participation of sugarcane as a source of biomass for renewable energy generation. The use of sugarcane harvest residues for the production of electricity and second generation ethanol has been intensifying in recent years, without having a clear understanding of the implications of total or partial removal of the straw on the crop productivity and soil quality in the medium and long term. The objective of this study was to evaluate sugarcane productivity, soil chemical attributes and C and N stocks in the soil under straw removal levels in areas with and without sunn hemp rotation. The productivity parameters of sugarcane were evaluated in experimental areas located in Quirinópolis / GO, Chapadão do Céu / GO, Iracemápolis / SP and Quatá / SP, while the chemical attributes and the soil C and N stocks were studied in Quirinópolis / GO and Quatá / SP, places with clay and sandy soils respectively. In each site, two experiments were installed, one with sunn hemp rotation and the other without sunn hemp (fallow) in the renovation of the cane field. After harvesting of the cane-plant, were installed the ratooning treatments referring to the levels of 0, 50 and 100% of straw maintenance were installed. The productive parameters were evaluated in the following two years, while the effects on the soil were evaluated at the end of the second agricultural cycle. The straw retention increased the yield of stalks in three areas (Quirinópolis / GO, Chapadão do Céu / GO and Quatá / SP) and reduced productivity in one place (Iracemápolis / SP). The beneficial effect of rotation with sunn hemp was less persistent in the time than the maintenance of the straw. The chemical attributes of the soil were more influenced by treatments in the clay soil than in the sandy soil. In the clay soil, the rotation interaction with crotalaria and straw maintenance increased the Mg and %BS, and reduced the potential acidity of the soil. The rotation increased the P, K content in the two studied soils and the CEC in the clay soil. Sunn hemp rotation did not affect soil C and N stocks, and maintenance of straw favored C accumulation in both types of soil.

Keywords: *Saccharum* sp.; Surface mulch; Green manure; Sunn hemp

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade da produção de biocombustíveis, do ponto de vista ambiental, social e econômico, é uma questão fundamental no cenário energético atual, tornando-se uma estratégia importante para prolongamento das reservas de combustíveis fósseis, desenvolvimento de economias rurais e garantia de suprimentos energéticos na escala global (Goldemberg 2007). Neste contexto, o etanol obtido a partir de cana-de-açúcar tem grande destaque, principalmente por apresentar baixo gasto energético no processo produtivo e possibilitar a redução da emissão de gases de efeito estufa (GEE), fazendo desta cultura a fonte de biomassa mais competitiva para uso energético (Börjesson 2009; Matsuoka e Stolf 2012). A cana-de-açúcar é uma cultura bastante versátil que pode ser usada para produção de açúcar, etanol de primeira e segunda geração e energia elétrica a partir de sistemas de cogeração (Carvalho et al. 2016).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e o segundo maior produtor e consumidor de etanol, com estimativas de produção de mais de 685 milhões de toneladas de cana-de-açúcar para obtenção de 28 bilhões de litros de etanol e 40 milhões de toneladas de açúcar na safra 2016/2017 (CONAB, 2016). Além destes produtos principais, a cana-de-açúcar cultivada no Brasil produz mais de 100 milhões de toneladas de palha por ano, o que representa cerca de 52 % da produção mundial deste resíduo vegetal, que potencialmente pode ser utilizado na produção de etanol de segunda geração (Ullah et al. 2015) e energia elétrica (Hassuani et al. 2005).

Com o aumento da demanda energética mundial, provavelmente os biocombustíveis de primeira geração não conseguirão suprir o requerimento global sem afetar a segurança alimentar em países em desenvolvimento, já que o aumento excessivo de culturas destinadas para este fim pode gerar mudança de uso da terra e aumento do preço dos alimentos (Dias et al. 2011). Por essa razão, tem aumentado o interesse global no uso de materiais lignocelulósicos como matéria prima para produção de biocombustíveis de segunda geração, onde o sistema de cana-de-açúcar colhida sem queima (cana crua) é uma estratégia interessante para aproveitar a palha como um insumo que permita aumentar o desempenho energético da cana-de-açúcar e o uso eficiente da terra. De fato, tem-se reportado que a palha, junto com o bagaço, representam dois terços do potencial energético da cana-de-açúcar, o que faz da palha um questão-chave para abordar a subutilização da cana-de-açúcar como fonte de energia (Leal et al. 2013; Carvalho et al. 2016). Este cenário evidencia a necessidade de maior conhecimento dos efeitos da manutenção ou retirada da palha do campo sobre as propriedades do solo e a produtividade da cultura em médio e longo prazo.

Normalmente existe uma relação na proporção de palha e colmos de 14 a 18 % no sistema de colheita de cana crua, deixando sobre o solo uma cobertura vegetal residual de 10 a 30 Mg ha⁻¹, quantidade dependente do manejo, cultivar utilizada, estado vegetativo, condições edafoclimáticas e produtividade da cultura (Hassuani et al. 2005; Vitti et al. 2007; Leal et al. 2013). Geralmente, a proporção da composição da palha é de 54% para folhas secas e 46% para ponteiros (Franco et al. 2013). A palha influencia todo o processo produtivo da cana-de-açúcar, incluindo aspectos como produção, manejo da adubação e controle de plantas daninhas e adicionalmente, gera benefícios como a ciclagem de nutrientes presentes nos resíduos

que são reutilizados pelas rebrotas da cultura, aumento e estabilização da umidade do solo, aumento dos teores de matéria orgânica e redução dos efeitos adversos da erosão (Campos et al. 2008).

Como desvantagens, a disposição da palha na superfície do solo pode ainda interferir na criação de um microclima ideal para o desenvolvimento de pragas e doenças, onde a ligação entre o sistema de colheita de cana sem queima e o incremento da população de cigarrinha da raiz (*Mahanarva fimbriolata*) e da broca da cana-de-açúcar (*Diatraea saccharalis*), é um dos maiores desafios fitossanitário a ser resolvido (Leal et al. 2013). Adicionalmente, pode-se citar como outras desvantagens a perda considerável de N por volatilização de NH_3 pela aplicação superficial de ureia (Mariano et al. 2012), o maior risco de queima acidental durante e após a colheita (Campanhão 2003) e problemas de brotação da soqueira em regiões com temperaturas baixas no inverno (Campos et al., 2008; Campos et al., 2010).

Considerando suas enormes dimensões, a produção brasileira de cana-de-açúcar se caracteriza por ser um sistema de agricultura intensiva no qual o fluxo de nutrientes é consideravelmente alto, o que pode gerar diminuição da reserva nutricional do solo em virtude da remoção por parte da cultura ou de processos de erosão (Gopalasundaram et al. 2012), o que faz da cobertura de palha um elemento chave não só para a geração de energia, mas também para a preservação da qualidade do solo em virtude dos benefícios que pode oferecer sua manutenção no agrossistema. Lal (2008) afirma que a remoção excessiva e contínua de resíduos vegetais pode prejudicar a qualidade do solo, reduzir a produtividade das culturas e acentuar a erosão hídrica e eólica. Na cana-de-açúcar, a remoção da palha também pode afetar a sustentabilidade da produção devido ao potencial em diminuir a diversidade microbiana do solo e afetar a conservação do solo (Carvalho et al. 2016). Ao avaliar atributos microbianos em solos com e sem palha de cana-de-açúcar, Souza et al. (2012) obtiveram 102% mais C da biomassa microbiana nos solos com cobertura do que em solos sem cobertura, tendência que se manteve no caso do N da biomassa microbiana que foi 34% maior no solo com palha de cana-de-açúcar. Rachid et al. (2016) afirmam que a comunidade fungica do solo, altamente eficiente em quebrar cadeias longas e complexas de C como as da palha da cana-de-açúcar, é mais afetada do que a comunidade bacteriana com a remoção total ou parcial da palha de cana-de-açúcar.

Uma estratégia para mitigar os efeitos negativos da retirada da palha de cana-de-açúcar seria o plantio de leguminosas em rotação no período de renovação do canavial para ser usadas como adubo verde, e a adoção de técnicas conservacionistas de preparo do solo. A rotação com leguminosas pode ser usada para induzir mudanças nas condições do solo, pois além de prover N ao sistema solo-planta pela fixação biológica de nitrogênio (FBN), gera melhoria nas propriedades químicas (Caceres e Alcarde 1995; Bokhtiar et al. 2003; Ambrosano et al. 2005), físicas (Braunack et al. 2003) e biológicas (Stirling et al. 2001; Ambrosano et al. 2011) do solo. Por outro lado, a adoção de plantio direto ou cultivo mínimo, apesar de pouco utilizada em áreas com cana-de-açúcar, tem potencial de reduzir problemas de erosão, manter ou aumentar a produtividade da cultura e reduzir custos de produção (Fortes et al., 2011; Cury et al., 2014). De fato, os sistemas de cultivo mínimo, combinados com a rotação de culturas, promovem maior quantidade de canais e macroporos que melhoram a infiltração de água no perfil do solo. O aumento da diversidade microbiana, e o efeito que isto tem no controle dos microrganismos patogênicos, se apresenta como outro benefício da adoção conjunta destas técnicas de conservação de solo (Hobbs et al. 2008). Assim, a rotação de culturas

com leguminosas associada ao cultivo mínimo do solo, são estratégias que podem mitigar os efeitos negativos da remoção parcial ou total da palha nas propriedades do solo e produtividade da cultura.

Levando em consideração o cenário descrito, formularam-se as seguintes hipóteses:

- i) A rotação com crotalária diminui o impacto da remoção da palha na produtividade da cana-de-açúcar.
- ii) A fertilidade química e os estoques de C e N do solo são diminuídos pela remoção de palha da cana-de-açúcar, porém, esse efeito é compensado pela rotação com crotalária na reforma do canavial.

Referências

- Ambrosano, EJ, H. Cantarella, G. M. B. Ambrosano, E. A. S., F. L. F. Dias, F. Rossi, P. C. O. Trivelin, T. Muraoka, R. C. C. Sachs, and R. Azcón. 2011. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. *Bragantia* 70: 810–818. doi:10.1590/S0006-87052011000400012.
- Ambrosano, EJ, P. C. O. Trivelin, H. Cantarella, G. M. B. Ambrosano, E. A. Schammas, N. Guirado, F. Rossi, P. C. D. Mendes, and T. Muraoka. 2005. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. *Scientia Agricola* 62: 534–542. doi:10.1590/S0103-90162005000600004.
- Bokhtiar, S. M., M. a. Gafur, and a. B. M. M. Rahman. 2003. Effects of Crotalaria and Sesbania aculeata green manures and N fertilizer on soil fertility and the productivity of sugarcane. *The Journal of Agricultural Science* 140: 305–309. doi:10.1017/S0021859603003022.
- Börjesson, P. 2009. Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective - What determines this? *Applied Energy* 86. Elsevier Ltd: 589–594. doi:10.1016/j.apenergy.2008.11.025.
- Braunack, M, A Garside, and M Bell. 2003. The effect of rotational breaks from continuous sugarcane on soil physical properties. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.* 25.
- Caceres, N. T., and J. C. Alcarde. 1995. Adubação Verde com Leguminosas em Rotação com Cana-de-Açúcar (*Saccharum* spp). *Revista STAB* 13: 16–20.
- Campanhão, J. M.. 2003. Manejo da soqueira de cana-de-açúcar submetida à queima acidental da palhada remanescente da colheita mecanizada.
- Campos, L. H. F., S. J. P. de Carvalho, P. J. C., C. Fortes, and J. S. da Silva. 2008. Crescimento e Produtividade da Cana-de-Açúcar (Var . SP83-2847) Submetida a Três Manejos da Palhada. *STAB-Açúcar, Alcool e Subprodutos* 26.
- Carvalho, J. L. N., R. C. Nogueiro, L. M. S. Menandro, R. O. Bordonal, D. C. Borges, H. Cantarella, and H. C. J. Franco. 2016. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. *GCB Bioenergy*: 1–16. doi:10.1111/gcbb.12410.
- Dias, M. O.S., M. P. Cunha, C. D F Jesus, G. J. M. Rocha, J. G. C. Pradella, C. E. V. Rossell, R. M. Filho, and A. Bonomi. 2011. Second generation ethanol in Brazil: Can it compete with electricity production? *Bioresource Technology* 102: 8964–8971. doi:10.1016/j.biortech.2011.06.098.
- Franco, H C J, M T B Pimenta, J L N Carvalho, P S G Magalhães, C E V Rossell, Oscar Antonio Braunbeck, a C Vitti, O T Kolln, and J Rossi Neto. 2013. Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. *Scientia Agricola* 70: 305–312. doi:10.1590/S0103-90162013000500004.
- Goldemberg, J. 2007. Ethanol for a sustainable energy future. *Science* 315: 808–10. doi:10.1126/science.1137013.
- Gopalasundaram, P., A. Bhaskaran, and P. Rakkiyappan. 2012. Integrated Nutrient Management in Sugarcane. *Sugar Tech* 14: 3–20. doi:10.1007/s12355-011-0097-x.

- Hassuani, S, MRLV Leal, and IC Macedo. 2005. *Biomass Power Generation, Sugarcane Bagasse and Trash*. Edited by Suleiman José Hassuani, Manoel Regis Lima Verde Leal, and Isaías de Carvalho Macedo. *Biomass power generation: Sugar cane bagasse and trash*. Piracicaba, SP, Brasil: PNUD, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento CTC, Centro de Tecnologia Canavieira. doi:10.1016/S0378-3820(97)00058-1.
- Hobbs, P R, K Sayre, and R. Gupta. 2008. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 363: 543–555. doi:10.1098/rstb.2007.2169.
- Lal, R. 2008. Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production. *Waste Management* 28: 747–758. doi:10.1016/j.wasman.2007.09.023.
- Leal, M L V, M. V. Galdos, F. V. Scarpore, Joaquim E A Seabra, Arnaldo Walter, and Camila O F Oliveira. 2013. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. *Biomass and Bioenergy* 53: 11–19. doi:10.1016/j.biombioe.2013.03.007.
- Mariano, E., P. C O Trivelin, M X Vieira, J M Leite, R Otto, and H C J Franco. 2012. Ammonia losses estimated by an open collector from urea applied to sugarcane straw. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36: 411–419. doi:10.1590/S0100-06832012000200010.
- Matsuoka, S, and R Stolf. 2012. Chapter 5 - Sugarcane tillering and ratooning: Key factors for a profitable cropping. *Sugarcane: Production, Cultivation and Uses*: 137–157.
- Rachid, C. T C C, C. A. Pires, D. C A Leite, H. L C Coutinho, R. S. Peixoto, A. S. Rosado, J. Salton, et al. 2016. Sugarcane trash levels in soil affects the fungi but not bacteria in a short-term field experiment. *Brazilian Journal of Microbiology* 47. Sociedade Brasileira de Microbiologia: 322–326. doi:10.1016/j.bjm.2016.01.010.
- Souza, R A, T S Telles, W Machado, M Hungria, J T Filho, and M de F Guimarães. 2012. Effects of sugarcane harvesting with burning on the chemical and microbiological properties of the soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 155. Elsevier B.V.: 1–6. doi:10.1016/j.agee.2012.03.012.
- Souza, Z M de, A C S Paixão, R de M Prado, L G Cesarin, and S R de Souza. 2005. Manejo de palhada de cana colhida sem queima, produtividade do canavial e qualidade do caldo. *Ciência Rural* 35: 1062–1068. doi:10.1590/S0103-84782005000500012.
- Stirling, G. R., B L Blair, J A Pattemore, A L Garside, and M J Bell. 2001. Changes in nematode populations on sugarcane following fallow, fumigation and crop rotation, and implications for the role of nematodes in yield decline. *Australasian Plant Pathology* 30: 323. doi:10.1071/AP01044.
- Ullah, K, V K Sharma, S Dhingra, G Braccio, M Ahmad, and S Sofia. 2015. Assessing the lignocellulosic biomass resources potential in developing countries: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51: 682–698. doi:10.1016/j.rser.2015.06.044.
- Vitti, A C, H C J Franco, C E Faroni, H Cantarella, and P C O Trivelin. 2007. Balanço de Massa e de Nutrientes da Palhada e da Rebrotada de Cana-de-Açúcar Dessecada com Glifosato. *STAB-Açúcar, Alcool e Subprodutos* 25: 30–33.

2. PARÂMETROS PRODUTIVOS DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB ROTAÇÃO DE CULTURA E REMOÇÃO DE PALHA

RESUMO

O uso dos resíduos de colheita da cana-de-açúcar para a geração de eletricidade e etanol de segunda geração aumentou nos últimos anos como estratégia para aumentar o rendimento econômico das usinas e como resposta à crescente demanda de fontes de energia sustentáveis. Contudo, os efeitos da retirada da palha na produtividade da cana-de-açúcar, e o uso de estratégias como rotação com leguminosas na reforma do canavial para compensá-los, não são bem conhecidos. Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a produtividade da cana-de-açúcar sob níveis de remoção de palha em áreas com e sem rotação com crotalária. A pesquisa foi desenvolvida em quatro áreas experimentais com condições edafoclimáticas contrastantes, localizadas em Quirinópolis/GO (Local A), Chapadão do Céu/GO (Local B), Iracemápolis/SP (Local C) e Quatá/SP (Local D). Utilizou-se uma estrutura de grupo de experimentos composta por um experimento com plantio de crotalária e outro sem o plantio da leguminosa na reforma do canavial. Após a colheita da cana-planta, o delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com quatro repetições, onde as parcelas receberam os níveis de manutenção da palha (0, 50 e 100%) que foram avaliadas na primeira e segunda soqueira da cana-de-açúcar. Foram avaliados o perfilhamento, o índice SPAD, o teor foliar de N e a produtividade. O efeito da rotação no perfilhamento esteve restrito à primeira soqueira, enquanto que o efeito dos níveis de palha é mais persistente no tempo e parece estar relacionado com a temperatura apresentada durante as fases iniciais do cultivo e com o regime hídrico de cada local. O índice SPAD e o teor foliar de N não apresentaram tendência clara em função dos tratamentos, sendo bastante variáveis em cada local. A rotação com crotalária na renovação do canavial apresentou potencial de aumentar 8,0 Mg ha⁻¹ a produtividade média da primeira e segunda soqueiras em um dos locais avaliados. Em relação ao manejo da palha, em regiões sujeitas a déficit hídrico, a remoção de palha reduziu entre 6,0 e 15,6 Mg ha⁻¹ a produtividade de colmos; a remoção parcial da palha não diminuiu a produtividade em dois locais. No local com temperatura mais baixa no inverno, a remoção de palha evitou quedas de produtividade de 14,4 Mg ha⁻¹. A rotação de culturas não compensou os efeitos da retirada da palha na produtividade da cana-de-açúcar. O efeito da remoção da palha da cana-de-açúcar para produção de etanol ou energia pode ser negativo em locais mais sujeitos à déficit hídrico ou positiva em locais com temperaturas mais baixas.

Palavras-chave: *Saccharum* sp.; Cobertura vegetal; Adubo verde; Perfilhamento

ABSTRACT

The use of sugarcane harvest residues for the generation of electricity and second generation ethanol has been increasing in recent years as a strategy to increase the economic efficiency of the mills and in response to the growing demand for sustainable energy. However, the effects of straw removal on sugarcane productivity, and the use of strategies such as rotation with legumes in sugarcane replanting to compensate them, are not well known. The objective of this study was to evaluate sugarcane productivity under straw removal levels in areas with and without sunn hemp rotation. The research was developed in four experimental areas with contrasting soil and climatic conditions, located in Quirinópolis / GO (Local A), Chapadão do Céu / GO (Local B), Iracemápolis / SP (Local C) and Quatá / SP (Local D). Was used an experiment group structure, consisting of an experiment with planting sunn hemp and another without the planting of the legume in the cane field. After harvesting the cane-

plant, the experimental design was a randomized block design with four replications, where the plots received straw maintenance levels (0, 50 and 100%), which were evaluated in the first and second sugarcane ratoons. The tillering, SPAD index, foliar N content and productivity were evaluated. The effect of rotation on the tillering was restricted to the first ratoon, while the effect of the straw levels is more persistent in time and seems to be related to the temperature presented during the initial phases of the crop and with the particular water regimen of each place of study. The SPAD index and leaf N concentration did not present a clear trend as a function of the treatments, being quite variable in each place evaluated. Rotation of crotalaria in the replanting of sugarcane showed potential to increase 8.0 Mg ha⁻¹ the average productivity of the first and second ratoons in one of the evaluated sites. Regarding the management of straw, in regions subject to water deficit, straw removal reduced between 6.0 and 15.6 Mg ha⁻¹ the yield of stalks, the partial straw removal did not decrease productivity in two areas. In the region with the lowest winter temperature, straw removal avoided productivity drops of 14.4 Mg ha⁻¹. Crop rotation did not compensate the effects of straw removal on sugarcane productivity. The effect of removal of sugarcane straw for ethanol or energy production may be negative in locations that are more vulnerable to water deficit or positive in locations with lower temperatures.

Keywords: *Saccharum* sp.; Surface mulch; Green manure; Tillering

2.1. Introdução

O sistema de produção de cana-de-açúcar com colheita sem queima da palha constitui o cenário atual e futuro da produção de cana-de-açúcar no Brasil. Atualmente, o surgimento de novos nichos de mercado, devido a geração de eletricidade e de etanol de segunda geração a partir dos resíduos de colheita, tem evidenciado a necessidade de um maior conhecimento dos efeitos da palha sobre a produtividade da cultura.

A maioria das pesquisas no assunto tem focado na comparação entre os sistemas de cana crua, sem queima, e cana queimada (Alvarez e Castro 1999; Souza et al. 2005; Schultz et al. 2010; Tavares 2010), ou nos efeitos da disposição da palha em processos do solo e rendimento da cultura (Timm et al. 2003; Campos et al. 2008; Campos et al. 2010; Vale 2013), mas ainda é pouco o conhecimento que se tem sobre a quantidade de palha que pode ser removida sem prejudicar a longo prazo a produtividade da cultura. Há interesse da indústria em remover a palha do campo para produção de energia elétrica ou de etanol como forma de aumentar a rentabilidade do setor sucroenergético (Sordi e Manechini 2013). Entretanto, o interesse da indústria em remover do campo a maior quantidade possível de resíduos deve ser contrabalanceada pelo efeito benéfico da palha nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Cantarella et al. 2013; Carvalho et al. 2016).

Os efeitos da manutenção ou não da palha sobre o desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar são bastante complexos por envolver diversos fatores. Entre eles destaca-se o efeito da palha na brotação das socas sob a palha, incidência de pragas e doenças, disponibilidade de água, temperatura do solo, dinâmica de nutrientes e nutrição nitrogenada (Yadav et al. 1994; Ram et al. 2006; Campos et al. 2008; Souza et al. 2008; Singh et al. 2012; Fortes et al. 2013). Além disso, também existe variabilidade entre as

cultivares na quantidade de palha produzida (Landell et al. 2013) e na capacidade de brotação sob a palha, uma vez que os materiais genéticos atualmente disponíveis foram desenvolvidos em sistema de cana queimada, de modo que cada variedade pode apresentar diferentes respostas não apenas em aspectos físicos, mas também quanto as particularidades do sistema de manejo (Souza et al. 2005).

As mudanças físico-químicas no ambiente de produção, por causa da manutenção da palhada de cana-de-açúcar podem afetar a brotação e o crescimento das plantas, reduzindo a produtividade da cultura principalmente em variedades mais sensíveis aos efeitos negativos da palha no solo, até o ponto de diminuir também a longevidade do canavial (Aquino e Medina 2014). O efeito da retenção de resíduos na produtividade das culturas pode ser muito variável de uma safra para outra, assim, sob temperaturas sub-ótimas ou condições de excesso de água no solo, a manutenção de resíduos pode chegar a diminuir a produtividade em 10-20% (Wilhelm et al. 2004; Lal 2008). A diminuição da produtividade por causa da retenção de resíduos está relacionada com mudanças no microclima do solo, enquanto que aumento de produtividade tem relação com uma melhoria na qualidade do solo (Lal 2008). Porém, fatores como as condições climáticas anuais, cultivar utilizada, as condições do solo e o período de colheita, tem um maior peso na produção de cana-de-açúcar (Hassuani et al. 2005).

A dinâmica da decomposição e liberação de nutrientes a partir da palha, e de diferentes resíduos vegetais, depende de fatores ambientais, como a evapotranspiração, umidade e areação do solo, bem como características próprias dos resíduos, como a relação C:N, conteúdo de nutrientes, lignina, celulose, hemicelulose e polifenóis (Robertson e Thorburn 2007; Fortes et al. 2013). Considerando a alta relação C:N da palha de cana-de-açúcar (80:1 a 100:1) (Rossetto et al. 2013), o limitado teor de nitrogênio acarreta em uma menor velocidade de decomposição da palha, pelo que nem sempre os nutrientes da palha são transferidos rapidamente para a cana-de-açúcar.

A palha de cana-de-açúcar apresenta aproximadamente uma concentração de N, P e K de 4,4 a 5,4, 0,1 a 0,7 e 2,8 a 10,8 g kg⁻¹, respectivamente (Oliveira et al. 1999; Oliveira et al. 2002; Fortes et al. 2012; Trivelin et al. 2013). De acordo com Oliveira et al. (1999), após um ano de decomposição, são liberados para o solo 85% do K, 44% do Ca e 39% do Mg presentes na palha de cana-de-açúcar após a colheita mecanizada, enquanto que os outros macronutrientes não mostraram uma liberação significativa. Por outra parte, avaliando somente um ano agrícola, diferentes pesquisas usando técnicas isotópicas com ¹⁵N indicam que a contribuição da palhada na nutrição da cana-de-açúcar é bastante limitada, de 5% a 30%, esperando-se um efeito de maior magnitude de médio a longo prazo deste aporte de N para ciclos subsequentes (Oliveira et al. 1999; Oliveira et al. 2002; Vitti et al. 2008; Fortes et al. 2013; Ferreira et al. 2016), no qual, práticas de manejo que aportem nitrogênio ao sistema, diminuindo a imobilização do nutriente pelos microrganismos, poderiam resultar em maior velocidade de mineralização do resíduo vegetal e consequentemente aumento da disponibilidade de nitrogênio às plantas (Yamaguchi 2015).

Além de recuperar a fertilidade do solo, proporcionando aumento da capacidade de troca de cátions e da disponibilidade de macro e micronutrientes, formação e estabilização de agregados, melhoria da infiltração de água e controle dos nematoides, a adubação verde com leguminosas permite o aporte de N ao solo através da fixação biológica em quantidades que variam de acordo com a espécie e manejo da

cultura utilizada (Scivittaro et al. 2000; Ambrosano et al. 2011). Diferentes experimentos tem mostrado que a interrupção da monocultura de cana-de-açúcar usando rotação com leguminosas, como soja ou amendoim, consegue aumentar a produtividade do ciclo de cana subsequente entre 20 e 30% (Garside and Bell 2001; Braunack et al. 2003; Garside et al. 2005). Usando crotalária como cultura de rotação, Ambrosano et al. (2005), Ambrosano et al. (2010), Ambrosano et al. (2011) e Ambrosano et al. (2013) também encontraram efeitos positivos do adubo verde no rendimento da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar requer elevadas quantidades de água para poder manter sua grande produção de biomassa. Diferentes estudos tem mostrado o impacto negativo da redução da disponibilidade de água nos índices produtivos da cultura, sendo que a disponibilidade hídrica é a maior causa de variação da produtividade nos diferentes solos brasileiros (Silva et al. 2013). Aquino et al. (2015) concluíram que a maior retenção e infiltração de água no solo pela manutenção da palha de cana-de-açúcar são aspectos determinantes para evitar quedas de produtividade quando houverem períodos de estiagem durante o crescimento da cultura. A rotação de culturas também têm mostrado efeitos positivos na dinâmica da água no solo, Thierfelder e Wall (2010) afirmam que sistemas que incluíram crotalária na rotação, apresentaram taxas de infiltração de água e porcentagem de umidade do solo significativamente maiores do que em sistemas convencionais sem rotação, afetando positivamente a produtividade das culturas comerciais.

Assim, um balanço entre impactos agrônômicos e o valor econômico e energético da palha deve considerar que a quantidade ideal de palha a ser deixada no campo depende das condições locais, práticas agrícolas, características da palha e do uso final pretendido (Leal et al. 2013), além da interação que pode haver entre os efeitos da palha no solo e os de outras práticas conservacionistas, como a rotação de culturas. A falta de um consenso sobre os efeitos da remoção de palha no rendimento da cana-de-açúcar, corrobora a necessidade de estudos de longa duração sob condições edafoclimáticas contrastantes (Carvalho et al. 2016).

Diante do exposto, formulou-se a hipótese de que a rotação com crotalária diminui o impacto da remoção da palha na produtividade da cana-de-açúcar. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a produtividade da cana-de-açúcar sob níveis de remoção de palha em áreas com e sem rotação com crotalária.

2.2. Material e métodos

2.2.1. Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em quatro locais com características edafoclimáticas contrastantes, localizados nos municípios de Quirinópolis-GO (Local A, 18°32'S, 50°26'O e 500 m alt.), Chapadão do Céu-GO (Local B, 18°25'S, 42°33'O e 850 m alt.); Iracemápolis-SP (Local C, 22°34'S, 47°31'O e 608 m alt.) e Quatá-SP (Local D, 22°14'S, 50°42'O e 540 m alt.). Segundo a classificação climática de Köppen, no local A o clima predominante é do tipo Aw (tropical), no local B Am (clima tropical de monções), no local

C é Cwa (subtropical chuvoso com verão quente e inverno seco) e no local D é do tipo Cfa (subtropical húmido).

No local A, o solo foi classificado como Latossolo Vermelho eutrófico de textura argilosa, no local B é Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa, no local C o solo foi classificado como Nitossolo Vermelho eutrófico de textura muito argilosa e no local D como Latossolo Vermelho álico de textura arenosa (Santos et al. 2006). Foi realizada a caracterização do solo dos quatro locais (Tabela 1), avaliando os atributos químicos conforme a metodologia de Raij et al. (2001). A respeito dos atributos físicos, a análise granulométrica foi feita pelo método de pipeta (EMBRAPA 1997). A amostragem para as análises de C e N no solo foi feita antes da instalação dos experimentos de crotalaria e os teores determinados por combustão seca (Nelson e Sommers 1996), por meio do equipamento LECO TruSpec CN (Tabela 2).

Tabela 1. Caracterização química e física dos solos das áreas experimentais antes da instalação do experimento.

Camada	pH	P	K	Ca	Mg	Al	Al+H	CTC	V	Areia	Silte	Argila
m	CaCl ₂	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³					%	g kg ⁻¹			
Local A												
0,0-0,1	5,5	9,5	5,8	44	15,8	0,2	23	89	74	267	186	547
0,1-0,2	5,5	8,2	3,7	43	12,2	0,2	23	82	72	249	190	561
0,2-0,4	5,5	6,7	2,6	34	8,3	0,2	21	66	68	225	195	580
0,4-0,6	5,6	6,8	0,9	28	6,3	0,2	20	55	64	226	175	599
0,6-1,0	5,7	6,2	0,7	22	6,8	0,3	18	48	62	234	171	595
Local B												
0,0-0,1	5,1	14,7	2,9	33	12,3	0,7	27	76	64	218	161	621
0,1-0,2	5,2	11,8	2,1	28	8,5	0,7	28	67	58	208	150	642
0,2-0,4	4,8	6,0	1,2	16	4,6	2,6	37	58	37	200	145	655
0,4-0,6	4,8	5,0	1,0	13	3,0	2,0	31	47	35	181	138	681
0,6-1,0	4,8	4,5	1,0	12	3,0	1,5	27	43	38	177	104	719
Local C												
0,0-0,1	4,4	76,8	7,6	20	8,7	14	40	90	40	148	206	646
0,1-0,2	4,4	48,8	6,9	19	7,5	13	47	93	36	145	189	666
0,2-0,4	4,5	28,0	6,6	17	7,2	8	35	74	44	126	188	686
0,4-0,6	4,7	8,3	6,7	18	6,5	4	34	70	46	92	167	739
0,6-1,0	4,7	7,7	7,1	17	6,0	4	32	66	46	85	157	758
Local D												
0,0-0,1	5,1	24,2	0,8	16	5,7	0,3	13	36	63	853	60	87
0,1-0,2	4,7	16,0	0,3	10	3,2	4,5	13	31	42	832	60	108
0,2-0,4	4,6	9,0	0,3	10	2,8	5,2	12	30	43	801	57	142
0,4-0,6	4,5	7,0	0,2	8	2,2	6,2	12	28	35	783	73	144
0,6-1,0	4,5	5,5	0,2	7	2,2	6,7	11	28	34	763	78	159

Tabela 2. Teor de C e N total no solo nas quatro áreas antes da instalação dos experimentos de níveis de palha.

Camada (m)	Local A	Local B	Local C	Local D
C total g kg⁻¹				
0,0-0,1	21,3	24,2	26,2	4,4
0,1-0,2	19,6	19,0	20,3	3,0
0,2-0,4	12,7	19,0	14,4	2,7
0,4-0,6	9,7	14,9	12,4	2,6
0,6-1,0	9,0	12,2	10,6	2,3
N total g kg⁻¹				
0,0-0,1	1,6	1,5	1,9	0,2
0,1-0,2	1,5	1,1	1,5	0,2
0,2-0,4	0,9	1,0	1,2	0,2
0,4-0,6	0,6	0,8	0,9	0,2
0,6-1,0	0,6	0,7	0,7	0,1

A evapotranspiração potencial (ET_o), calculada a partir de dados climáticos obtidos em estações meteorológicas próximas aos locais de estudo, foi calculada pelo método de Penman-Monteith (Allen et al. 1998), e a evapotranspiração da cultura (ET_c) foi calculada a partir do produto entre a ET_o e o coeficiente

da cultura (K_c) em cada estágio de crescimento, tendo como referência os valores de K_c usados por Dias (2016). Posteriormente foi calculado o balanço hídrico sequencial para cada local de estudo por meio de planilhas eletrônicas desenvolvidas por Rolim et al. (1998), considerando um valor de capacidade de água disponível (CAD) de 161 mm para o local A, 110 mm para o local B, 202 mm para o local C e 62 mm para o local D. A CAD foi obtida a partir de critérios estabelecidos por Pereira et al. (2007) e Prado (2014) que consideram a profundidade de raízes, textura e densidade do solo. Nas figuras 1, 2, 3 e 4 estão apresentados os balanços hídricos dos locais avaliados.

Figura 1. Precipitação e balanço hídrico no Local A durante a primeira seca e segunda seca.

Figura 2. Precipitação e balanço hídrico no Local B durante a primeira seca e segunda seca.

Figura 3. Precipitação e balanço hídrico no Local C durante a primeira soqueira e segunda soqueira

Figura 4. Precipitação e balanço hídrico no Local D durante a primeira soqueira e segunda soqueira

2.2.2. Tratamentos e delineamento experimental

Utilizou-se uma estrutura de grupo de experimentos composta por um experimento com plantio de crotalaria e outro sem o plantio da leguminosa na reforma do canavial. Após a colheita da cana-planta, o delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com quatro repetições, onde as parcelas receberam os níveis de manutenção da palha (0, 50 e 100%) que foram avaliadas na primeira e segunda soqueira da cana-de-açúcar. Este delineamento foi adotado considerando que a rotação de culturas e a cobertura do solo com palha promovem benefícios persistentes no sistema; por isso os efeitos destas práticas foram avaliados de forma conjunta na primeira e segunda soqueira, levando em consideração que a resposta da cultura a determinado fator pode influenciar o desenvolvimento do canavial no ciclo seguinte. Cada parcela

experimental foi constituída de cinco sulcos com 9 m de comprimento espaçados em 1,5 m. Como o início do experimento ocorreu na época de renovação do canavial, a Tabela 3 apresenta todas informações a respeito do plantio da crotalária e manejos adotados nas áreas experimentais.

Tabela 3. Informação da instalação e condução dos experimentos

Informação	Local			
	A	B	C	D
Plantio da crotalária	20/12/12	06/12/12	22/01/13	06/02/13
Espécie cultivada	<i>C. spectabilis</i>	<i>C. spectabilis</i>	<i>C. juncea</i>	<i>C. spectabilis</i>
Dessecação da crotalária	06/03/13	18/03/13	4/4/13 ¹	16/04/13
Biomassa de crotalária (Mg ha ⁻¹)	8.1	8.3	8.5	6.5
Calcário (Mg ha ⁻¹)	-	1.6	2.0	2.0
Gesso (Mg ha ⁻¹)	-	1.5	-	1.0
Cultivar de cana-de-açúcar	RB96 6928	RB96 6928	RB96 6928	RB96 6928
Plantio da cana com SPD	22/03/13	09/04/13	26/04/13 ²	30/04/13
Adubação cana planta (kg ha ⁻¹)	500/8-25-25	500/8-28-20	300/12-23-23	500/5-25-25
Colheita cana-planta	Jun./14	Jul./14	Jun./14	Jun./14
Palha cana-planta (Mg ha ⁻¹)	16.6	15.6	15.8	8.6
Adubação primeira soca (kg ha ⁻¹)	575/21-0-21	575/21-0-21	575/21-0-21	575/21-0-21
Colheita primeira soqueira	Jun./15	Jul./15	Jun./15	Jun./15
Palha primeira soqueira (Mg ha ⁻¹)	16.3	14.8	13.1	9.7
Adubação cana-soca (kg ha ⁻¹)	575/21-0-21 ³	575/21-0-21 ³	575/21-0-21	575/21-0-21 ³
Colheita segunda soqueira	Jun./16	Jul./16	Jun./16	Jun./16

¹= No local C foi feita roçagem ao invés de dessecação com glifosato; ²= No local C foi feito cultivo mínimo com escarificação. ³=Adicionalmente, aplicou-se 1 kg ha⁻¹ de B

Para instalação do componente do experimento referente a rotação com crotalária, antes da implantação da cana-de-açúcar com sistema de plantio direto, a área experimental foi dividida em duas faixas, sendo que em uma foi efetuado o plantio da crotalária com uma densidade de 25 kg ha⁻¹ de sementes, e a outra deixada em pousio até o plantio da cana-de-açúcar. A quantidade de nutrientes acumulados na biomassa da parte aérea da crotalária foi quantificada por meio do corte rente ao solo e pesagem da biomassa no campo; posteriormente, uma sub-amostra foi pesada antes e após secagem em estufa a 60°C durante 72 h para determinação da umidade. O material foi então encaminhado para análise do teor de nutrientes conforme Malavolta et al. (1997). A quantidade de nutrientes acumulados na parte aérea da crotalária, no momento da dessecação ou roçagem, são apresentados na Tabela 4. Logo após a colheita da cana-planta, foi instalada a parte do experimento referente aos níveis de manutenção de palha. Inicialmente foi estimada a quantidade de palha remanescente no solo por meio de amostragem da massa do resíduo vegetal presente em pontos aleatórios de 1 m² dentro de cada parcela, dados que foram extrapolados para obter a quantidade de palha em Mg ha⁻¹. Para o tratamento de 100% de manutenção de palha (Tabela 3), foi deixado todo o conteúdo de palha remanescente da colheita da cultura. Com relação ao tratamento de 50% de manutenção da palha, cada parcela foi dividida em duas partes simétricas, posteriormente foi removida toda a palha de uma das partes e, logo em seguida, o resíduo mantido foi espalhado uniformemente em toda a área da parcela com ajuda de um rastelo. Já no 0% de manutenção de palha, foi retirada a totalidade da palha com

o rastelo deixando o solo totalmente descoberto. O mesmo procedimento foi repetido após a colheita da primeira soqueira, dando sequência aos tratamentos nas mesmas parcelas ao longo do experimento.

Tabela 4. Acúmulo de nutrientes na biomassa da parte aérea da crotalária

N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
kg ha ⁻¹					g ha ⁻¹					
Local A										
194,4	19,4	126,4	73,7	17,8	13,8	113,4	153,9	9250,2	348,3	210,6
Local B										
124,5	18,3	196,7	29,9	14,9	12,5	107,9	99,6	680,6	91,3	240,7
Local C										
170,0	30,6	124,1	57,0	21,3	14,5	153,0	85,0	5414,5	1071,0	195,5
Local D										
156,0	28,0	110,5	57,9	20,8	24,1	123,5	65,0	2327,0	377,0	266,5

2.2.3. Avaliações

Entre 150-180 dias após o corte da cana-planta e da primeira soqueira, na época de máximo crescimento vegetativo (janeiro), foi feita a contagem de perfilhos em 5 m sequenciais em duas das três linhas centrais de cada parcela, obtendo depois o número de perfilhos por metro. Na mesma época, foi feita a leitura não destrutiva do índice relativo de clorofila (índice SPAD) na folha diagnóstico +1 (TVD – Top Visible Dewlap Leaf) por meio do clorofilômetro portátil SPAD (Soil Plant Analysis Development), modelo SPAD-502 (Minolta Corporation, Ramsey, Japan). O índice SPAD de cada parcela foi obtido a partir da média das leituras do terço médio de 15 lamina de folhas diagnóstico que não estivessem atacadas por pragas ou doenças.

Após a leitura do índice SPAD, foi cortado o extremo de cada lamina foliar conservando só o terço médio e descartando também a nervura central. A amostra de cada parcela foi disposta em sacos de papel e levada a estufa a 60°C com circulação forçada de ar até atingir massa constante. Posteriormente, todas as amostras foram moídas em moinho tipo Willey e assim pode-se efetuar a digestão sulfúrica do tecido vegetal para a posterior determinação do teor total de N, por meio de destilação e titulometria segundo a metodologia proposta por Malavolta et al. (1997).

A produtividade da primeira e segunda soqueira foi estimada durante a colheita das três linhas centrais de cada parcela por meio de uma colhedora que permitiu a distribuição dos colmos num transbordo equipado com célula e carga e assim estimar a produtividade de colmos (Mg ha⁻¹). Nos casos em que não se dispôs de colhedora mecânica, o corte e despalhamento da cana-de-açúcar foram feitos manualmente, registrando-se a massa de colmos em uma célula de carga acoplada em trator garra.

2.2.4. Análise estatística

Comprovou-se homogeneidade de variância entre o experimento com plantio de crotalária e o experimento sem plantio da leguminosa, para assim realizar a análise de grupo de experimentos. Os resultados foram submetidos à análise de variância, e quando o valor de F foi significativo a 10% de significância, foi realizado o teste de comparação de medias de Tukey ($P < 0,05$) utilizando o software estatístico R (R Core Team, 2015).

2.3. Resultados

2.3.1. Perfilhamento

No local A, a manutenção de 100% de palha apresentou maior perfilhamento na média dos dois anos (Tabela 6). Entretanto, na média dos anos, a manutenção de 100% de palha não diferiu da manutenção de 50% de palha em termos de perfilhamento. Nos locais B e D os níveis de palha não interferiram no perfilhamento da cana-de-açúcar. Por outro lado, no local C o comportamento foi inverso ao observado no local A. O tratamento com remoção total de palha apresentou maior perfilhamento do que os tratamentos com 50 e 100% de palha em 2015, e em relação ao tratamento com 50% de palha em 2016 (Tabela 6). Estes resultados indicam que no local C a remoção da palha favoreceu a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar.

O efeito da rotação de culturas no perfilhamento só ocorreu em 2015 e foi variável entre os locais. Enquanto no local A e C a rotação de culturas diminuiu o perfilhamento (Tabela 6), no local D a rotação de culturas aumentou o perfilhamento. Em todos os casos, os efeitos da rotação no perfilhamento desapareceram no ano subsequente (2016), fazendo com que na média dos dois anos o efeito não tenha sido significativo. Ou seja, o efeito da rotação de culturas no perfilhamento é maior nos primeiros ciclos da cultura, enquanto o efeito da manutenção da palha pode ocorrer todos os anos.

Tabela 5. Perfilhamento (Perfilhos m⁻¹) da primeira e segunda soqueira em função da rotação de culturas e níveis de manutenção palha.

Níveis de palha (%)	Rotação com crotalária								
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
Local A									
	2015			2016			Média		
0	11,6	12,9	12,3	13,8	13,3	13,5	12,7	13,1	12,9 B
50	11,9	13,1	12,5	14,0	13,5	13,8	12,9	13,3	13,1 AB
100	12,4	13,7	13,0	14,8	14,3	14,5	13,6	14,0	13,8 A
Média	12,0 b	13,2 a		14,2	13,7		13,1	13,4	
			P _{rotação}	0,143		P _{rotação*ano}	0,001		
			P _{palha}	0,028		P _{palha*ano}	0,898		
			P _{rotação*palha}	0,992		P _{ano}	<0,001		
Local B									
	2015			2016			Média		
0	14,1	13,4	13,7	17,0	15,3	16,1	15,5	14,3	14,9
50	14,6	13,9	14,2	16,8	17,3	17,0	15,7	15,6	15,6
100	14,8	14,0	14,4	15,8	16,3	16,0	15,3	15,1	15,2
Média	14,5	13,8		16,5	16,3		15,5	15,0	
			P _{rotação}	0,300		P _{rotação*ano}	0,581		
			P _{palha}	0,485		P _{palha*ano}	0,491		
			P _{rotação*palha}	0,531		P _{ano}	<0,001		
Local C									
	2015			2016			Média		
0	11,3	15,8	13,6 A	13,3	13,0	13,1 A	12,3	14,4	13,4
50	8,6	14,8	11,7 B	12,0	10,0	11,0 B	10,3	12,4	11,4
100	8,6	12,9	10,7 B	13,0	12,8	12,9 A	10,8	12,8	11,8
Média	9,5 b	14,5 a		12,8 a	11,9 a		11,1	13,2	
			P _{rotação}	0,001		P _{rotação*ano}	<0,001		
			P _{palha}	0,014		P _{palha*ano}	0,010		
			P _{rotação*palha}	0,996		P _{ano}	0,380		
Local D									
	2015			2016			Média		
0	11,8	11,4	11,6	12,0	12,5	12,3	11,9	12,0	11,9
50	12,1	11,5	11,8	14,0	13,3	13,6	13,1	12,4	12,7
100	12,3	11,3	11,8	13,8	12,8	13,3	13,0	12,0	12,5
Média	12,1 a	11,4 b		13,3	12,8		12,7	12,1	
			P _{rotação}	0,163		P _{rotação*ano}	0,068		
			P _{palha}	0,229		P _{palha*ano}	0,304		
			P _{rotação*palha}	0,479		P _{ano}	<0,001		

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$), ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

2.3.2. Índice SPAD

Não foram observados efeitos dos tratamentos sobre o índice SPAD no local A. No local B, somente ocorreu efeito da rotação de culturas no índice SPAD, mas este foi variável entre os anos. Enquanto em 2015 o índice SPAD foi maior no tratamento sem rotação, no ano seguinte o efeito se inverteu com maiores valores no tratamento com rotação (Tabela 6). Nos locais C e D ocorreu efeito tanto nos níveis de palha quanto da rotação no índice SPAD. No local C, o índice SPAD foi maior no tratamento sem rotação em 2016; em relação aos níveis de palha, a manutenção de 50 e 100% de palha proporcionou maiores índices SPAD na média dos anos. No local D houve interação entre rotação de culturas e níveis de palha no índice SPAD. Na média dos dois anos, a manutenção de 100% de palha reduziu o índice SPAD na área com rotação; por outro lado, no tratamento com remoção total de palha, o índice SPAD foi maior na área com rotação do que na área sem rotação (Tabela 6). Estes resultados indicam que o efeito da rotação de culturas e remoção de palha no índice SPAD é bastante variável em cada local, assim como é influenciado por condições climáticas do ano em questão.

2.3.3. Teor foliar de N

No local A, houve efeito dos tratamentos no teor foliar de N na média dos dois anos do estudo. O nível de 100% de palha apresentou menor teor de N na folha do que os tratamentos com 0 e 50% de palha; por sua vez, a área com rotação apresentou maior teor de N ($17,8 \text{ g kg}^{-1}$) quando comparado à área sem rotação ($17,4 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 7). No local B, houve interação entre rotação de culturas e níveis de palha para o teor foliar de N na média dos dois anos. No local C, houve efeito da rotação e dos níveis de palha no teor foliar de N. A área sem rotação apresentou maior teor de N do que a área com rotação na média dos dois anos. Os maiores níveis de manutenção de palha também apresentaram maior teor de N tanto em 2016 quanto na média dos dois anos (Tabela 7), indicando um claro efeito de concentração, uma vez que as plantas dos tratamentos com manutenção de palha estavam visivelmente menores. No local D, não houve efeito dos tratamentos sobre o teor foliar de N, porém claramente esta foi a área com o menor de teor foliar médio de N.

Tabela 6. Índice SPAD da primeira e segunda soqueira em função da rotação de culturas e níveis de manutenção palha.

Níveis de palha (%)	Rotação com crotalária								
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
Local A									
	2015			2016			Média		
0	41,3	40,9	41,1	39,4	39,9	39,7	40,4	40,4	40,4
50	42,0	40,0	41,0	39,3	39,2	39,2	40,6	39,6	40,1
100	41,7	41,0	41,4	38,6	39,1	38,8	40,1	40,1	40,1
Média	41,7	40,6		39,1	39,4		40,4	40,0	
			P _{rotação}	0,32		P _{rotação*ano}	0,113		
			P _{palha}	0,77		P _{palha*ano}	0,552		
			P _{rotação*palha}	0,41		P _{ano}	<0,001		
Local B									
	2015			2016			Média		
0	40,9	41,3	41,1	41,5	39,9	40,7	41,2	40,6	40,9
50	40,7	42,0	41,3	41,6	41,0	41,3	41,1	41,5	41,3
100	41,6	42,7	42,2	41,4	39,7	40,5	41,5	41,2	41,4
Média	41,1 b	42,0 a		41,5 a	40,2 b		41,3	41,1	
			P _{rotação}	0,67		P _{rotação*ano}	0,003		
			P _{palha}	0,6		P _{palha*ano}	0,141		
			P _{rotação*palha}	0,57		P _{ano}	0,050		
Local C									
	2015			2016			Média		
0	41,5	39,6	40,6	39,0	41,1	40,0	40,3	40,3	40,3 B
50	42,3	41,7	42,0	40,7	41,9	41,3	41,5	41,8	41,6 A
100	43,1	42,4	42,7	41,5	42,4	42,0	42,3	42,4	42,3 A
Média	42,3 a	41,2 a		40,4 b	41,8 a		41,3	41,5	
			P _{rotação}	0,69		P _{rotação*ano}	0,017		
			P _{palha}	0,01		P _{palha*ano}	0,977		
			P _{rotação*palha}	0,97		P _{ano}	0,180		
Local D									
	2015			2016			Média		
0	38,3	34,8	36,5	38,9	35,9	37,4	38,6 Aa	35,3 b	37,0
50	38,2	35,5	36,8	35,9	36,7	36,3	37,0 AB	36,1	36,5
100	35,1	37,0	36,0	37,1	35,9	36,5	36,1 B	36,4	36,3
Média	37,2	35,7		37,3	36,1		37,2	35,9	
			P _{rotação}	0,022		P _{rotação*ano}	0,793		
			P _{palha}	0,502		P _{palha*ano}	0,551		
			P _{rotação*palha}	0,032		P _{ano}	0,649		

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P<0,05$), ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

Tabela 7. Teor foliar de N (g kg^{-1}) da primeira e segunda soqueira em função da rotação de culturas e níveis de palha

Níveis de palha (%)	Rotação com crotalária								
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
Local A									
	2015			2016			Média		
0,0	17,6	17,0	17,3	19,1	18,1	18,6	18,3	17,6	18,0 A
50,0	17,1	17,2	17,1	18,9	18,0	18,4	18,0	17,6	17,8 A
100,0	16,5	16,7	16,6	17,6	17,3	17,4	17,0	17,0	17,0 B
Média	17,1	17,0		18,5	17,8		17,8 a	17,4 b	
			P _{rotação}	0,04		P _{rotação*ano}	0,192		
			P _{palha}	0,002		P _{palha*ano}	0,604		
			P _{rotação*palha}	0,27		P _{ano}	<0,001		
Local B									
	2015			2016			Média		
0,0	18,7	18,0	18,3	19,5	19,6	19,5	19,1	18,8 B	18,9
50,0	19,1	19,4	19,2	19,9	20,5	20,2	19,5	19,9 A	19,7
100,0	18,9	19,5	19,2	19,2	20,0	19,6	19,1 b	19,7 Aa	19,4
Média	18,9	19,0		19,5	20,0		19,2	19,5	
			P _{rotação}	0,1		P _{rotação*ano}	0,256		
			P _{palha}	0,005		P _{palha*ano}	0,171		
			P _{rotação*palha}	0,05		P _{ano}	<0,001		
Local C									
	2015			2016			Média		
0,0	16,9	17,8	17,4	16,6	16,7	16,7	16,7	17,3	17,0 B
50,0	17,3	17,8	17,5	17,4	17,5	17,4	17,3	17,6	17,5 AB
100,0	16,6	18,8	17,7	17,5	17,6	17,5	17,0	18,2	17,6 A
Média	16,9	18,1		17,2	17,3		17,0 b	17,7 a	
			P _{rotação}	0,007		P _{rotação*ano}	0,146		
			P _{palha}	0,073		P _{palha*ano}	0,758		
			P _{rotação*palha}	0,259		P _{ano}	0,393		
Local D									
	2015			2016			Média		
0	13,7	14,2	14,0	14,4	14,6	14,5	14,1	14,4	14,2
50	14,0	13,3	13,6	13,9	14,6	14,3	14,0	13,9	14,0
100	13,8	13,3	13,6	14,4	14,3	14,3	14,1	13,8	14,0
Média	13,9	13,6		14,2	14,5		14,0	14,1	
			P _{rotação}	0,92		P _{rotação*ano}	0,203		
			P _{palha}	0,29		P _{palha*ano}	0,887		
			P _{rotação*palha}	0,34		P _{ano}	0,007		

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$), ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

2.3.4. Produtividade

Em todos os locais houve efeito significativo dos níveis de palha sobre a produtividade da cultura ao longo de dois anos de experimento, porém não houve interação entre a rotação com crotalária e o manejo

da palha (Tabela 8). O local A foi o único que apresentou efeito da rotação com crotalária, sendo que a área com rotação produziu em média 8 Mg ha⁻¹ a mais em comparação com a área sem rotação.

No local A, a remoção total da palha diminuiu significativamente a produtividade, em comparação com os tratamentos de manutenção de 50 e 100% de palha, os quais tiveram média de 139,8 e 143,3 Mg ha⁻¹, respectivamente, além de não mostrar diferença significativa entre si, o que permitiria viabilizar a retirada parcial da palha neste local, sem afetar a produtividade do canavial. No local B, o tratamento que permitiu maior produtividade do canavial nas duas safras foi o de manutenção total de palha (média de 151,5 Mg ha⁻¹), em contraste com os tratamentos de 0 e 50% de palha que apresentaram produtividade média de 142,2 e 141,1 Mg ha⁻¹, respectivamente, sugerindo a necessidade de manter a totalidade da palha no campo. Para o local D, observou-se que o tratamento com 50% de palha produziu 6 Mg ha⁻¹ a mais quando comparado ao tratamento com remoção total da palha. O tratamento de 100% de palha não diferiu dos demais tratamentos.

Contrário à tendência mostrada nas demais áreas, o local C teve como melhor tratamento a remoção total de palha, alcançando produtividade média de colmos de 116,5 Mg ha⁻¹, aproximadamente 14 Mg ha⁻¹ mais do que os tratamentos com manutenção de 50 e 100% de palha (Tabela 8).

Tabela 8. Produtividade (Mg ha⁻¹) de colmos da primeira e segunda soqueira em função da rotação de culturas e níveis de manutenção de palha

Níveis de palha (%)	Rotação com crotalária								
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
Local A									
	2015			2016			Média		
0	137,1	132,4	134,7	125,6	115,9	120,7	131,3	124,2	127,7 B
50	158,4	142,3	150,3	131,8	126,9	129,3	145,1	134,6	139,8 A
100	167,9	150,7	159,3	125,0	129,6	127,3	146,5	140,1	143,3 A
Média	154,4	141,8		127,5	124,1		140,9 a	133,0 b	
			P _{rotação}	0,010		P _{rotação*ano}	0,199		
			P _{palha}	0,001		P _{palha*ano}	0,135		
			P _{rotação*palha}	0,797		P _{ano}	<0,001		
Local B									
	2015			2016			Média		
0	148,5	152,7	150,6	136,8	130,8	133,8	142,6	141,7	142,2 B
50	145,5	147,0	146,2	141,5	130,5	136,0	143,5	138,7	141,1 B
100	157,1	152,7	154,9	151,8	144,5	148,1	154,4	148,6	151,5 A
Média	150,4	150,8		143,3	135,3		146,8	143,0	
			P _{rotação}	0,191		P _{rotação*ano}	0,190		
			P _{palha}	0,018		P _{palha*ano}	0,421		
			P _{rotação*palha}	0,752		P _{ano}	0,002		
Local C									
	2015			2016			Média		
0	121,7	116,9	119,3	111,7	115,8	113,8	116,7	116,4	116,5 A
50	116,0	107,9	112,0	101,3	88,8	95,0	108,6	98,3	103,5 B
100	107,4	102,2	104,8	100,0	98,7	99,4	103,7	100,5	102,1 B
Média	115,0	109,0		104,3	101,1		109,7	105,1	
			P _{rotação}	0,173		P _{rotação*ano}	0,643		
			P _{palha}	0,005		P _{palha*ano}	0,220		
			P _{rotação*palha}	0,448		P _{ano}	0,006		
Local D									
	2015			2016			Média		
0	91,3	88,4	89,8	68,5	68,2	68,4	79,9	78,3	79,1 B
50	93,6	100,3	97,0	77,8	68,8	73,3	85,7	84,6	85,1 A
100	91,2	90,2	90,7	76,9	69,1	73,0	84,0	79,7	81,8 AB
Média	92,0	93,0		74,4	68,7		83,2	80,8	
			P _{rotação}	0,100		P _{rotação*ano}	0,243		
			P _{palha}	0,010		P _{palha*ano}	0,673		
			P _{rotação*palha}	0,572		P _{ano}	<0,001		

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$), ns = ausência de efeito de ambos os fatores.

2.4. Discussão

2.4.1. Perfilhamento

A avaliação de perfilhos foi realizada visando com que a época de amostragem coincidissem com a época de maior crescimento vegetativo e o perfilhamento tivesse atingido equilíbrio em relação ao número de colmos, porém estes processos podem ocorrer em diferentes épocas durante o ciclo de corte em função de fatores climáticos (Robertson et al. 1999; Matsuoka e Stolf 2012) e das reservas presentes no colmo semente para o caso da cana planta, e em rizomas para as soqueiras (Carneiro et al. 1995). No local A, o maior perfilhamento do tratamento sem rotação no ano 2015 pode ser resultado de falta de sincronia entre o pico de perfilhamento entre os tratamentos com e sem rotação no momento da avaliação de perfilhamento. Em outras palavras, no tratamento com rotação a liberação de nutrientes pela decomposição dos resíduos da crotalaria pode ter favorecido perfilhamento mais rápido, fazendo com que o pico de produção de perfilhos fosse atingido mais rapidamente, antecipando também o período de redução e estabilização da população de plantas que normalmente ocorre em cana-de-açúcar (Zhou 2005; Matsuoka e Stolf 2012; Manhães et al. 2015). Dessa forma, o perfilhamento possivelmente já tinha estabilizado no momento da avaliação no tratamento com rotação, enquanto ainda estava na fase de máximo perfilhamento no tratamento sem rotação. Isso fica mais evidente se considerado que no ano 2016 houve ausência de efeito da rotação no perfilhamento e de que, na média dos dois anos, a rotação de culturas aumentou a produtividade da cana-de-açúcar. Ao analisar a relação existente entre diversos parâmetros associados ao perfilhamento e a produtividade da cana-de-açúcar, Zhou (2005) observou que a capacidade de atingir rapidamente o pico de perfilhamento estava relacionada positivamente com a obtenção de elevadas produtividades, fato que pode explicar a relação inversa entre número de perfilhos e produtividade em 2015 no local A.

No local C a rotação de culturas também diminuiu o perfilhamento em 2015, enquanto no local D a rotação de culturas favoreceu o perfilhamento neste mesmo ano. Porém, em ambos locais não houve efeito da rotação de culturas na produtividade, indicando que nem sempre o perfilhamento está diretamente relacionado à produtividade. Estas diferenças podem estar relacionadas ao momento em que a avaliação do perfilhamento foi realizada, uma vez que pode ter sido realizada no pico do perfilhamento em determinado tratamento ou no momento de estabilização do perfilhamento em outro tratamento. Variações no efeito da rotação de culturas no perfilhamento da cana-de-açúcar já foram relatadas na literatura. Gama (2007) observou efeito favorável da rotação no perfilhamento aos 90 e 180 dias após o plantio, enquanto Pereira (2015) não obteve diferença no perfilhamento aos 180 dias após o plantio. Este estudo identificou efeito da rotação no primeiro ciclo de soqueira, ou seja, a rotação de culturas interferiu no perfilhamento da cana-de-açúcar mesmo após a colheita da cana-planta, demonstrando ser uma prática que apresenta efeito residual. Entretanto, o efeito residual parece ser limitado ao primeiro ciclo de soqueira, uma vez que não foram observados efeitos da rotação de culturas no perfilhamento no ciclo de segunda soqueira (Tabela 5).

O efeito da manutenção de palha no perfilhamento da cana-de-açúcar foi mais significativo do que o efeito da rotação de culturas. A manutenção de 100% de palha aumentou o perfilhamento no local A na média dos dois anos (Tabela 5). Considerando as elevadas temperaturas observadas no local A, este resultado pode estar relacionado à manutenção da umidade do solo proporcionada pela palha, assim como redução da amplitude térmica, conforme observado por Tavares (2010). Esses resultados corroboram com os de Aquino e Medina (2014) que também observaram efeito favorável da manutenção de palha no perfilhamento da cana-de-açúcar. Interessante observar que o aumento no perfilhamento proporcionado pela manutenção de palha pode estar relacionado com o aumento de produtividade também observado nestes tratamentos no local A (Tabela 8).

No local C o efeito da manutenção da palha foi o inverso do observado no local A. No local A, a manutenção da palha favoreceu o perfilhamento e a produtividade da cultura. No local C, por sua vez, a manutenção de palha diminuiu o perfilhamento (Tabela 5) e também a produtividade da cana-de-açúcar (Tabela 8). O local A se localiza no Centro-Oeste e apresenta temperaturas mais altas no inverno quando comparados ao local C. Diversos fatores podem explicar o menor perfilhamento nos tratamentos com manutenção da palha no local C: as baixas temperaturas observadas no inverno (Figura 3); diminuição da luminosidade sob a palha (Manhães et al. 2015); barreira física à brotação causada pela espessa camada de palha e decomposição mais lenta da palha em comparação com os outros locais. Este resultado corrobora o reportado por Timm (2002) que obteve diminuição de cerca de 13% no perfilhamento em áreas com manutenção total de palha. Estes resultados indicam que o efeito da manutenção da palha pode ser benéfico ao perfilhamento em determinados locais, principalmente aqueles sujeitos à déficit hídrico mais intenso, e negativo em locais que apresentam temperaturas mais amenas principalmente no período do inverno.

2.4.2. Índice SPAD e teor foliar de N

O índice SPAD foi avaliado para identificar possíveis efeitos dos tratamentos no status de N na planta promovido pela rotação de culturas ou pela manutenção de palha. O equipamento utilizado é o clorofilômetro, que avalia conteúdo de clorofila na folha, o que se relaciona com o estado nutricional da planta e seu nível de stress fisiológico (Megda, 2013). No local A não houve efeito dos tratamentos no índice SPAD (Tabela 6); por outro lado, a rotação de culturas aumentou o teor foliar de N, enquanto a manutenção de 100% de palha reduziu o teor de N (Tabela 7). O aumento no teor de N promovido pela rotação de culturas é um indicativo da maior disponibilidade de N adicionado ao sistema por meio da fixação biológica de N (Resende et al. 2003; Tenelli 2016). Por outro lado, a diminuição no teor foliar de N no tratamento com 100% de palha pode estar relacionada tanto à diminuição da disponibilidade de N pela imobilização microbiana no processo de decomposição da palha (Vieira-Megda et al. 2015), assim como possível efeito de diluição, uma vez que o tratamento com 100% de palha apresentou maior produção de biomassa neste local (Tabela 8). A hipótese de efeito de diluição parece ser a mais plausível para explicar o fenômeno observado, ou seja, a taxa de produção de matéria seca foi maior do que a taxa de acúmulo de N na folha,

fenômeno também reportado em outros trabalhos com cana-de-açúcar no Brasil (Coutinho et al. 2010; Oliveira 2011; Kölln 2012).

No local B o índice SPAD foi variável entre os anos; enquanto em 2015 foi observado maior índice SPAD no tratamento sem rotação, em 2016 o efeito se inverteu sendo observado maior índice SPAD no tratamento com rotação (Tabela 6). Para o teor foliar de N, somente foi observado efeito quando considerada a média dos dois anos, em que no tratamento com 100% de palha, o teor de N foi maior na área sem rotação quando comparado à área com rotação (Tabela 7). Apesar destes efeitos contraditórios, a produtividade de colmos foi semelhante nos tratamentos com e sem rotação, indicando que não houve déficit de N que pudesse limitar o desenvolvimento da planta. Neste local, a manutenção de 50 ou 100% da palha também não afetou o teor foliar de N, indicando que não há indícios de que houve imobilização de N para decomposição da palha, como previamente descrito na literatura (Vieira-Megda et al., 2015). Além disso, a produtividade de colmos foi favorecida pela manutenção de 100% de palha neste local (Tabela 8), confirmado a ausência de deficiência de N pela manutenção da palha.

No local C houve aumento do índice SPAD e do teor foliar de N nos maiores níveis de manutenção da palha (Tabelas 6 e 7). Ao contrário de um efeito positivo na palha na nutrição nitrogenada, estes resultados foram causados pelo efeito de concentração do N na planta, uma vez que ocorreu diminuição do perfilhamento e produtividade de colmos com a manutenção de 50 e 100% de palha (Tabelas 5 e 8). A relação inversa entre o teor foliar de N e a produtividade dos tratamentos com manutenção de palha no local C comprovam a ocorrência de concentração de N no tecido vegetal, comportamento oposto do observado no local A.

No local D, o índice SPAD médio dos dois anos de experimento mostrou um possível efeito compensatório da crotalária sobre a retirada total da palha, sendo que o maior índice SPAD dentro do tratamento com remoção total de palha foi obtido na área com rotação, devido ao aporte de N e outros nutrientes oriundos dos resíduos da leguminosa (Resende et al. 2003; Tenelli 2016). Por outro lado, na área com rotação, o índice SPAD diminuiu com o aumento dos níveis de manutenção da palha. Esse comportamento pode estar relacionado à maior biomassa da parte aérea nos tratamentos com 50 e 100% de palha (Tabela 8), fazendo com que a intensidade de verde da planta fosse menor do que nas plantas do tratamento com remoção total da palha. Neste local não houve efeito dos tratamentos no teor foliar de N, indicando que não houve deficiência de N que poderia ter sido causada pela imobilização de N pela palha. A ausência de deficiência de N promovida pela manutenção da palha mesmo em solo com baixos teores de MOS (Tabela 2) é um resultado interessante, uma vez que problemas de imobilização de N pela palha da cana-de-açúcar tem sido reportados (Vieira-Megda et al., 2016) o que tem levado técnicos a recomendarem aumento da dose de N para adubação de cana colhida sem queima no Brasil, conforme reportado em Otto et al. (2016).

2.4.3. Produtividade

Nos locais A e B, o déficit hídrico na fase inicial das duas soqueiras (Figuras 1 e 2), fez com que a manutenção da umidade do solo promovida pela manutenção da palha na superfície tenha sido de grande importância para permitir maiores produtividades em relação à remoção total da palha. Segundo Cheong e Teeluck (2016), a cobertura com a palha reduz a evaporação que se dá diretamente desde a superfície do solo fazendo com que se tenha uso mais eficiente da água e maior conservação da umidade do solo na camada 0-20 cm, região de maior concentração de raízes da cana-de-açúcar (Smith et al. 2005; Battie e Laclau 2009; Aquino et al. 2016). Os resultados no local A, onde a manutenção de 50% de palha foi suficiente para aumentar a produtividade em relação à remoção total da palha, estão de acordo com o reportado por Aquino et al. (2016), que obtiveram ganhos de 25% de produtividade nos tratamentos com 50 e 75% de palha em relação aos tratamentos com 0 e 25% de palha sob condições de deficiência hídrica nos estádios iniciais de desenvolvimento da cana planta. Os autores observaram ainda relação da manutenção da palha com a distribuição do sistema radicular na camada 0-20 cm, onde a maior massa seca de raízes foi encontrada nos tratamentos com maiores quantidades de palha. Avaliando os efeitos de diferentes quantidades de palha na segunda soqueira de cana-de-açúcar, Aquino et al. (2015) não observaram diferenças significativas entre os tratamentos, resultado justificado pela ausência de condições hídricas restritivas. Estes resultados indicam que o efeito da manutenção da palha na produtividade do canavial é dependente do balanço hídrico do ano em questão.

No local B, a manutenção de 50% de palha não foi suficiente para sustentar as maiores produtividades, que foram obtidas somente com a manutenção de 100% de palha. O caráter distrófico do solo possivelmente afetou o crescimento em profundidade do sistema radicular, resultando em concentração das raízes nas camadas superficiais; neste local, a manutenção de 50% de palha não foi suficiente para conservar a umidade necessária para obtenção de maiores produtividades. Apesar do sistema radicular não ter sido avaliado neste estudo, os resultados obtidos no local B dão um indicativo de que solos que permitem maior enraizamento em profundidade podem viabilizar níveis maiores de remoção da palha. A manutenção de umidade promovida pela manutenção da palha parecer ter um impacto muito grande na produtividade da cana-de-açúcar, especialmente em regiões de expansão do cultivo da cana-de-açúcar como as dos locais A e B. Diversos trabalhos reportam o efeito negativo do déficit hídrico na produtividade da cana-de-açúcar (Robertson et al. 1999; Inman-Bamber e Smith 2005; Silva et al. 2013; Olivier e Singels 2015). De acordo com Dias (2016), o déficit hídrico foi o fator o que causou maior perda de produtividade dos canaviais, representando em média 72% do potencial de queda de produtividade, sendo os 28% restantes resultado de práticas de manejo inadequadas.

Contrário à tendência das outras áreas, no local C a manutenção de palha ocasionou diminuição da produtividade. Os resultados obtidos no local C corroboram observações prévias de outros estudos realizados nesta mesma região. Campos et al. (2010) observaram que a manutenção da palha de cana-de-açúcar em área total sobre o solo prejudicou o rendimento agrícola da variedade RB855453. Anteriormente, Campos et al. (2008) já tinham avaliado o efeito de três manejos de palha na produtividade da variedade

SP832847 e observaram diminuição de cerca de 10% na produtividade mantendo cobertura total de palha. Estes resultados indicam que o efeito negativo da manutenção da palha nesta região independe da variedade cultivada. O local C apresentou elevado déficit hídrico em 2015 (Figura 3), o que poderia justificar um efeito benéfico da manutenção da palha na preservação da umidade do solo. Porém, a menor temperatura média do local C em relação às outras áreas pode ter sido o fator determinante para que a manutenção da palha gerasse atraso da brotação, diminuição no perfilhamento e ocorrência de falhas na cultura, afetando assim a produtividade do canavial, conforme também reportado por (Hassuani et al. 2005).

No local D, além do considerável déficit hídrico durante a primeira soqueira (Figura 4), a infestação de plantas daninhas também pode ter contribuído para diminuição de produtividade no tratamento com remoção total de palha, conforme observações visuais no campo. Diversos estudos indicam o benefício da palha na diminuição da infestação de plantas daninhas no canavial (Ferreira et al. 2010; Carvalho et al. 2016). Por outro lado, neste local a manutenção de 50% da palha promoveu o melhor resultando em termos de produtividade. O excesso de palha que permaneceu no solo no tratamento com 100% de manutenção da palha pode ter causado atraso na brotação e estabelecimento inicial da cultura, principalmente se considerado que esta região também apresentou temperaturas baixas (Figura 4), muito próximas das observadas no local C aonde a manutenção da palha foi prejudicial à cultura.

A ausência de interação significativa entre rotação de culturas e níveis de palha indicou que sob as condições dos experimentos o plantio prévio da leguminosa não conseguiu compensar os efeitos prejudiciais da retirada da palha na produtividade da cultura. A rotação de culturas aumentou a produtividade do canavial somente no local A, o que pode estar relacionado à adição de N e ciclagem de nutrientes no momento da renovação do canavial que favoreceu o desenvolvimento da cana-de-açúcar (Garside e Bell 2001; Garside et al. 2005; Park et al. 2010; Gopalasundaram et al. 2012; Ambrosano et al. 2013).

O aumento de produtividade proporcionado pela rotação de culturas é bem reportado na literatura, sendo que na maioria das situações os ganhos são maiores no ciclo de cana-planta e diminuem com o tempo. Ambrosano et al. (2011) observaram, na média de cinco cortes de cana-de-açúcar, maior produtividade no tratamento com cultivo prévio de *Crotalaria juncea* em relação ao tratamento sem rotação. Por outro lado, Bokhtiar et al. (2003) observou aumentos de produtividade de 21 e 2% no primeiro e segundo corte, respectivamente, promovidos pela *Crotalaria juncea*. Cáceres (1995) também reportou aumento de produtividade da cana-de-açúcar com o cultivo prévio de *Crotalaria juncea* e *Crotalaria spectabilis*, que produziram a maior quantidade de biomassa, embora com redução do efeito ao longo dos cortes da cana-de-açúcar.

A falta de resposta à rotação de culturas na produtividade das duas primeiras soqueiras nas outras três áreas pode ser devido a diferentes fatores. No local B, os altos conteúdos de C e N no solo (Tabela 2), assim como as condições climáticas favoráveis para mineralização da MOS, possivelmente suprimiram de forma eficiente o N no tratamento sem rotação. Por outro lado, no local D, apesar da ausência de efeito positivo da rotação nos ciclos de soqueira, houve aumento significativo da produtividade no ciclo de cana-planta (Tenelli, 2016), com ganho de 9 Mg ha⁻¹ a favor da rotação de culturas. O efeito benéfico possivelmente foi diluindo com o tempo devido às características do solo, como textura média e baixa CTC,

que aceleram a decomposição de resíduos e dificultam a retenção de nutrientes. Já no local C, a elevada fertilidade do solo e altos níveis de C e N limitaram a resposta à rotação de culturas, fato também observado por Pereira (2015) naquele mesmo local.

A ausência de diferença estatística ao comparar a produtividade da cana-de-açúcar em áreas com e sem rotação com crotalária também tem sido reportada por outros autores. Ambrosano et al. (2010) obtiveram maior produtividade em áreas submetidas à rotação com crotalária somente durante o ciclo de cana planta, enquanto que no decorrer da primeira e segunda soqueira não foram observadas diferenças entre os tratamentos, coincidindo assim com o encontrado nos locais B, C e D. Ambrosano et al. (2005) também não observaram diferenças de produtividade na primeira soqueira em função da rotação com crotalária. Contudo, tem-se evidência de que o efeito residual da crotalária pode se potencializar do primeiro para o segundo ano de corte da cana-de-açúcar, pela natureza e características do adubo verde na liberação gradual de nutrientes, mas de ir desaparecendo no terceiro corte (Ambrosano et al. 2013).

Os resultados deste estudo indicaram que a manutenção da palha não diminui a disponibilidade de N às plantas devido a uma possível imobilização de N para decomposição da palha. Além disso, a rotação de culturas com *Crotalaria spectabilis* na renovação do canavial apresentou potencial de aumentar 8,0 Mg ha⁻¹ a produtividade média da primeira e segunda soqueiras em um dos locais avaliados. Em relação ao atual interesse das usinas na remoção de palha para produção de bioenergia, os resultados deste estudo indicam que em regiões sujeitas à déficit hídrico intenso a remoção da palha resultará em quedas significativas de produtividade, que podem variar de 6,0 a 15,6 Mg ha⁻¹ dependendo das condições de clima e solo. Por outro lado, a remoção da palha poderá ser realizada em regiões que apresentam temperaturas baixas durante o inverno que podem prejudicar a brotação da soqueira; nesse caso, a remoção de 100% da palha evitou a queda de produtividade em 14,4 Mg ha⁻¹ na média da primeira e segunda soqueiras. A rotação de culturas não apresentou potencial para diminuir a queda de produtividade causada pela remoção de palha nas regiões sujeitas a déficits hídricos mais intensos.

2.5. Conclusões

A rotação com *Crotalaria spectabilis* na renovação do canavial aumentou 8,0 Mg ha⁻¹ a produtividade média da primeira e segunda soqueiras em um dos locais avaliados;

A manutenção de palha sobre o solo não diminui a disponibilidade de N para a soqueira.

Em regiões sujeitas a déficit hídrico a remoção de palha pode reduzir de 6,0 a 15,6 Mg ha⁻¹ a produtividade de colmos dependendo das condições de clima e solo;

Em regiões com temperaturas baixas no inverno a remoção de palha evita quedas de produtividade de 14,4 Mg ha⁻¹;

A rotação de culturas não minimiza os efeitos negativos da remoção de palha na produtividade do canavial.

Referencias

- Allen, R G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO: 300. doi:10.1016/j.eja.2010.12.001.
- Alvarez, I A, and P R C Castro. 1999. Crescimento da parte aérea de cana crua e queimada. *Scientia Agricola* 56: 1069–1079. doi:10.1590/S0103-90161999000500008.
- Ambrosano, EJ, R Azcon, H Cantarella, G M B Ambrosano, E A S, T Muraoka, P C O Trivelin, et al. 2010. Crop rotation biomass and arbuscular mycorrhizal fungi effects on sugarcane yield. *Scientia Agricola* 67: 692–701. doi:10.1590/S0103-90162010000600011.
- Ambrosano, EJ, H C, G M B Ambrosano, E A S, F L F Dias, F R, P C O Trivelin, T Muraoka, R C C Sachs, and R A. 2011. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. *Bragantia* 70: 810–818. doi:10.1590/S0006-87052011000400012.
- Ambrosano, EJ, H Cantarella, G M B Ambrosano, F L F Dias, F Rossi, P C O Trivelin, and T Muraoka. 2013. The role of green manure nitrogen use by corn and sugarcane crops in Brazil. *Agricultural Sciences* 4: 89–108. doi:10.4236/as.2013.412A008.
- Ambrosano, EJ, P C O Trivelin, H Cantarella, G M B Ambrosano, E A Schammas, N G, F Rossi, P C D Mendes, and T M. 2005. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. *Scientia Agricola* 62: 534–542. doi:10.1590/S0103-90162005000600004.
- Aquino, GS, and CDC Medina. 2014. Produtividade e índices biométricos e fisiológicos de cana-de-açúcar cultivada sob diferentes quantidades de palhada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 49: 173–180. doi:10.1590/S0100-204X2014000300003.
- Aquino, GS, CDC Medina, ALJ Porteira, LS Oliveira, ACC Benitez, DAO Kussaba, JJH Dos Santos, LF Almeida, and AD Santiago. 2015. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 50: 1150–1159. doi:10.1590/S0100-204X2015001200004.
- Aquino, GS, CDC Medina, ET Romeu, A Pasini, AJO Menezes, AT Hoshino, CO Eli, and OR Brito. 2016. Root system and yield of sugarcane cultivated under different amounts of straw in southern Brazil. *African Journal of Agricultural Research* 11: 563–571. doi:10.5897/AJAR2015.10538.
- Battie P, e J.P. Laclau. 2009. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. *Field Crops Research* 114: 351–360. doi:10.1016/j.fcr.2009.09.004.
- Blake, G.R., and K.H. Hartge. 1986. Particle-size analysis. In *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*, ed. A. Klute, 383–411. Madison: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America.
- Bokhtiar, S. M., M. a. Gafur, and a. B. M. M. Rahman. 2003. Effects of *Crotalaria* and *Sesbania aculeata* green manures and N fertilizer on soil fertility and the productivity of sugarcane. *The Journal of Agricultural Science* 140: 305–309. doi:10.1017/S0021859603003022.

- Braunack, M, A Garside, and M Bell. 2003. The effect of rotational breaks from continuous sugarcane on soil physical properties. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.* 25.
- Caceres, N T, and J C A. 1995. Adubação Verde com Leguminosas em Rotação com Cana-de-Açúcar (*Saccharum spp*). *Revista STAB* 13: 16–20.
- Campos, L H F, S J P de Carvalho, P J Christoffoleti, C F, and J S da Silva. 2008. Crescimento e Produtividade da Cana-de-Açúcar (Var . SP83-2847) Submetida a Três Manejos da Palhada. *STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos* 26.
- Campos, L H F, S J P de Carvalho, P J Christoffoleti, C F, and J S da Silva. 2010. Sistemas de manejo da palhada influenciam acúmulo de biomassa e produtividade da cana-de-açúcar (var. RB855453). *Acta Scientiarum - Agronomy* 32: 345–350. doi:10.4025/actasciagron.v32i2.3703.
- Cantarella, H, J L N Carvalho, P S. G Magalhães, and C E P Cerri. 2013. How much sugarcane trash should be left on the soil? *Scientia Agricola* 62: 1–11. doi:10.1590/S0103-90162008000700002.
- Carneiro, A E V, P C O Trivelin, and R L Victoria. 1995. Utilização da Reserva Orgânica e de Nitrogênio do Tolete de Plantio (Colmo-Semente) no Desenvolvimento da Cana-planta. *Scientia Agricola* 52: 199–209.
- Carvalho, J L N, R C Nogueirol, L M S Menandro, R D E O Bordonal, D C Borges, H Cantarella, and H C J Franco. 2016. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. *GCB Bioenergy*: 1–16. doi:10.1111/gcbb.12410.
- Coutinho, H, J F, P C O Trivelin, C Eduardo, A C Vitti, and R Otto. 2010. Stalk yield and technological attributes of planted cane as related to nitrogen fertilization relacionados com a adubação nitrogenada. *Scientia Agricola* 67: 579–590. doi:10.1590/s0103-90162010000500012.
- 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. 1997. Manual de métodos de análise de solo. Edited by Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2nded. Rio de Janeiro.
- Fagundes, E, T J Silva, and E M Bonfim-Silva. 2014. Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo submetidas a níveis de compactação do solo TT - Initial development of varieties of sugarcane in Oxisol subjected to levels of soil compaction. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18: 188–193. doi:10.1590/S1415-43662014000200009.
- Ferreira, D A., H C J Franco, R Otto, A C. Vitti, C Fortes, C E. Faroni, A L. Garside, and P C O Trivelin. 2016. Contribution of N from green harvest residues for sugarcane nutrition in Brazil. *GCB Bioenergy* 8: 859–866. doi:10.1111/gcbb.12292.
- Ferreira, E.A., S.O. Procópio, L. Galon, A.C. Franca, G. Concenço, A.A. Silva, I. Aspiazu, A.F. Silva, S.P. Tironi, and P.R.R. Rocha. 2010. Manejo de plantas daninhas em cana-crua. *Planta Daninha* 28: 915–925. doi:10.1590/S0100-83582010000400025.
- Fortes, C, P C O Trivelin, and A C Vitti. 2012. Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. *Biomass and Bioenergy* 42: 189–198. doi:10.1016/j.biombioe.2012.03.011.

- Fortes, C, P C O Trivelin, A C Vitti, R Otto, H C J Franco, and C E Faroni. 2013. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 48: 88–96. doi:10.1590/S0100-204X2013000100012.
- Fortes, C, A C Vitti, R Otto, D A Ferreira, H C J Franco, and P C O Trivelin. 2013. Contribution of nitrogen from sugarcane harvest residues and urea for crop nutrition. *Scientia Agricola* 70: 313–320. doi:10.1590/S0103-90162013000500005.
- Gama, A J M. 2007. Sistema De Rotação E Adubação Fosfatada Na Cultura Da Cana-De-Açúcar no Cerrado. Universidade Federal de Ubêrlandia.
- Garside, L, and M J Bell. 2001. Fallow legume in the australian sugar industry review of recent research findings and implications for the sugarcane cropping system. *Proc Aust Soc Sugar Cane Technol*.
- Garside, L, M J Bell, B G Robotham, R C Magarey, and G R Stirling. 2005. Managing yield decline in sugarcane cropping systems. *International Sugar Journal* 107: 16–26.
- Gopalasundaram, P., A. Bhaskaran, and P. Rakkiyappan. 2012. Integrated Nutrient Management in Sugarcane. *Sugar Tech* 14: 3–20. doi:10.1007/s12355-011-0097-x.
- Hassuani, S, MRLV Leal, and IC Macedo. 2005. Biomass Power Generation, Sugarcane Bagasse and Trash. Edited by Suleiman José Hassuani, Manoel Regis Lima Verde Leal, and Isaías de Carvalho Macedo. Biomass power generation: Sugar cane bagasse and trash. Piracicaba, SP, Brasil: PNUD, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento CTC, Centro de Tecnologia Canavieira. doi:10.1016/S0378-3820(97)00058-1.
- Inman-Bamber, N. G., and D. M. Smith. 2005. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research* 92: 185–202. doi:10.1016/j.fcr.2005.01.023.
- Kölln, Oriel Tiago. 2012. Interção entre os estresses de nitrogênio e disponibilidade hídrica no fracionamento isotópico de C e na produtividade em soqueira de cana-de-açúcar. Universidade de São Paulo.
- Lal, R. 2008. Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production. *Waste Management* 28: 747–758. doi:10.1016/j.wasman.2007.09.023.
- Landell, M, M Scarpari, and M Xavier. 2013. Residual biomass potential of commercial and pre-commercial sugarcane cultivars. *Scientia ...* 70: 299–304. doi:10.1590/S0103-90162013000500003.
- Leal, M Regis, M V. Galdos, F V. Scarpore, J E A Seabra, A Walter, and C O F Oliveira. 2013. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. *Biomass and Bioenergy* 53: 11–19. doi:10.1016/j.biombioe.2013.03.007.
- Malavolta, E, G C Vitti, and S. A. Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações. 2nded. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato.
- Manhães, C M C, R F Garcia, F M A Francelino, H De O Francelino, and F C Coelho. 2015. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. *Revista Vértices* 17: 163–181. doi:10.5935/1809-2667.20150011.
- Matsuoka, S, and R Stolf. 2012. Chapter 5 - Sugarcane tillering and ratooning: Key factors for a profitable cropping. *Sugarcane: Production, Cultivation and Uses*: 137–157.

- Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In *Methods of soil analysis*, ed. D. .. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, and E. Summer, C, 961–1010. Madison: Soil Science Society of America.
- Oliveira, E C A. 2011. Balanço nutricional da cana-de-açúcar relacionado à adubação nitrogenada. Cena. Universidade de São Paulo.
- Oliveira, M W, P C O T, G Kingston, M H P Barbosa, and A C Vitti. 2002. Decomposition and Release of Nutrients From Sugarcane Trash in Two Agricultural Environments in Brazil. *Proc Aust Soc Sugar Cane Technol* 24: 1–10.
- Oliveira, M W, P C O Trivelin, C P Penatti, and M De C Piccolo. 1999. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 34: 2359–2362. doi:10.1590/S0100-204X1999001200024.
- Olivier, F C., and A Singels. 2015. Increasing water use efficiency of irrigated sugarcane production in South Africa through better agronomic practices. *Field Crops Research* 176. Elsevier B.V.: 87–98. doi:10.1016/j.fcr.2015.02.010.
- Otto, R., S. A Q Castro, E. Mariano, S. G Q Castro, H. C J Franco, and P. C O Trivelin. 2016. Nitrogen Use Efficiency for Sugarcane-Biofuel Production: What Is Next? *Bioenergy Research*: 1–18. doi:10.1007/s12155-016-9763-x.
- Park, S. E., T J. Webster, H L. Horan, A T. James, and P J. Thorburn. 2010. A legume rotation crop lessens the need for nitrogen fertiliser throughout the sugarcane cropping cycle. *Field Crops Research* 119: 331–341. doi:10.1016/j.fcr.2010.08.001.
- Pereira, A.R., L.R. Angelocci, and P.C. Sentelhas. 2007. *Meteorologia agrícola*. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” ESALQ/USP.
- Pereira, G L. 2015. Transformação do nitrogênio no solo e a resposta da cana-planta à adubação nitrogenada em função da rotação com crotalária: 77p.
- Prado, H. 2014. *Pedologia fácil: Aplicação de em solos tropicais*. 4th ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa.
- Raij, B van, J C A, H Cantarella, and J A Quaggio, ed. 2001. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. 1sted. Campinas - SP: Instituto Agronômico.
- Ram, D, M Ram, and R Singh. 2006. Optimization of water and nitrogen application to menthol mint (*Mentha arvensis* L.) through sugarcane trash mulch in a sandy loam soil of semi-arid subtropical climate. *Bioresource Technology* 97: 886–893. doi:10.1016/j.biortech.2005.04.047.
- Resende, A S., R P. Xavier, D M. Quesada, S U, B J. R. Alves, and R M. Boddey. 2003. Use of green manures in increasing inputs of biologically fixed nitrogen to sugar cane. *Biology and Fertility of Soils* 37: 215–220. doi:10.1007/s00374-003-0585-6.
- Robertson, F A., and P J. Thorburn. 2007. Decomposition of sugarcane harvest residue in different climatic zones. *Australian Journal of Soil Research* 45: 1–11. doi:10.1071/SR06079.

- Robertson, M. J., N. G. Inman-Bamber, R. C. Muchow, and A. W. Wood. 1999. Physiology and productivity of sugarcane with early and mid-season water deficit. *Field Crops Research* 64: 211–227. doi:10.1016/S0378-4290(99)00042-8.
- Rolim, G.S., Paulo C. Sentelhas, and V. Barbieri. 1998. Planilhas no ambiente EXCEL para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 6: 133–137.
- Rossetto, R, A C V, G J C Gava, and J C Garcia. 2013. Cana de Açúcar, cultivo com sustentabilidade. *Informações agronômicas*: 1–13.
- Santos, H.G. dos, P.K.T. Jacomine, L.H.C. dos Anjos, V.A. de Oliveira, J.B. de Oliveira, M.R. Coelho, J.F. Lumberras, and T.J.F. Cunha, ed. 2006. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2nded. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.
- Schultz, N, E Lima, M G P, and E Zonta. 2010. Efeito residual da adubação na cana-planta e da adubação nitrogenada e potássica na cana-soca colhidas com e sem a queima da palhada. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 34: 811–820.
- Scivittaro, W.B., Takashi Muraoka, A. E. Boaretto, and P C O Trivelin. 2000. Utilização de nitrogênio de adubos verde e mineral pelo milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*: 165–170.
- Silva, V de P R, B B. Da Silva, W G. Albuquerque, C J R Borges, I F de Sousa, and J D Neto. 2013. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. *Agricultural Water Management* 128. Elsevier B.V.: 102–109. doi:10.1016/j.agwat.2013.06.007.
- Singh, S N, A K Singh, J P S Malik, R Kumar, Sunderpal, and M L Sharma. 2012. Cultural-practice packages and trash management effects on sugarcane ratoons under sub-tropical climatic conditions of India. *Journal of Agricultural Science* 150: 237–247. doi:10.1017/S0021859611000499.
- Smith, D. M., N. G. Inman-Bamber, and P. J. Thorburn. 2005. Growth and function of the sugarcane root system. *Field Crops Research* 92: 169–183. doi:10.1016/j.fcr.2005.01.017.
- Sordi, R de A, and C Manechini. 2013. Utilization of trash: a view from the agronomic and industrial perspective Increased. *Scientia Agricola*: 13418–13418. doi:10.1590/S0103-90161996000200021.
- Souza, Z M de, A C S Paixão, R de M Prado, L G C, and S R de Souza. 2005. Manejo de palhada de cana colhida sem queima, produtividade do canavial e qualidade do caldo. *Ciência Rural* 35: 1062–1068. doi:10.1590/S0103-84782005000500012.
- Souza, Z M, R. D M Prado, A. C S Paixão, and L G Cesarin. 2005. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 40: 271–278. doi:10.1590/S0100-204X2005000300011.
- Souza, Z, A C S Paixão, R De M P, L G Cesarin, S R De Souza, and R Montanari. 2008. Produtividade agrícola de variedades de cana-de-açúcar e incidência de broca-comum e cigarrinha da raiz em canavial colhido sem queima. *Bragantia* 67: 413–419. doi:10.1590/S0006-87052008000200017.
- Tavares, O. C H. 2010. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. *Acta Scientiarum - Agronomy* 32: 61–68. doi:10.4025/actasciagron.v32i1.2051.

- Tenelli, S. 2016. Disponibilidade do nitrogênio no solo e produtividade da cana-de-açúcar em função da rotação de culturas. Universidade de São Paulo.
- Thierfelder, C, and P.C. Wall. 2010. Rotation in Conservation Agriculture Systems of Zambia: Effects on Soil Quality and Water Relations. *Experimental Agriculture* 46: 309–325. doi:10.1017/S001447971000030X.
- Timm, L. C., K. Reichardt, J. C M Oliveira, F. A M Cassaro, T. T. Tominaga, O. O S Bacchi, and D. Dourado-Neto. 2003. Sugarcane production evaluated by the state-space approach. *Journal of Hydrology* 272: 226–237. doi:10.1016/S0022-1694(02)00267-6.
- Timm, L C. 2002. Efeito Do Manejo Da Palha Da Cana-De-Açúcar Nas Propriedades Físico-Hídricas De Um Solo: 127.
- Trivelin, P C O, H C J Franco, R Otto, D a Ferreira, a C Vitti, C Fortes, C E Faroni, E C a Oliveira, and H Cantarella. 2013. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. *Sciencia Agricola* 70: 345–352. doi:10.1590/S0103-90162013000500009.
- Vale, D W. 2013. Manejo da palha , adubação nitrogenada , potássica e uso de inoculante em soca de cana-de-açúcar. Universidade de São Paulo.
- Vieira-Megda, M X, E Mariano, J M Leite, H C J Franco, A C V, M M Megda, S A Khan, R L Mulvaney, and P C O Trivelin. 2015. Contribution of fertilizer nitrogen to the total nitrogen extracted by sugarcane under Brazilian field conditions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 101: 241–257. doi:10.1007/s10705-015-9676-7.
- Vitti, A C, H C J Franco, C E Faroni, H Cantarella, and P C O Trivelin. 2007. Balanço de Massa e de Nutrientes da Palhada e da Rebrotada de Cana-de-Açúcar Dessecada com Glifosato. *STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos* 25: 30–33.
- Vitti, A C, P C O Trivelin, H Cantarella, C J Franco, C E Faroni, R Otto, and M Olivetti. 2008. Mineralização da palhada e crescimento de raízes de cana-de-açúcar relacionados com a adubação nitrogenada de plantio. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32: 2757–2762. doi:10.1590/S0100-06832008000700020.
- Wilhelm, W. W., J. M. F Johnson, J. L Hatfield, W.B. Voorhes, and D. R. Linden. 2004. Crop and soil productivity response to corn residue removal: a literature review. *Agron. J.* 96: 1–17. doi:10.2134/agronj2004.0001.
- Yadav, R. L., S. R. Prasad, Ramphal Singh, and V. K. Srivastava. 1994. Recycling sugarcane trash to conserve soil organic carbon for sustaining yields of successive ratoon crops in sugarcane. *Bioresource Technology* 49: 231–235. doi:10.1016/0960-8524(94)90045-0.
- Yamaguchi, C S. 2015. Decomposição da palha de cana-de-açúcar em função da quantidade e da aplicação de vinhaça. Instituto Agrônômico.
- Zhou, M. 2005. The relationship between tiller population development parameters and cane yield of sugarcane Zimbabwe Sugar Association Experiment Station , P . Bag 7006 , Chiredzi, Zimbabwe 25.

3. EFEITO DA ROTAÇÃO DE CULTURA E REMOÇÃO DE PALHA NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO

RESUMO

No cenário energético atual as fontes de energia renováveis a partir de biomassa vegetal, com destaque para a palha de cana-de-açúcar, tem ganhado cada vez mais importância, fazendo com que o manejo sustentável do solo seja indispensável não somente para produção de matéria prima como também para redução da emissão de gases de efeito estufa. A rotação de culturas na época de renovação do canavial e o adequado manejo de resíduos vegetais no solo são estratégias apropriadas para conservação do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. A hipótese deste trabalho é de que a remoção da palha para produção de bioenergia, a curto prazo, irá afetar a qualidade química do solo nas camadas superficiais. Objetivou-se com este estudo avaliar os atributos químicos do solo e os estoques de C e N no solo em função da remoção total e parcial da palha de cana-de-açúcar e da rotação com crotalária na reforma do canavial. A pesquisa foi desenvolvida em duas áreas experimentais localizadas em Quirinópolis/GO com solo de textura argilosa, e em Quatá/SP com solo de textura arenosa. Utilizou-se uma estrutura de grupo de experimentos composta por um experimento com plantio de crotalária e outro sem o plantio da leguminosa na reforma do canavial. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com três tratamentos de níveis de manutenção de palha (0, 50 e 100%), que foram instalados após a colheita da cana-planta e reinstalados após a primeira-soqueira. Após dois anos, foram avaliados os atributos químicos e os estoques de C e N do solo até 0,4 m. O efeito dos tratamentos de manutenção de palha e rotação com crotalária foi muito mais evidente no solo argiloso do que no solo arenoso. No solo argiloso, a rotação com crotalária potencializou os efeitos da manutenção da palha, incrementando os teores de Mg e V% e reduzindo a acidez potencial do solo. A rotação com crotalária aumentou os teores de P, K nos dois tipos de solo, e CTC no solo argiloso, mostrando-se como estratégia favorável para manutenção da fertilidade química do solo. A rotação com crotalária não afetou os estoques de C e N do solo, enquanto que a manutenção de aproximadamente 8 Mg ha⁻¹ de palha favoreceu o acúmulo de C nos dois tipos de solo.

Palavras-chave: Fertilidade; Cobertura vegetal; Adubo verde; Matéria orgânica do solo

ABSTRACT

In the current energy scenario, renewable energy sources from vegetal biomass, with emphasis on sugarcane straw, have gained increasing importance, making the sustainable management of the soil indispensable not only for the feedstock production, but also for reducing the emission of greenhouse gases. The crop rotation in the time of sugarcane renewal and the appropriate management of plant residues in the soil, are appropriate strategies for soil conservation in sugarcane areas. The hypothesis of this work is that the straw removal for bioenergy production, in the medium term, will affect the soil chemical quality in the superficial layers. This study aimed to evaluate soil chemical attributes and C and N stocks in the soil as a function of total and partial sugarcane straw removal and sunn hemp rotation in the sugarcane plantation. The research was developed in two experimental areas located in Quirinópolis / GO with soil of clay texture, and in Quatá / SP with soil of sandy texture. An experiment group structure was used, consisting of an experiment with planting crotalaria and

another without the planting of the legume in the cane field. The experimental design was a randomized block design with three treatments of straw maintenance levels (0, 50 and 100%), that were installed after the cane-plant harvesting and reinstalled after the first ratoon. After two years, were evaluated the chemical attributes and the soil C and N stocks up to 0.4 m. The effect of straw and sunn hemp rotation treatments was much more evident in clay soil than in sandy soil. In the clay soil, rotation with sunn hemp augmented the effects of the maintenance of the sugarcane straw, increasing the Mg content and %BS, and reducing the potential acidity of the soil. The sunn hemp rotation increased the P, K contents, in the two types of soil, and in the CEC in the clay soil, showing itself as a favorable strategy for the maintenance of soil chemical fertility. Sunn hemp rotation did not affect soil C and N stocks, and maintenance of approximately 8 Mg ha⁻¹ of straw favored C accumulation in both types of soil.

Keywords: Fertility; Surface mulch; Green manure; Soil organic matter

3.1. Introdução

O solo constitui o eixo principal no qual se devem articular as estratégias que procuram enfrentar três dos maiores desafios da sociedade atual: a grande dependência energética dos combustíveis fósseis, as elevadas emissões de gases de efeito estufa e a produção agrícola sustentável. Diversos estudos comprovam a viabilidade do uso da palha de cana-de-açúcar como matéria prima para produção de eletricidade e etanol de segunda geração (Dias et al. 2011; Dias et al. 2012; Franco et al. 2013; Leal et al. 2013; Ullah et al. 2015), porém, a decisão da quantidade adequada para uso industrial deve ser tomada considerando as implicações que a retirada da palha tem na qualidade do solo e todos os fatores que ela envolve (Hassuani et al. 2005; Cantarella et al., 2013; Carvalho et al. 2016).

A qualidade do solo é definida como a capacidade de um tipo específico de solo de funcionar, dentro dos limites dos ecossistemas naturais ou manejados, para sustentar a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar, e contribuir na saúde e habitação humana (Karlen et al., 1997). A integração das propriedades químicas, físicas e biológicas definem a qualidade do solo e a avaliação das suas alterações provê informação importante sobre o efeito dos diferentes sistemas e práticas de manejo, ajudando a definir estratégias que gerem o menor impacto no ambiente e no agroecossistema (Karlen et al. 1997; Cherubin et al. 2015). A agricultura conservacionista está diretamente relacionada com a melhoria da qualidade do solo e tem como princípios básicos o cultivo mínimo, a manutenção de níveis adequados de cobertura vegetal e o uso de rotação de culturas (Verhulst et al., 2010).

Os resíduos vegetais tem um papel dominante na fertilidade do solo de regiões tropicais, uma vez que a curto prazo serve como fonte de nutrientes e a longo prazo contribui para formação de matéria orgânica do solo (MOS) (Palm et al. 2001). Além disso, a MOS representa a principal fonte de cargas negativas de solos altamente intemperizados como os da região tropical (Fonte e Alleoni, 2006). Entretanto, apesar da sua importância como fonte de nutrientes e geração de cargas no solo, a contribuição dos nutrientes provenientes da palha da cana-de-açúcar praticamente não é considerada no manejo da

fertilização da cultura (Fortes et al. 2012), o que mostra a importância de um maior entendimento do efeito da decomposição e liberação de nutrientes na fertilidade do solo.

Outro efeito favorável da manutenção da palha refere-se à redução de perdas de solo por erosão. A manutenção da palha da cana-de-açúcar intercepta gotas de chuva e dissipa sua energia, evitando a desagregação das partículas e a formação de selamento superficial (Andrade et al. 2011; Leal et al. 2013). Os processos erosivos ocasionam perda de nutrientes em magnitudes dependentes das características do solo e seu nível de cobertura, tipo de pendente e frequência e intensidade das chuvas (Schaefer et al., 2002; Izidorio et al., 2005; Martins Filho et al., 2009; Andrade et al.; 2011). No milho, uma cobertura de solo entre 4 e 6 Mg ha⁻¹ de resíduos culturais reduz o impacto das gotas de chuva e assim a taxa e magnitude de erosão do solo (Lal 2008). Carvalho et al. (2016) considera que no caso da cana-de-açúcar, a quantidade mínima de palha necessária para manter os benefícios no solo é de 7 Mg ha⁻¹, enquanto que Sousa et al. (2012) afirmam que a redução de perda de nutrientes e matéria orgânica por erosão é alcançada com uma cobertura de palha de cana-de-açúcar igual ou superior a 10 Mg ha⁻¹. Segundo Lal (2008), o requerimento de resíduos para controle da erosão pode não ser suficiente para manter ou aumentar o estoque de COS, essencial para reduzir as emissões de CO₂ e aumentar a produtividade agrícola. De fato, se as entradas de C estão limitadas à biomassa não coletável, como raízes e rizomas, pode ocorrer redução no estoque de COS e consequentemente na qualidade do solo (Clapp et al. 2000; Wilhelm et al. 2004; Lal 2008).

Nos solos agrícolas, a maior e mais acessível fonte de MOS são os resíduos vegetais que ficam na superfície do solo depois da colheita das culturas (Turmel et al. 2014). Estudos com cana-de-açúcar indicam aumento dos estoques de COS quando a palha é deixada no solo ao invés da sua queima ou remoção (Leal et al. 2013). Entretanto, recentemente tem aumentando o interesse em remover a palha da cana-de-açúcar para produção de energia ou etanol de segunda geração pelo setor sucroenergético brasileiro (Sordi e Manechini, 2013; Carvalho et al., 2016). A remoção da palha do campo poderá afetar a sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar, uma vez que diversos estudos demonstram que a remoção de resíduos culturais para produção de biocombustíveis pode resultar numa diminuição do COS e aumentar a emissão de gases de efeito estufa (GEE) à atmosfera (Sheehan et al. 2004; Cowie et al. 2006; Lal 2008; Liska et al. 2014; Figueiredo et al. 2015).

A manutenção da palha de cana-de-açúcar também contribui para a ciclagem de N (Trivelin et al. 2013). Embora o N proveniente dos resíduos da cana-de-açúcar não irão diminuir a demanda de fertilizantes nitrogenados a curto prazo (Robertson e Thorburn, 2007), a longo prazo tem bastante importância para aumentar a reserva de N do solo, muito maior do que os próprios fertilizantes nitrogenados (Gava et al. 2005; Dourado-Neto et al. 2010). Para reverter esse cenário, o plantio de leguminosas em rotação na época de renovação do canavial poderá mitigar os efeitos negativos da remoção da palha nos estoques de N no solo a longo prazo. O maior benefício da rotação com leguminosas pode ser a contribuição de N ao solo via FBN, gerando aumento de disponibilidade de N e reposição dos estoques de N orgânico (Janzen et al. 1990). Adicionalmente, a rotação de culturas com leguminosa poderá promover melhor distribuição de nutrientes no perfil do solo como consequência da exploração do solo em diferentes profundidades pelo sistema radicular da cultura de rotação (Thierfelder e Wall 2010), e dos efeitos benéficos comprovados da

rotação de culturas na CTC, produção de ácidos orgânicos, complexação de Al e aumento de teor de MOS (Calegari et al. 1993).

Diante do exposto formulou-se a seguinte hipótese:

- i) A fertilidade química e os estoques de C e N do solo são diminuídos pela remoção de palha da cana-de-açúcar, porém, esse efeito é compensado pela rotação com crotalária na reforma do canavial

Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar os atributos químicos do solo e os estoques de C e N no solo em função da remoção total e parcial da palha de cana-de-açúcar e da rotação com crotalária.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em dois locais com características edafoclimáticas contrastantes, localizados nos municípios de Quirinópolis-GO (Local 1) a 18°32'S, 50°26'O e uma altitude de 500 m e, em Quatá-SP (Local 2) a 22°14'S, 50°42'O e a 540 m de altitude. Segundo a classificação climática de Köppen, no local 1 o clima predominante é do tipo Aw (tropical) e no local 2 é do tipo Cfa (subtropical húmido).

No local 1, o solo é classificado como Latossolo Vermelho eutrófico de textura argilosa e no local 2 como Latossolo Vermelho álico de textura arenosa (Santos et al. 2006). Foi realizada a caracterização do solo dos dois locais (Tabela 1), avaliando os atributos químicos conforme a metodologia de Raij et al. (2001). A respeito dos atributos físicos, a análise granulométrica realizada pelo método de pipeta (EMBRAPA 1997). A amostragem para as análises de C e N no solo foi feita antes da instalação dos experimentos de crotalária e os teores determinados por combustão seca (Nelson e Sommers, 1996), por meio do equipamento LECO TruSpec CN (Tabela 2).

Tabela 1. Caracterização química e física dos solos das áreas experimentais antes da instalação do experimento.

Camada	pH	P	K	Ca	Mg	Al	Al+H	CTC	V	Areia	Silte	Argila
m	CaCl ₂	mg dm ⁻³			mmol _c dm ⁻³				%		g kg ⁻¹	
Local 1												
0,0-0,1	5,5	9,5	5,8	44	15,8	0,2	23	89	74	267	186	547
0,1-0,2	5,5	8,2	3,7	43	12,2	0,2	23	82	72	249	190	561
0,2-0,4	5,5	6,7	2,6	34	8,3	0,2	21	66	68	225	195	580
0,4-0,6	5,6	6,8	0,9	28	6,3	0,2	20	55	64	226	175	599
0,6-1,0	5,7	6,2	0,7	22	6,8	0,3	18	48	62	234	171	595
Local 2												
0,0-0,1	5,1	24,2	0,8	16	5,7	0,3	13	36	63	853	60	87
0,1-0,2	4,7	16,0	0,3	10	3,2	4,5	13	31	42	832	60	108
0,2-0,4	4,6	9,0	0,3	10	2,8	5,2	12	30	43	801	57	142
0,4-0,6	4,5	7,0	0,2	8	2,2	6,2	12	28	35	783	73	144
0,6-1,0	4,5	5,5	0,2	7	2,2	6,7	11	28	34	763	78	159

Tabela 2. Teor de C e N total no solo nas duas áreas antes da instalação dos experimentos, com e sem rotação com crotalária.

Camada (m)	Local 1	Local 2
C total g kg⁻¹		
0,0-0,1	21,3	4,4
0,1-0,2	19,6	3,0
0,2-0,4	12,7	2,7
0,4-0,6	9,7	2,6
0,6-1,0	9,0	2,3
N total g kg⁻¹		
0,0-0,1	1,6	0,2
0,1-0,2	1,5	0,2
0,2-0,4	0,9	0,2
0,4-0,6	0,6	0,2
0,6-1,0	0,6	0,1

3.2.2. Tratamentos e delineamento experimental

Utilizou-se estrutura de grupo de experimentos composta por um experimento com plantio de crotalária e outro sem o plantio da leguminosa na reforma do canavial. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com três tratamentos de níveis de manutenção de palha (0, 50 e 100%) e quatro repetições, que foi implantado após a colheita da cana-planta e reinstalado após a colheita da primeira soqueira. Após a colheita da primeira soqueira, depois de dois anos de manutenção dos tratamentos no campo, os atributos químicos e o teor de C e N do solo foram avaliados em quatro camadas. Cada parcela experimental foi constituída de cinco sulcos com 9 m de comprimento espaçados em 1,5 m. Detalhes a respeito das particularidades de cada local estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Informação da instalação e condução dos experimentos

Informação	Local	
	1	2
Plantio da crotalária	20/12/12	06/02/13
Espécie cultivada	<i>C. spectabilis</i>	<i>C. spectabilis</i>
Dessecação da crotalária	06/03/13	16/04/13
Biomassa de crotalária produzida (Mg ha ⁻¹)	8,1	6,5
Calcário (Mg ha ⁻¹)	-	2,0
Gesso (Mg ha ⁻¹)	-	1,0
Cultivar de cana-de-açúcar	RB96 6928	RB96 6928
Plantio da cana com SPD	22/03/13	30/04/13
Adubação cana planta (kg ha ⁻¹)	500/8-25-25	500/5-25-25
Colheita cana-planta	Jun/14	Jun/14
Palha produzida na cana-planta (Mg ha ⁻¹)	16,6	8,6
Adubação primeira soqueira (kg ha ⁻¹)	575/21-0-21	575/21-0-21
Colheita primeira soqueira	Jun/15	Jun/15
Palha produzida na primeira soqueira (Mg ha ⁻¹)	16,3	9,7
Adubação segunda soqueira (kg ha ⁻¹)	575/21-0-21 ¹	575/21-0-21 ¹
Colheita segunda soqueira	Jun/16	Jun/16

¹= Adicionalmente, aplicou-se 1 kg ha⁻¹ de B

Para a instalação do componente do experimento referente a rotação com crotalária, a área experimental foi dividida em duas faixas, sendo que em uma foi efetuado a semeadura da crotalária com uma densidade de 25 kg ha⁻¹ de sementes, e a outra deixada em pousio até o plantio da cana-de-açúcar com sistema de plantio direto. No momento da dessecação da crotalária foi realizada amostragem para quantificar a biomassa de crotalária e os teores de nutrientes, para cálculo do acúmulo de nutrientes na biomassa da crotalária (Tabela 4). Logo após a colheita da cana-planta, foi instalada a parte do experimento referente aos níveis de manutenção de palha. Inicialmente foi estimada a quantidade de palha remanescente no solo por meio de amostragem da massa do resíduo vegetal presente em pontos aleatórios de 1 m² dentro de cada parcela, dados que foram extrapolados para obter a quantidade de palha em Mg ha⁻¹ (Tabela 3). Para o tratamento de 100% de manutenção de palha, foi deixado todo o conteúdo de palha remanescente da colheita da cultura. Com relação ao tratamento de 50% de manutenção da palha, cada parcela foi dividida em duas partes simétricas, posteriormente foi tirada totalidade da palha de uma das partes e, logo em seguida, o resíduo mantido foi espalhado uniformemente em toda a área da parcela com ajuda de um rastelo. Já no 0% de manutenção, foi retirada a totalidade da palha com o rastelo deixando o solo totalmente descoberto. O mesmo procedimento foi repetido após a colheita da primeira soqueira, dando sequência aos tratamentos nas mesmas parcelas ao longo do experimento.

Tabela 4. Acúmulo de nutrientes dos resíduos de crotalaria

N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
kg ha ⁻¹					g ha ⁻¹					
Local 1										
194,4	19,4	126,4	73,7	17,8	13,8	113,4	153,9	9250,2	348,3	210,6
Local 2										
156,0	28,0	110,5	57,9	20,8	24,1	123,5	65,0	2327,0	377,0	266,5

3.2.3. Amostragem e análises químicas de solo

No local 1, a amostragem de solo com fins de avaliação dos estoques de C e N foi feita em maio de 2016 e dos atributos químicos em julho de 2016. No local 2 as duas avaliações foram efetuadas ao mesmo tempo, em junho de 2016. Para análise dos atributos químicos foram coletadas quatro subamostras por parcela a 15 cm da linha da cana-de-açúcar nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, para a posterior obtenção de uma amostra composta por camada. Para as duas camadas mais superficiais, a amostragem foi realizada com anéis de aço inox (5 x 5 cm) para evitar contaminação entre as camadas, enquanto nas duas camadas mais profundas a amostragem foi realizada com trado holandês.

No caso da amostragem de solo para o cálculo dos estoques de C e N, em cada parcela foram coletadas duas subamostras nas camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, a 15 cm da linha da cana-de-açúcar (Linha cana –LC) e a 75 cm da linha da cana-de-açúcar (Entrelinha cana – EC). Similar ao efetuado na coleta de solo para atributos químicos, as amostras das camadas 0-5 e 5-10 cm foram coletadas com anéis de aço inox e nas camadas restantes com trado holandês. Para o cálculo da densidade do solo, foi utilizado um trado de caneca que permitiu abrir um orifício até o ponto médio de cada camada avaliada, para depois, por meio de um amostrador de densidade, obter uma amostra indeformada com auxílio de um cilindro de aço inox de 100 cm³. A densidade do solo foi quantificada tanto na linha como na entrelinha da cana-de-açúcar, nas mesmas posições utilizadas para coleta de solo anteriormente descrita.

Depois de coletadas, as amostras de solo foram secas ao ar e passadas por peneira de 2 mm para posterior análise de fertilidade. O pH foi determinado em solução CaCl₂ 0.01 mol L⁻¹, a acidez potencial (Al+H) com solução tampão SMP, o Al trocável (Al³⁺) foi extraído com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e determinado por titulação acidimétrica com NaOH 0.025 mol L⁻¹, o P, K, Ca e Mg foram extraídos com resina trocadora de íons para determinação de P por meio de colorimetria, K por fotometria de emissão em chama, e Ca e Mg por espectrofotometria de absorção atômica. O Sulfato (S-SO₄²⁻) foi extraído com uma solução de Ca(H₂PO₄)₂ 0.01 mol L⁻¹ e quantificado por turbidimetria. As análises foram realizadas conforme metodologia de Raij et al. (2001) . A CTC a pH 7.0 e a saturação de bases (V%) foram obtidas mediante cálculos. As amostras destinadas para avaliar conteúdo de C e N foram secas no ar, homogenizadas e uma subamostra de aproximadamente 10 g foi moída em gral de porcelana e passada totalmente em peneira com abertura de 100 mesh (0.150 mm) para determinação via combustão seca (Nelson e Sommers, 1996) usando o analisador elementar de CN, modelo TruSpec CN LECO® (Leco, St Joseph, MI, USA).

3.2.4. Cálculo de estoques de C e N

Os estoques de C e N (Mg ha^{-1}) foram calculados considerando a densidade aparente (g cm^{-3}), a concentração de cada elemento (%) e a espessura de cada camada avaliada. Os cálculos de estoques de C e N dependem da densidade aparente do solo, logo, fatores como tráfego de máquinas e preparo do solo que afetam a densidade do solo, podem também afetar o resultado acarretando em erros de cálculo ao comparar diferentes massas de solo numa profundidade fixa (Cerri et al. 2013). Devido a isso, os estoques de C e N foram corrigidos para uma mesma massa de solo, usando como referência a densidade aparente do solo ao momento prévio do plantio da cana-de-açúcar nos dois locais avaliados, de acordo com o procedimento de cálculo e correção por massa equivalente de solo descrito por Ellertl e Bettany (1995). Foi feito o cálculo de estoque de C e N isoladamente da LC e da EC, para depois calcular o estoque total por meio de uma média ponderada onde a LC e a EC representaram 33.3 e 66.6 % da área total, respectivamente.

3.2.5. Análise estatística

Comprovou-se homogeneidade de variância entre o experimento com plantio de crotalária e o experimento sem plantio da leguminosa, para assim realizar a análise de grupo de experimentos. Os resultados foram submetidos à análise de variância, e quando o valor de F foi significativo a 10% de significância, foi realizado o teste de comparação de medias de Tukey ($P < 0,1$), utilizando o software estatístico R (R Core Team, 2015).

3.3. Resultados

3.3.1. Atributos químicos

Em nenhum dos locais avaliados houve efeito dos tratamentos no pH (Anexo A) e no Al trocável (Anexo B). O local 1 apresentou interação entre os tratamentos de rotação com crotalária e níveis de manutenção de palha na acidez potencial (Tabela 4), gerando diferença significativa entre os sistemas de manejo de palha somente dentro do tratamento com rotação, onde 100% de manutenção de palha apresentou o menor valor, contrastando com o tratamento de remoção total de palha. Não houve diferença significativa nos teores de Al+H no local 2 (Tabela 4).

Tabela 4. Valores de Al+H no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha	Rotação com crotalaria						
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média	
	Al+H mmolc dm ⁻³						
	Local 1			Local 2			
	0-5 cm			0-5 cm			
0	59,4	44,6	52,0	12,9	14,5	13,7	
50	63,4	39,6	51,5	14,7	12,9	13,8	
100	45,1	55,2	50,1	9,3	12,2	10,7	
Média	55,9	46,5		12,3	13,2		
	5-10 cm			5-10 cm			
0	69,9	54,2	62,1 A	15,2	17,0	16,1	
50	59,7	38,1	48,9 B	15,0	14,8	14,9	
100	39,0	55,9	47,4 B	16,0	13,3	14,6	
Média	56,2	49,4		15,4	15,0		
	10-20 cm			10-20 cm			
0	48,9	48,0	48,4 A	20,2	16,1	18,1	
50	37,0	36,9	37,0 B	20,4	15,7	18,0	
100	44,3	48,0	46,2 A	16,2	15,8	16,0	
Média	43,4	44,3		18,9	15,9		
	20-40 cm			20-40 cm			
0	36,5	36,2	36,3 A	25,6	23,7	24,7	
50	29,2	34,0	31,6 B	26,4	21,1	23,7	
100	30,6	34,9	32,7 B	22,0	23,0	22,5	
Média	32,1	35,0		24,7	22,6		
	Média			Média			
0	53,7	A	45,7	49,7	18,5	17,8	18,2
50	47,3	AB	37,2	42,2	19,1	16,1	17,6
100	39,7	B	48,5	44,1	15,9	16,1	16,0
Média	46,9		43,8		17,8	16,7	
P _{rotação}			0,369			0,269	
P _{palha}			0,203			0,220	
P _{rotação*palha}			0,075			0,422	
P _{profundidade}			<0,001			<0,001	
P _{profundidade*rotação}			0,166			0,170	
P _{profundidade*palha}			0,067			0,805	

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$). ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

No local 1 houve efeito da rotação de cultura no teor de P do solo, sendo que o tratamento com rotação apresentou os maiores valores em todas as profundidades, e a maior diferença entre tratamentos foi obtida nas camadas mais superficiais (Tabela 5). No caso do S houve efeito do manejo de palha e da rotação de culturas isoladamente. Os maiores teores de S, na média das quatro profundidades, foram observados no tratamento sem rotação no local 1, enquanto que no local 2 não houve efeito da rotação no teor de S no solo (Tabela 6). Para os níveis de palha, no local 1 o tratamento que gerou o maior teor médio de S nas

quatro profundidades foi o de remoção total de palha, enquanto que o 50 e 100% de palha não diferenciaram entre si. No local 2 houve efeito significativo entre os níveis de manutenção de palha e as profundidades, manifestando-se em um menor teor de S nas profundidades 5-10 e 10-20 cm sob o 0% de palha, enquanto que não houve diferença entre os tratamentos de 50 e 100% de palha (Tabela 6).

No local 1, a rotação de cultura aumentou o teor de K nas camadas 0-5 e 5-10 cm (Tabela 7). No local 2, apesar de não ocorrer interação entre rotação e profundidade, observou-se maior teor de K na média das quatro profundidades no tratamento com rotação. Nos dois locais, os tratamentos não refletiram efeito no Ca em nenhum dos tratamentos (Anexo C). No local 1, o teor de Mg foi maior no tratamento sem rotação somente com 50% de manutenção de palha. Em 0 e 100% de manutenção não houve efeito significativo da rotação de cultura, enquanto que dentro do tratamento que não recebeu rotação, o maior teor de Mg foi obtido no tratamento de manutenção parcial de palha, contrastando com a manutenção total que mostrou o valor mais baixo de Mg (Tabela 8). No local 2 não houve efeito dos tratamentos no teor de Mg.

A CTC foi maior no tratamento com rotação na média das quatro profundidades no local 1 (Tabela 9). Nesse mesmo local, houve efeito positivo da rotação com crotalária na V% dentro do tratamento de 100% de manutenção de palha. Dentro do tratamento com rotação, a maior V% foi obtida com a manutenção total de palha e a menor onde não houve manutenção de palha, diferente do observado dentro do tratamento sem rotação, que apresentou maior V% no tratamento com 50% de palha e menor V% o tratamento com 100% de palha (Tabela 10). No local 2 não houveram diferenças para estas duas variáveis. O teor de C não apresentou diferenças significativas no local 1, enquanto que no local 2, o tratamento de manutenção total de palha apresentou maiores teores dentro dos dois manejos de rotação de cultura, na média das quatro profundidades (Tabela 11).

Tabela 5. Valores de P no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha	Rotação com crotalária					
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
%	P mg dm ⁻³					
	Local 1			Local 2		
	0-5 cm			0-5 cm		
0	25,0	16,8	20,9	27,3	25,1	26,2
50	25,4	16,2	20,8	30,3	28,5	29,4
100	23,7	15,3	19,5	22,7	25,3	24,0
Média	24,7 a	16,1 b		26,7	26,3	
	5-10 cm			5-10 cm		
0	16,6	15,0	15,8	22,3	15,9	19,1
50	15,8	14,2	15,0	18,3	19,3	18,8
100	23,6	13,8	18,7	17,9	14,9	16,4
Média	18,7 a	14,3 b		19,5	16,7	
	10-20 cm			10-20 cm		
0	18,7	15,1	16,9	22,6	16,8	19,7
50	15,4	14,4	14,9	13,3	19,8	16,5
100	17,0	12,9	15,0	13,8	12,7	13,2
Média	17,0 a	14,2 b		16,5	16,4	
	20-40 cm			20-40 cm		
0	13,8	13,9	13,8	15,7	12,1	13,9
50	12,1	10,5	11,3	12,5	14,5	13,5
100	18,9	10,9	14,9	12,7	16,2	14,5
Média	14,9 a	11,8 b		13,6	14,3	
	Média			Média		
0	18,5	15,2	16,8	22,0	17,5	19,7
50	17,2	13,8	15,5	18,6	20,6	19,6
100	20,8	13,2	17,0	16,8	17,3	17,0
Média	18,8	14,1		19,1	18,4	
P _{palha}		0,423			0,422	
P _{rotação*palha}		0,173			0,329	
P _{profundidade}		<0,001			<0,001	
P _{profundidade*rotação}		0,058			0,755	
P _{profundidade*palha}		0,235			0,597	

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$). ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

Tabela 6. Valores de S no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha	Rotação com crotalária					
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
%	S mg dm ⁻³					
	Local 1			Local 2		
	0-5 cm			0-5 cm		
0	7,3	10,1	8,7	4,1	3,9	4,0
50	7,9	10,9	9,4	5,8	4,8	5,3
100	10,5	10,1	10,3	3,9	4,7	4,3
Média	8,6	10,4		4,6	4,5	
	5-10 cm			5-10 cm		
0	13,1	15,1	14,1	3,5	3,5	3,5 B
50	8,1	7,5	7,8	4,6	4,1	4,3 A
100	5,9	9,2	7,6	3,8	3,9	3,9 AB
Média	9,0	10,6		4,0	3,8	
	10-20 cm			10-20 cm		
0	7,5	10,2	8,9	3,6	3,8	3,7 B
50	6,9	8,2	7,6	3,8	4,2	4,0 AB
100	6,3	9,2	7,7	4,9	4,5	4,7 A
Média	6,9	9,2		4,1	4,2	
	20-40 cm			20-40 cm		
0	6,3	9,4	7,9	4,4	3,9	4,2
50	5,4	8,2	6,8	4,5	4,4	4,5
100	6,8	8,1	7,5	4,4	4,2	4,3
Média	6,2	8,6		4,4	4,2	
	Média			Média		
0	8,6	11,2	9,9 A	3,9	3,8	3,8
50	7,1	8,7	7,9 B	4,7	4,4	4,5
100	7,4	9,2	8,3 B	4,3	4,3	4,3
Média	7,7 b	9,7 a		4,3	4,2	
P _{rotação}		0,002			0,608	
P _{palha}		0,017			0,062	
P _{rotação*palha}		0,653			0,814	
P _{profundidade}		0,007			0,021	
P _{profundidade*rotação}		0,950			0,811	
P _{profundidade*palha}		0,105			0,092	

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$). ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

Tabela 7. Valores de K no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha	Rotação com crotalária					
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
	K mmol _c dm ⁻³					
%	Local 1			Local 2		
	0-5 cm			0-5 cm		
0	7,7	5,4	6,5	1,7	1,5	1,6
50	8,9	3,9	6,4	1,7	1,5	1,6
100	7,9	4,0	6,0	1,6	1,4	1,5
Média	8,2 a	4,4 b		1,7	1,5	
	5-10 cm			5-10 cm		
0	5,8	4,1	5,0	1,6	1,3	1,4
50	7,5	2,8	5,1	1,6	1,4	1,5
100	5,6	3,1	4,4	1,5	1,2	1,3
Média	6,3 a	3,3 b		1,6	1,3	
	10-20 cm			10-20 cm		
0	4,1	4,1	4,1	1,7	1,5	1,6
50	5,0	3,5	4,2	1,8	1,3	1,5
100	4,8	4,3	4,5	1,4	1,5	1,4
Média	4,6	4,0		1,6	1,4	
	20-40 cm			20-40 cm		
0	2,8	3,2	3,0	1,7	1,4	1,5
50	2,9	2,4	2,7	1,7	1,1	1,4
100	3,4	2,7	3,0	1,4	1,3	1,3
Média	3,0	2,8		1,6	1,3	
	0-40 cm			0-40 cm		
0	5,1	4,2	4,7	1,7	1,4	1,5
50	6,1	3,2	4,6	1,7	1,3	1,5
100	5,4	3,5	4,5	1,5	1,3	1,4
Média	5,5	3,6		1,6 a	1,4 b	
P _{rotação}		0,022			0,003	
P _{palha}		0,977			0,326	
P _{rotação*palha}		0,547			0,352	
P _{profundidade}		<0,001			0,0136	
P _{profundidade*rotação}		<0,001			0,584	
P _{profundidade*palha}		0,618			0,914	

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$). ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

Tabela 8. Valores de Mg no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha	Rotação com crotalária							
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média		
%	Mg mmol _c dm ⁻³							
	Local 1			Local 2				
	0-5 cm			0-5 cm				
0	12,5	18,0	15,3	14,1	10,0	12,0		
50	11,7	21,4	16,5	17,6	11,4	14,5		
100	20,3	14,4	17,3	15,5	12,7	14,1		
Média	14,8	17,9		15,7	11,3			
	5-10 cm			5-10 cm				
0	9,8	15,2	12,5	7,7	5,4	6,5		
50	11,2	17,6	14,4	11,6	12,7	12,2		
100	17,9	12,3	15,1	6,8	6,8	6,8		
Média	12,9	15,0		8,7	8,3			
	10-20 cm			10-20 cm				
0	12,7	12,8	12,8	5,3	6,2	5,8		
50	16,3	16,2	16,3	3,8	6,7	5,2		
100	15,2	12,2	13,7	6,5	4,2	5,3		
Média	14,8	13,7		5,2	5,7			
	20-40 cm			20-40 cm				
0	11,8	13,0	12,4	2,9	3,6	3,2		
50	13,4	14,5	13,9	3,4	4,3	3,8		
100	11,9	12,1	12,0	4,5	3,6	4,0		
Média	12,3	13,2		3,6	3,8			
	Média			Média				
0	11,7	14,7	AB	13,2	7,5	6,3	6,9	
50	13,1	b	17,4	Aa	15,3	9,1	8,8	8,9
100	16,3		12,7	B	14,5	8,3	6,8	7,6
Média	13,7		15,0			8,3	7,3	
P _{rotação}		0,242			0,452			
P _{palha}		0,281			0,456			
P _{rotação*palha}		0,017			0,930			
P _{profundidade}		0,005			<0,001			
P _{profundidade*rotação}		0,195			0,465			
P _{profundidade*palha}		0,703			0,321			

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$). ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

Tabela 9. Valores da CTC potencial a pH 7 no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha	Rotação com crotalária					
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
%	CTC mmol _c dm ⁻³					
	Local 1			Local 2		
	0-5 cm			0-5 cm		
0	116,4	111,1	113,7	49,4	40,6	45,0
50	115,0	113,2	114,1	66,1	43,3	54,7
100	128,7	106,5	117,6	52,2	47,4	49,8
Média	120,0	110,3		55,9	43,8	
	5-10 cm			5-10 cm		
0	113,4	110,2	111,8	38,7	32,2	35,5
50	108,8	99,1	103,9	49,8	47,9	48,9
100	109,9	100,9	105,4	36,6	31,6	34,1
Média	110,7	103,4		41,7	37,2	
	10-20 cm			10-20 cm		
0	100,9	95,9	98,4	35,4	35,3	35,4
50	100,5	95,7	98,1	32,7	39,0	35,9
100	104,7	92,7	98,7	37,2	27,1	32,1
Média	102,0	94,8		35,1	33,8	
	20-40 cm			20-40 cm		
0	80,1	81,8	81,0	33,5	35,8	34,7
50	80,6	81,9	81,3	35,2	34,4	34,8
100	75,4	76,3	75,9	34,1	30,9	32,5
Média	78,7	80,0		34,3	33,7	
	Média			Média		
0	102,7	99,8	101,2	39,3	36,0	37,6
50	101,2	97,5	99,3	45,9	41,2	43,6
100	104,7	94,1	99,4	40,0	34,3	37,1
Média	102,9 a	97,1 b		41,7	37,1	
P _{rotação}		0,058			0,230	
P _{palha}		0,819			0,313	
P _{rotação*palha}		0,481			0,962	
P _{profundidade}		<0,001			0,0028	
P _{profundidade*rotação}		0,207			0,557	
P _{profundidade*palha}		0,452			0,634	

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$). ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

Tabela 10. Valores de V% no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha	Rotação com crotalária					
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
%	V %					
	Local 1			Local 2		
	0-5 cm			0-5 cm		
0	48,6	56,9	52,7	73,1	62,2	67,7
50	44,3	64,2	54,2	67,9	68,6	68,3
100	63,5	48,4	56,0	82,3	72,2	77,2
Média	52,1	56,5		74,5	67,7	
	5-10 cm			5-10 cm		
0	37,2	49,3	43,2	59,5	46,6	53,1
50	44,4	61,0	52,7	63,6	60,7	62,2
100	63,9	44,5	54,2	55,3	57,0	56,1
Média	48,5	51,6		59,5	54,8	
	10-20 cm			10-20 cm		
0	50,8	49,7	50,2	42,3	51,7	47,0
50	62,8	61,0	61,9	37,1	58,3	47,7
100	57,5	47,4	52,4	54,8	41,6	48,2
Média	57,0	52,7		44,8	50,5	
	20-40 cm			20-40 cm		
0	53,6	54,8	54,2	24,1	29,8	26,9
50	62,9	57,7	60,3	25,0	36,7	30,9
100	59,3	53,7	56,5	35,1	25,5	30,3
Média	58,6	55,4		28,1	30,7	
	Média			Média		
0	47,5 B	52,7 AB	50,1	49,8	47,6	48,7
50	53,6 AB	61,0 A	57,3	48,4	56,1	52,3
100	61,0 Aa	48,5 Bb	54,8	56,9	49,1	53,0
Média	54,0	54,1		51,7	50,9	
P _{rotação}		0,997			0,831	
P _{palha}		0,184			0,587	
P _{rotação*palha}		0,037			0,244	
P _{profundidade}		0,06			<0,001	
P _{profundidade*rotação}		0,331			0,296	
P _{profundidade*palha}		0,332			0,603	

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$). ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

Tabela 11. Valores de C no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha	Rotação com crotalária					
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
%	C g kg ⁻¹					
	Local 1			Local 2		
	0-5 cm			0-5 cm		
0	27,2	24,9	26,0	5,5	4,7	5,1
50	26,4	25,2	25,8	6,0	5,2	5,6
100	27,1	25,2	26,2	6,2	6,5	6,3
Média	26,9	25,1		5,9	5,4	
	5-10 cm			5-10 cm		
0	23,7	23,4	23,6	4,0	4,0	4,0
50	23,0	21,8	22,4	4,5	3,7	4,1
100	23,7	22,3	23,0	4,9	4,4	4,6
Média	23,5	22,5		4,5	4,0	
	10-20 cm			10-20 cm		
0	21,8	20,9	21,3	3,5	3,5	3,5
50	20,1	18,7	19,4	3,3	3,3	3,3
100	20,9	22,4	21,7	4,0	3,9	4,0
Média	20,9	20,7		3,6	3,6	
	20-40 cm			20-40 cm		
0	17,8	17,2	17,5	3,1	3,1	3,1
50	16,3	15,6	16,0	3,1	3,0	3,1
100	16,0	17,5	16,7	3,6	3,7	3,6
Média	16,7	16,8		3,2	3,3	
	Média			Média		
0	22,6	21,6	22,1	4,0 B	3,8 B	3,9
50	21,5	20,3	20,9	4,2 Ba	3,8 Bb	4,0
100	21,9	21,9	21,9	4,7 A	4,6 A	4,6
Média	22,0	21,3		4,3	4,1	
P _{rotação}		0,630			0,107	
P _{palha}		0,779			0,122	
P _{rotação*palha}		0,805			0,040	
P _{profundidade}		<0,001			<0,001	
P _{profundidade*rotação}		0,664			0,294	
P _{profundidade*palha}		0,942			0,702	

¹Médias seguidas por uma mesma letra minúscula entre os níveis de palha e maiúscula entre os manejos, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$). ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

3.3.2. Estoques de C e N

No local 1, não houve efeito dos tratamentos no estoque de C em nenhuma das quatro profundidades avaliadas. Já no local 2, a manutenção da palha de cana-de-açúcar favoreceu os estoques de C em superfície e profundidade, sendo que na camada 0-5 cm a manutenção de 100 e 50% da palha aumentou 21 e 15%, respectivamente, o estoque de C em relação ao tratamento sem palha. Nas profundidades de 10-20 e 20-40 cm, os estoques de C com 100% de palha diferiram dos tratamentos com 50 e 0% de manutenção (Tabela 12). A rotação com crotalária, por sua vez, não alterou os estoques de C em nenhum dos locais avaliados. Apesar dos resultados positivos da manutenção da palha nos estoques de C, não houve efeito da palha nos estoques de N total no solo; a rotação com crotalária também não afetou o estoque de N total em nenhum dos locais avaliados (Tabela 13).

Considerando a camada equivalente de 0-40 cm, não houve diferenças significativas para estoque de C entre tratamentos no local 1 (Tabela 14). No local 2, só houve efeito da palha no acúmulo de C no solo, sendo que a manutenção de 100% de palha aumentou o estoque de C em 14% quando comparado aos demais tratamentos (Tabela 14 e Figura 1). Embora tenha apresentado tendência similar aos verificado para estoque de C, os tratamentos não alteraram o estoque de N no solo em nenhum dos locais avaliados (Tabela 14).

Tabela 12. Estoque de C nas quatro profundidades avaliadas no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha	Rotação com crotalária					
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
%	Carbono Mg ha ⁻¹					
	Local 1			Local 2		
	0-5 cm			0-5 cm		
0	17,4	16,6	17,0	4,2	4,0	4,1 B
50	17,7	16,7	17,2	5,0	4,6	4,8 A
100	17,7	16,7	17,2	5,1	5,3	5,2 A
Média	17,6	16,7		4,8	4,6	
P _{rotação}		0,592			0,790	
P _{palha}		0,977			0,073	
P _{rotação*palha}		0,993			0,696	
	5-10 cm			5-10 cm		
0	15,6	15,5	15,6	3,8	3,5	3,7
50	15,5	16,6	16,0	3,8	3,2	3,5
100	15,3	15,3	15,3	4,1	3,9	4,0
Média	15,4	15,8		3,9	3,5	
P _{rotação}		0,348			0,238	
P _{palha}		0,561			0,133	
P _{rotação*palha}		0,334			0,401	
	10-20 cm			10-20 cm		
0	24,5	24,3	24,4	6,0	6,2	6,1 B
50	27,8	26,2	27,0	6,6	5,9	6,2 B
100	25,5	29,1	27,3	7,3	7,3	7,3 A
Média	25,9	26,5		6,6	6,5	
P _{rotação}		0,442			0,889	
P _{palha}		0,675			0,024	
P _{rotação*palha}		0,982			0,325	
	20-40 cm			20-40 cm		
0	39,6	37,6	38,6	10,2	11,0	10,6 B
50	42,4	41,2	41,8	10,8	10,9	10,9 B
100	41,1	42,4	41,8	12,2	12,8	12,5 A
Média	41,0	40,4		11,1	11,6	
P _{rotação}		0,778			0,309	
P _{palha}		0,453			0,029	
P _{rotação*palha}		0,826			0,481	

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$), ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

Tabela 13. Estoque de N nas quatro profundidades avaliadas no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha	Rotação com crotalária					
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
%	Nitrogênio Mg ha ⁻¹					
	Local 1			Local 2		
	0-5 cm			0-5 cm		
0	1,33	1,25	1,29	0,30	0,29	0,29
50	1,35	1,27	1,31	0,32	0,32	0,32
100	1,33	1,23	1,28	0,36	0,41	0,39
Média	1,34	1,25		0,33	0,34	
P _{rotação}		0,698			0,753	
P _{palha}		0,983			0,802	
P _{rotação*palha}		0,989			0,893	
	5-10 cm			5-10 cm		
0	1,23	1,22	1,23	0,28	0,20	0,24
50	1,23	1,28	1,25	0,26	0,20	0,23
100	1,19	1,17	1,18	0,31	0,34	0,33
Média	1,22	1,22		0,29	0,25	
P _{rotação}		0,897			0,903	
P _{palha}		0,774			0,660	
P _{rotação*palha}		0,884			0,755	
	10-20 cm			10-20 cm		
0	2,07	1,97	2,02	0,50	0,45	0,47
50	2,22	2,08	2,15	0,53	0,47	0,50
100	1,98	2,21	2,09	0,58	0,64	0,61
Média	2,09	2,09		0,54	0,52	
P _{rotação}		0,776			0,764	
P _{palha}		0,902			0,569	
P _{rotação*palha}		0,874			0,459	
	20-40 cm			20-40 cm		
0	3,37	3,15	3,26	0,87	0,92	0,90
50	3,56	3,42	3,49	0,92	0,97	0,94
100	3,24	3,32	3,28	1,07	1,26	1,17
Média	3,39	3,30		0,96	1,05	
P _{rotação}		0,833			0,779	
P _{palha}		0,784			0,456	
P _{rotação*palha}		0,878			0,921	

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$), ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

Tabela 14. Estoque de C e N (0-40 cm) no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha	Rotação com crotalária					
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
	Carbono			Mg ha ⁻¹		
%	Local 1			Local 2		
	0-40 cm			0-40 cm		
0	97,0	94,1	95,5	24,2	24,7	24,5 B
50	103,3	100,6	102,0	26,2	24,5	25,3 B
100	99,5	103,6	101,6	28,7	29,4	29,0 A
Média	100,0	99,4		26,4	26,2	
P _{rotação}		0,552			0,806	
P _{palha}		0,430			0,005	
P _{rotação*palha}		0,706			0,280	
	Nitrogênio			Mg ha ⁻¹		
	Local 1			Local 2		
	0-40 cm			0-40 cm		
0	7,99	7,60	7,80	1,96	1,86	1,91
50	8,36	8,04	8,20	2,03	1,96	1,99
100	7,75	7,94	7,84	2,33	2,65	2,49
Média	8,03	7,86		2,10	2,15	
P _{rotação}		0,772			0,621	
P _{palha}		0,255			0,309	
P _{rotação*palha}		0,469			0,426	

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$). ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

Figura 1. Estoques de C no solo nos locais 1 e 2 submetidos a níveis de palha. Letras diferentes indicam diferenças estatísticas entre tratamentos pelo teste de Tukey ($P < 0.1$)

3.4. Discussão

3.4.1. Atributos químicos

A dinâmica de decomposição dos resíduos de crotalaria e da palha de cana-de-açúcar não afetaram o pH do solo depois dos dois anos de experimento em nenhum dos locais avaliados. Resultado semelhante foi obtido por Aquino et al. (2015) em um estudo de incubação de solo em laboratório, aonde não foi observado efeito de quantidades de palha de cana-de-açúcar no pH do solo. Leme Filho (2009) também não observou efeito de diferentes manejos da palha no pH do solo ao final da primeira soqueira de cana-de-açúcar. Avaliando o efeito de *Crotalaria juncea* cultivada na renovação do canavial sobre os atributos

químicos do solo, Bokhtiar et al. (2003) não reportaram diferenças significativas no pH do solo em comparação com o tratamento que não recebeu adubação verde.

Mesmo não havendo efeito dos tratamentos sobre o Al^{+3} em nenhum dos experimentos, no local 1 foi observada tendência de maiores teores de Al^{+3} nas parcelas sem aporte de resíduos vegetais de crotalária ou de palha de cana-de-açúcar. Apesar da ausência de diferença significativa para o Al^{3+} , foi observado efeito significativo dos tratamentos na acidez potencial, variável constituída pelo Al^{+3} (acidez trocável) e pela acidez não-trocável ou residual (Sousa et al. 2007). A manutenção de 50 ou 100% de palha na superfície do solo do local 1 reduziu os teores de H+Al em camadas mais profundas do solo (Tabela 4). Este comportamento pode estar relacionado com a complexação do Al^{+3} com os ácidos orgânicos liberados durante a decomposição dos resíduos, gerando-se um composto orgânico-mineral solúvel que pode ser mobilizado pelo fluxo de água em sub-superfície (Franchini et al. 1999; Miyazawa et al. 2000; Pavinato e Rosolem 2008). Miyazawa et al. (2000) afirmam que o Al é complexado preferencialmente com ácido cítrico devido à alta constante de estabilidade do composto formado. Malvestiti (2014) reportou que o ácido cítrico é um dos ácidos orgânicos com maior concentração na palha de cana-de-açúcar na variedade RB96 6928, justificando o efeito da palha na redução dos teores de H+Al no solo.

A rotação com crotalária impactou muito mais os teores de P no solo dos que os níveis de manutenção de palha (Tabela 5). Este comportamento pode estar relacionado à diferença de qualidade dos dois tipos de resíduos adicionados ao solo. Nziguheba et al. (1998) avaliaram o efeito de resíduos vegetais de alta e baixa qualidade, em termos de liberação e suprimento de nutrientes, e concluíram que a dinâmica do P lábil era favorecida pelo aporte dos resíduos com maior taxa de decomposição, devido ao aporte nutricional e também da maior disponibilização do P via redução de adsorção do elemento na fração argila do solo. A redução na adsorção de P pela incorporação de resíduos de alta qualidade também foi apontado por Pavinato e Rosolem (2008) para explicar o maior aumento do P no solo por resíduos de trevo em comparação com os de milho. Estas evidências, associadas ao fato de que a crotalária só aumentou o teor de P no solo mais argiloso (local 1) e com maior capacidade de fixação de P, comprovam que os resíduos da crotalária são mais efetivos do que a palha para reduzir a adsorção de P ao solo pelo fato de apresentar maior qualidade que a palha de cana-de-açúcar segundo suas características químicas (Palm et al. 2001).

O efeito da rotação com crotalária nas quatro profundidades avaliadas no local 1 (Tabela 5), é um indicativo de que a ação da leguminosa foi além da mineralização do P proveniente do material orgânico, pois nesse caso era de esperar um efeito restrito somente às camadas superficiais, dada a baixa mobilidade do P no perfil de solo. Portanto, é provável que tenha ocorrido em maior proporção um aumento da disponibilidade do P nativo no solo, graças ao comportamento dos ácidos orgânicos oriundos da decomposição dos resíduos em superfície, e do sistema radicular em sub-superfície. A alta mobilidade dos ácidos orgânicos, e sua capacidade em ocupar e bloquear os sítios de adsorção dos óxidos de Fe e Al diminui a adsorção de P nesses minerais, causa pela qual as leguminosas são geralmente mais efetivas em disponibilizar P no solo (Nziguheba et al. 1998; Andrade et al. 2003; Pavinato e Rosolem 2008; Turmel et al. 2014). Além da diminuição de adsorção de P, os ácidos orgânicos também reduzem a precipitação de P com o Al^{+3} aumentando sua disponibilidade (Haynes e Mokolobate 2001; Hinsinger 2001; Rosolem e

Calonego 2013). Apesar dos efeitos benéficos da crotalaria observados no local 1, outros resultados da literatura não reportaram efeito positivo da rotação de culturas no aumento da disponibilidade de P do solo (Alcantara et al., 2000; Cáceres e Alcarde, 1995; Manzi Gama, 2007), de forma semelhante ao observado no local 2 do presente estudo. Assim, pela própria natureza dos solos nos locais 1 e 2, é claro que no local 1, onde o solo tem maior conteúdo de argila e teor de Al^{+3} , o efeito da crotalaria foi mais relevante em termos de quantidade de P disponibilizado em comparação com o local 2, onde não houveram diferenças significativas entre os tratamentos.

O SO_4 é a principal forma de S inorgânico em solos bem drenados e a forma preferencialmente absorvida pelas plantas, porém, a predição da sua disponibilidade é complexa devido a dinâmica da mineralização da MOS, principal fonte de S para as plantas, e da sua interação com a fração inorgânica que determina o S adsorvido no solo (Nor 1981; Ribeiro et al. 2001). A mineralização do S de resíduos culturais depende, dentre outros fatores, da relação C/S do material (Eriksen, 2005). Possivelmente o resíduo da crotalaria apresenta relação C/S bastante inferior ao da palha da cana-de-açúcar. Dessa forma, era esperado aumento no teor de S nos tratamentos com rotação e manutenção ou até mesmo diminuição do teor de S nos tratamentos com manutenção da palha, devido a uma possível imobilização do S inorgânico na decomposição da palha (Eriksen, 2005). No Local 1, a diminuição do teor de S no tratamento com rotação e nos tratamentos com 50 e 100% de palha estão relacionados ao aumento de produtividade observados nestes tratamentos (Tabela 8, Capítulo 1), aumentando a absorção de S para produção de biomassa. Os resultados obtidos no Local 2, onde o tratamento com 50 ou 100% de palha aumentou os teores de S (Tabela 6), embora com diferença significativa só em duas profundidades, indicam maior mineralização do S orgânico proveniente da palha, devido as condições de maior areação do solo relacionada com sua textura.

Considerando as altas quantidades de K presentes na palha da cana-de-açúcar (Fortes et al., 2012; Trivelin et al., 2013) e a rápida liberação do K dos resíduos vegetais (Oliveira, 1999), era esperado aumento nos teores de K do solo com a manutenção contínua da palha sobre o solo. Entretanto, diferente do esperado, em nenhum dos dois locais a manutenção da palha aumentou os teores de K do solo, mesmo após dois anos de manutenção da palha no campo (Tabela 7). No Local 1, a ausência de efeito significativo da palha no aumento do teor de K no solo pode estar relacionado aos teores naturalmente elevados de K naquele solo (Tabela 2) assim como ao aumento de produtividade que causou maior exportação de K pelos colmos nos tratamentos com 50 e 100% de palha (Tabela 8, Capítulo 1). Outro fato a considerar é o consumo de luxo de K pela cana-de-açúcar quando os teores de K encontram-se muito elevados no solo (Leite et al., 2016; Mariano et al., 2016). Entretanto, no Local 2, como não houve aumento de produtividade com a manutenção da palha, o K que foi liberado dos resíduos vegetais pode ter sido perdido por lixiviação, por se tratar de solo com textura arenosa e baixa CTC (Tabela 2), no qual perdas por lixiviação podem variar de 53 a 66 kg ha⁻¹ de K durante um ciclo agrícola de cana-de-açúcar (Ghiberto et al., 2009; Ghiberto et al., 2015). Ausência de efeito da manutenção da palha no teor de K também foi reportado por Menandro (2016), que não observou diferenças significativas no teor de K ao comparar, depois de um ano de ciclo de cana-de-açúcar, tratamento com solo totalmente descoberto e outro com 12 Mg ha⁻¹ de palha em superfície, fato justificado pela reposição anual deste nutriente através da adubação mineral, fazendo com que os níveis se

mantivessem semelhantes no solo. Aquino et al. (2015) também não reportaram diferenças ao comparar o efeito de 0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de palha no solo após 60 dias de incubação.

O efeito da rotação de cultura no aumento do teor de K do solo é variável na literatura. Enquanto Caceres e Alcarde (1995) e Ambrosano et al. (2011) observaram efeito positivo da rotação com crotalária nos teores de K do solo, em outros estudos a rotação com crotalária não aumentou os teores de K (Bokhtiar et al. 2003; Ambrosano et al. 2005; Gama 2007). Em nosso estudo, a rotação com crotalária aumentou o teor de K nos dois locais (Tabela 7). No Local 1, o solo naturalmente apresentava elevados teores de K no perfil do solo (Tabela 2). O crescimento radicular em profundidade da crotalária pode ter favorecido a absorção de K de camadas mais profundas e sua liberação na superfície do solo com a deposição dos resíduos. Adicionalmente, o sistema radicular da crotalária também pode ter aumentando a absorção de K de frações não trocáveis do solo, passando-o para frações trocáveis após liberação do K dos resíduos vegetais. Algumas espécies, como a *Brachiaria*, tem potencial de absorver formas não trocáveis de K do solo (Rosolem et al., 2008), o que também pode ocorrer com outras espécies como a crotalária. No Local 2, aonde perdas de K por lixiviação poder ter sido mais intensas, ácidos orgânicos produzidos durante a decomposição do resíduo da crotalária podem ter contribuído para diminuir perdas de K por lixiviação, conforme demonstrado por Franchini et al. (1999) e Franchini et al. (2003).

Tem-se reportado grandes diferenças nos padrões de decomposição e liberação de nutrientes dos resíduos vegetais quando estes estão dispostos no solo, isoladamente ou misturados com material vegetal de distinta composição bioquímica (Cobo et al. 2002; Partey et al. 2013). O efeito da interação entre os tratamentos de rotação de crotalária e os níveis de manutenção de palha no teor de Mg e no V%, onde o tratamento sem rotação apresentou menores valores das duas variáveis conforme aumentava a quantidade de palha, e um comportamento inverso onde houve aporte do adubo verde, mostra a sinergia apresentada entre os dois tipos de resíduos que favoreceu a decomposição e liberação de nutrientes. Ambrosano et al. (2013) observaram que o plantio de crotalária pode favorecer a decomposição da palha da cana-de-açúcar devido ao aporte de N no sistema solo-planta, o que beneficia a atividade decompositora dos microrganismos. Ambrosano et al. (2011) verificaram que a *Crotalaria juncea* pode promover um aporte de 236 kg de N ha⁻¹, dos quais 69% é proveniente da FBN, e que podem contribuir no aumento da decomposição e mineralização da palha de cana-de-açúcar. No Local 1, o aporte de 194 kg de N ha⁻¹ pode ter promovido um efeito similar.

Partey et al. (2013) observou que a associação de resíduos de alta e baixa qualidade melhorou substancialmente a baixa taxa de liberação de nutrientes apresentada nos resíduos de baixa qualidade (*Z. mays*), possivelmente devido a alterações na abundância e atividade dos microrganismos como resultado da mistura de materiais com composição química e qualidade diferente, o que gera mudanças químicas e físicas no ambiente microbiano. Esta hipótese foi comprovada por outros autores (Cobo et al. 2002; Gartner e Cardon 2004) e ajuda a explicar os resultados obtidos quando houve interação dos resíduos de crotalária e da palha da cana-de-açúcar. De maneira geral, o aumento na V% observada no Local 1 nos tratamentos com 50 e 100% de palha poder estar relacionado à diminuição do H+Al com a manutenção da palha,

evidenciando que a preservação da palha da cana-de-açúcar na superfície do solo irá contribuir para aumentar a participação de cátions não ácidos (Ca, Mg e K) na CTC do solo.

O aumento da CTC no tratamento com rotação no Local 1 (Tabela 9), concorda com obtido por Alcântara et al. (2000) que observaram maior CTC em áreas submetidas à rotação com leguminosas. Em solos tropicais altamente intemperizados, a contribuição da MOS na CTC do solo é bastante importante (Fontes e Alleoni, 2006; Silva e Mendonça 2007). Dessa forma, a tendência de maior C no tratamento com crotalária (Tabela 11) pode explicar o aumento da CTC nos tratamentos com rotação. Giotta et al. (2003) verificaram que aumentos expressivos da CTC podem ser alcançados mesmo com pouco aumento do C, fundamentalmente em solos com predominância de minerais de baixa atividade na fração argila.

3.4.2. Estoques de C e N

A relação C:N das amostras de solo mantiveram-se constantes nas quatro camadas avaliadas (dados não apresentados), fazendo com que os estoques de C e N apresentaram comportamento similar nos dois locais. Comportamentos similares na dinâmica de C e N sob sistemas de cana queimada e cana crua, foram observados por Pinheiro et al. (2010) e Meier e Thorburn (2016).

Em ambos locais a rotação de cultura não promoveu aumento no estoque de C do solo (Tabela 12). Porém, a manutenção de palha aumentou o estoque de C do solo no Local 2, com destaque para o tratamento com 100% de palha (Tabela 12). O estoque de N não foi influenciado nem pela rotação de cultura nem pela manutenção de palha, possivelmente pelo menor estoque de N quando comparado ao de C, limitando a ocorrência de diferenças significativas (Tabela 13). Em solos arenosos, o aumento ou manutenção dos estoques de C está mais relacionado com a adição de material orgânico via resíduos de colheita, enquanto que em solos argilosos, o modo de preparo do solo pode ter mais influência na dinâmica do COS (Chivenge et al. 2007). Assim, a ausência de efeito dos tratamentos nos estoques de C e N do solo no local 1, concorda com o observado por Chivenge et al. (2007), que depois de nove anos de plantio contínuo de milho em um solo argiloso, não obtiveram diferenças no COS ao comparar dois sistemas sem revolvimento do solo, um com retirada da palha do solo e outro com manutenção total.

Adicionalmente, o tempo de duração do experimento é outro fator que explica a ausência de diferenças significativas entre tratamentos no Local 1 (Tabela 12). Avaliando diferentes tempos de manutenção de palha de cana-de-açúcar no solo, Thorburn et al. (2012) observaram mudanças nos teores de C e N somente depois de cinco anos de cultivo, enquanto que Blair et al. (1998) não observaram diferenças no teor de C depois de 12 meses de manutenção da palha no solo. No Local 2, condições mais favoráveis para decomposição dos resíduos da crotalária e palha, possivelmente permitiram contribuição mais rápida de C e N na matéria orgânica particulada (MOP) que favoreceu o aumento do C total do solo. A MOP é a fração que representa a maioria dos resíduos vegetais em um estado de decomposição incipiente (Leifeld e Kögel-Knabner 2005), e que tem se mostrado como a mais responsiva ao manejo de resíduos, especialmente em intervalos curtos de tempo (Thorburn et al. 2012).

No Local 2, o aumento do estoque de C na camada 0-5 cm conforme aumenta a quantidade de palha (Tabela 12), corrobora o obtido por Segnini et al. (2013) que depois de 7 anos de manutenção de palha no solo, só observaram diferenças no estoque de C na camada 0-5 cm ao comparar com o tratamento sem manutenção de resíduo. Aumento no estoque de C nas camadas superficiais devido à adição de palha também já foi relatado por Pinheiro et al. (2010), Luca et al. (2008); Galdos et al. (2009) e Signor et al. (2014). Entretanto, no Local 2 também houve aumento no estoque de C nas camadas de 10-20 e 20-40 cm no tratamento com 100% de palha. Pinheiro et al. (2010) e Tirado-Corbalá et al. (2015) afirmam que o C derivado das raízes é responsável pela grande maioria das entradas de C em profundidade no solo. De fato, esta parece ser a explicação para o aumento do estoque de C observado nas camadas mais profundas de solo do Local 2, que resultou no aumento do estoque de C na camada equivalente de 0-40 cm (Tabela 14), onde houve diferença entre o tratamento com 100% de palha e os demais tratamentos. Aquino et al. (2015) observaram menor massa de raízes até 20 cm de profundidade em tratamentos com manutenção de 0 e 5 Mg ha⁻¹ de palha, em comparação com tratamentos com maior quantidade de palha. Estas observações podem explicar os resultados obtidos no presente estudo, considerando que o 100% de palha no local 2, representou um aporte de resíduos de 8,6 e 9,7 Mg ha⁻¹ na primeira e segunda soqueira respectivamente, quantidade suficiente para promover o aumento da massa de raízes da planta.

Considerando os estoques de C da camada equivalente de 0-40 cm nos dois anos de estudo (Figura 1), no local 2 a manutenção de 100% de palha promoveu acúmulo 1,85 e 2,25 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ superior quando comparado aos tratamentos com 50% de palha e 0% de palha, respectivamente; já a manutenção de 50% de palha resultou em acúmulo de 0.4 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ superior quando comparado ao tratamento com 0% de palha. Realizando os mesmos cálculos para o Local 1, observa-se que, apesar de não haver diferença significativa, a manutenção de 50% de palha resultou em aumento no estoque de C de 3,15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ quando comparado ao tratamento com 0% de palha. Importante ressaltar que no caso do local 1, a manutenção de 50% de palha equivale a 8,3 e 8,1 Mg ha⁻¹ de resíduo na primeira e segunda soqueira, quantidades similares às de 100% de palha do local 2, o que permitiria inferir que uma massa de resíduos aproximada de 8 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no solo, permite aumentar os estoques de C do solo. Carvalho et al. (2016) considera que 7 Mg ha⁻¹ é a quantidade mínima de palha necessária para manter os benefícios da cobertura vegetal no solo, o que de certa forma corrobora os resultados observados na presente pesquisa. Comparando os estoques de C na camada equivalente de 0-40 cm em sistemas de cana com e sem queima, Luca et al. (2008) obtiveram taxas de acúmulo de C de 4,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em um solo argiloso e de 1,6 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em um solo arenoso. Revisando dados da literatura, Cerri et al. (2011) afirmaram que a taxa de acúmulo de C no sistema de cana-crua comparado ao sistema de cana-queimada é de 2,04 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em solos argilosos e de 0,73 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em solos arenosos, na camada equivalente de 0-30 cm. Assim, o aporte contínuo de resíduos, somado a um mínimo revolvimento do solo, constituem estratégias de grande importância para aumento ou manutenção dos estoques de C no solo.

3.5. Conclusões

O efeito da rotação com crotalária e manutenção de palha nos atributos químicos do solo foi muito mais evidente no local 1, com solo argiloso, do que no local 2 que apresenta solo de textura arenosa. Por outro lado, o efeito dos tratamentos no estoque de C do solo só ocorreu no solo arenoso.

A rotação com crotalária aumenta os efeitos da manutenção da palha de cana-de-açúcar na qualidade química do solo, favorecendo os teores de Mg e V%, e reduzindo a acidez potencial do solo.

O plantio de crotalária em rotação aumentou os teores de P, K e CTC do solo

A rotação com crotalária não afetou os estoques de C e N do solo, porém a manutenção de 100% de palha aumentou o estoque de C (0-40 cm) do solo arenoso.

Referencias

- Alcântara, F A, A E F Neto, M B De Paula, H A De Mesquita, and J A Muniz. 2000. Adubação verde na recuperação da fertilidade de um Latossolo Vermelho Escuro degradado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 35: 277–288. doi:10.1590/S0100-204X2000000200006.
- Alves, M. E., and A. Lavoretti. 2004. Sulfate adsorption and its relationships with properties of representative soils of the São Paulo State, Brazil. *Geoderma* 118: 89–99. doi:10.1016/S0016-7061(03)00186-1.
- Ambrosano, EJ, H Cantarella, G M B Ambrosano, E A S, F L F Dias, F Rossi, P C O Trivelin, T Muraoka, R C C Sachs, and R Azcón. 2011. Produtividade da cana-de-açúcar após o cultivo de leguminosas. *Bragantia* 70: 810–818. doi:10.1590/S0006-87052011000400012.
- Ambrosano, EJ, H Cantarella, G M B Ambrosano, F L F Dias, F R, P C O Trivelin, and T Muraoka. 2013. The role of green manure nitrogen use by corn and sugarcane crops in Brazil. *Agricultural Sciences* 4: 89–108. doi:10.4236/as.2013.412A008.
- Ambrosano, EJ, P C O T, H C, G M B Ambrosano, E A Schammas, N Guirado, F Rossi, P C D Mendes, and T Muraoka. 2005. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. *Scientia Agricola* 62: 534–542. doi:10.1590/S0103-90162005000600004.
- Andrade, F. V., E. S. Mendonça, V. H. Alvarez, and R. F. Novais. 2003. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 27: 1003–1011. doi:10.1590/S0100-06832003000600004.
- Andrade, N, M V. Martins Filho, J. L R Torres, G T. Pereira, and J Marques J. 2011. Impacto técnico e econômico das perdas de solo e nutrientes por erosão no cultivo da cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola* 31: 539–550.

- Aquino, G., C. Medina, A. Porteira, L. Oliveira, A. Benitez, D. Kussaba, J. Dos Santos, L. Almeida, and A. Santiago. 2015. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 50: 1150–1159. doi:10.1590/S0100-204X2015001200004.
- Aquino, GS, CDC Medina, OR Brito, and ICB Fonseca. 2015. Changes in soil chemical reactions in response to straw sugar cane and vinasse. *Semina: Ciências Agrárias* 36: 2493–2505. doi:10.5433/1679-0359.2015v36n4p2493.
- Blair, G.J., L. Chapman, A.M. Whitbread, B. Ball-Coelho, P. Larsen, and H. Tiessen. 1998. Soil carbon changes resulting from sugarcane trash management at two locations in Queensland, Australia, and in North-East Brazil. *Australian Journal of Soil Research* 36: 873–881.
- Bokhtiar, S. M., M. a. Gafur, and a. B. M. M. Rahman. 2003. Effects of Crotalaria and Sesbania aculeata green manures and N fertilizer on soil fertility and the productivity of sugarcane. *The Journal of Agricultural Science* 140: 305–309. doi:10.1017/S0021859603003022.
- Bolan, N S, and J K Syers. 1988. Effect of liming and phosphate additions on sulphate leaching in soils: 493–504.
- Caceres, N T, and J C Alcarde. 1995. Adubação Verde com Leguminosas em Rotação com Cana-de-Açúcar (Saccharum spp). *Revista STAB* 13: 16–20.
- Calegari, A, A Mondardo, E.A. Bulisani, L Wildner, MBB Costa, PB Alcântara, S Miyasaka, and JT Amado. 1993. *Adubação verde no sul do Brasil*. 2nded. Rio de Janeiro: AS - PTA.
- Carvalho, J L N. 2006. Conversão do Cerrado para fins agrícolas na Amazônia e seus impactos no solo e no ambiente. *Esalq/Usf*.
- Carvalho, J L N, R C N, L M S Menandro, R O Bordonal, D C Borges, H Cantarella, and H Coutinho J Franco. 2016. Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: a major review. *GCB Bioenergy*: 1–16. doi:10.1111/gcbb.12410.
- Cerri, C. C, M. V. Galdos, S. M F Maia, M. Bernoux, B. J. Feigl, D. Powlson, and C. E P Cerri. 2011. Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: An examination of existing data. *European Journal of Soil Science* 62: 23–28. doi:10.1111/j.1365-2389.2010.01315.x.
- Cerri, C E P, M V Galdos, J L N Carvalho, B J Feigl, and C Cerri. 2013. Quantifying soil carbon stocks and greenhouse gas fluxes in the sugarcane agrosystem: point of view: 361–368.
- Cherubin, M R, M T Eitelwein, C Fabbris, S W Weirich, R F Da Silva, V R Da Silva, and C J Basso. 2015. Physical, chemical, and biological quality in an oxisol under different tillage and fertilizer sources. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 39: 615–625. doi:10.1590/01000683rbcs20140462.
- Chivenge, P P, H K Murwira, K E Giller, P Mapfumo, and J Six. 2007. Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: Implications for conservation agriculture on contrasting soils 94: 328–337. doi:10.1016/j.still.2006.08.006.

- Ciotta, M N, C Bayer, S Mara, V Fontoura, P R Ernani, and J A Albuquerque. 2003. Soil organic matter and cation exchange capacity increase in a low activity clay soil under no-tillage system. *Ciência Rural* 33:336: 1161–1164. doi:10.1590/S0103-84782003000600026.
- Clapp, C. E., R. R. Allmaras, M. F. Layese, D.R. Linden, and R. H. Dowdy. 2000. Soil organic carbon and ¹³C abundance as related to tillage, crop residue, and nitrogen fertilization under continuous corn management in Minnesota. *Soil and Tillage Research* 55: 127–142. doi:10.1016/j.still.2005.07.015.
- Cobo, J. G., E. Barrios, D. C L Kass, and R. J. Thomas. 2002. Decomposition and nutrient release by green manures in a tropical hillside agroecosystem. *Plant and Soil* 240: 331–342. doi:10.1023/A:1015720324392.
- Cowie, A L., P Smith, and D Johnson. 2006. Does soil carbon loss in biomass production systems negate the greenhouse benefits of bioenergy? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 979–1002. doi:10.1007/s11027-006-9030-0.
- Dias, MOS, T L. Junqueira, O Cavalett, M P. Cunha, C D F Jesus, C E V Rossell, R M Filho, and Antonio Bonomi. 2012. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. *Bioresource Technology* 103: 152–161. doi:10.1016/j.biortech.2011.09.120.
- Dias, MOS, M P. Cunha, C D F Jesus, G J M Rocha, J G C Pradella, C E V Rossell, R Maciel Filho, and A Bonomi. 2011. Second generation ethanol in Brazil: Can it compete with electricity production? *Bioresource Technology* 102: 8964–8971. doi:10.1016/j.biortech.2011.06.098.
- Dourado-Neto, D., D. Powelson, R. Abu Bakar, O. O. S. Bacchi, M.V. Basanta, P. Thi Cong, G. Keerthisinghe, et al. 2010. Multiseason Recoveries of Organic and Inorganic Nitrogen-15 in Tropical Cropping Systems. *Soil Science Society of America Journal* 74: 139. doi:10.2136/sssaj2009.0192.
- Ellertl, B H, and J R Bettany. 1995. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes.
- Eriksen, J. 2005. Gross sulphur mineralisation-immobilisation turnover in soil amended with plant residues. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 2216–2224. doi:10.1016/j.soilbio.2005.04.003.
- Figueiredo, E B., A R. Panosso, D C. Reicosky, and N La Scala. 2015. Short-term CO₂-C emissions from soil prior to sugarcane (*Saccharum* spp.) replanting in southern Brazil. *GCB Bioenergy* 7: 316–327. doi:10.1111/gcbb.12151.
- Fontes, M P F, and L R F Alleoni. 2006. Electrochemical attributes and availability of nutrients, toxic elements, and heavy metals in tropical soils. *Scientia Agricola*: 589–608. doi:10.1590/S0103-90162006000600014.
- Fortes, C, P C O Trivelin, and A C Vitti. 2012. Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. *Biomass and Bioenergy* 42: 189–198. doi:10.1016/j.biombioe.2012.03.011.
- Franchini, J C, C B Hoffmann-Campo, E Torres, M Miyazawa, and M a Pavan. 2003. Organic composition of green manure during growth and its effect on cation mobilization in an acid oxisol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34: 2045–2058. doi:Doi 10.1081/Css-120023237.
- Franchini, J C, M Miyazawa, M A Pavan, and E Malavolta. 1999. Dynamic of Ions in Acid Soil Leached With Green Manure Residues: 2267–2276.

- Galdos, M V, C C Cerri, and C E P Cerri. 2009. Geoderma Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil 153: 347–352. doi:10.1016/j.geoderma.2009.08.025.
- Gama, A J M. 2007. Sistema De Rotação E Adubação Fosfatada Na Cultura Da Cana-De-Açúcar no Cerrado. Universidade Federal de Ubêrlândia.
- Gartner, T B, and Z G Cardon. 2004. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter 2: 230–246.
- Gava, G J de C, P C O Trivelin, A C V, and M W De Oliveira. 2005. Urea and sugarcane straw nitrogen balance in a soil-sugarcane crop system. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 40: 689–695. doi:10.1590/S0100-204X2005000700010.
- Ghiberto, P. J., P. L. Libardi, A. S. Brito, and P. C O Trivelin. 2009. Leaching of nutrients from a sugarcane crop growing on an Ultisol in Brazil. *Agricultural Water Management* 96: 1443–1448. doi:10.1016/j.agwat.2009.04.020.
- Ghiberto, P. J., P. L. Libardi, and P. C O Trivelin. 2015. Nutrient leaching in an Ultisol cultivated with sugarcane. *Agricultural Water Management* 148. Elsevier B.V.: 141–149. doi:10.1016/j.agwat.2014.09.027.
- Hassuani, S, MRLV Leal, and IC Macedo. 2005. *Biomass Power Generation, Sugarcane Bagasse and Trash*. Edited by Suleiman José Hassuani, Manoel Regis Lima Verde Leal, and Isaías de Carvalho Macedo. *Biomass power generation: Sugar cane bagasse and trash*. Piracicaba, SP, Brasil: PNUD, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento CTC, Centro de Tecnologia Canavieira. doi:10.1016/S0378-3820(97)00058-1.
- Haynes, R. J., and M. S. Mokolobate. 2001. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: A critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 59: 47–63. doi:10.1023/A:1009823600950.
- Hinsinger, P. 2001. Bioavailability os soil inorganic P in the rhizosphere as effected by root-induced chemical changes. A review. *Plant and Soil* 237: 173–195. doi:10.1023/A:1013351617532.
- Izidorio, R, M V. Martins Filho, J Marques Júnior, Z M. de Souza, and G T. Pereira. 2005. Perdas de nutrientes por erosão e sua distribuição espacial em área sob cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola* 25: 660–670.
- Janzen, H H, J B Bole, V O Biederbeck, and A E Slinkard. 1990. Fate of N applied as green manure or ammonium fertilizer to soil subsequently cropped with spring wheat at three sites in western Canada. *Canadian Journal of Soil Science* 70: 313–323. doi:10.4141/cjss90-032.
- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris, and G.E. Schuman. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61: 4–10. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x.
- Lal, R. 2008. Crop residues as soil amendments and feedstock for bioethanol production. *Waste Management* 28: 747–758. doi:10.1016/j.wasman.2007.09.023.
- Leal, M R L V, M V. Galdos, F V. Scarpere, J E A Seabra, A Walter, and C O F Oliveira. 2013. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. *Biomass and Bioenergy* 53: 11–19. doi:10.1016/j.biombioe.2013.03.007.

- Leifeld, J, and I Kögel-Knabner. 2005. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? *Geoderma* 124: 143–155. doi:10.1016/j.geoderma.2004.04.009.
- Leite, J M, I A Ciampitti, E Mariano, M X Vieira-Megda, and P C O Trivelin. 2016. Nutrient Partitioning and Stoichiometry in Unburnt Sugarcane Ratoon at Varying Yield Levels. *Frontiers in Plant Science* 7: 466. doi:10.3389/fpls.2016.00466.
- Leme F, J R Almeida. 2009. Desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp .) sob diferentes formas de colheita e de manejo do palhço.
- Liska, A J, H Yang, M M, S G, H Blanco-Canqui, M P Pelton, X X Fang, H Zhu, and A E Suyker. 2014. Biofuels from crop residue can reduce soil carbon and increase CO₂ emissions. *Nature Climate Change* 4: 398–401. doi:10.1038/NCLIMATE2187.
- Luca, E F De, C Feller, C Clemente, B Barthès, V Chaplot, and D Correa. 2008. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 32: 789–800.
- Malvestiti, J. 2014. Extratos vegetais de cana crua e atenuação da toxidez por alumínio no crescimento inicial de cana-de-açúcar. Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências agrárias.
- Mariano, E, J M. Leite, M X. Vieira-Megda, I A. Ciampitti, A C. Vitti, C E. Faroni, H C J Franco, and P C O Trivelin. 2016. Biomass and nutrient content by sugarcane as affected by fertilizer nitrogen sources. *Crop Science* 56: 1234–1244. doi:10.2135/cropsci2015.06.0349.
- Martins Filho, M V., T T. Liccioti, G T. Pereira, J Marques Júnior, and R B. Sanchez. 2009. Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola* 29: 8–18. doi:10.1590/S0100-69162009000100002.
- Meier, Elizabeth A., and Peter J. Thorburn. 2016. Long term sugarcane crop residue retention offers limited potential to reduce nitrogen fertilizer rates in Australian wet tropical environments. *Frontiers in Plant Science* 7: 1–14. doi:10.3389/fpls.2016.01017.
- Menandro, L M S. 2016. Caracterização e aproveitamento agrônômico e industrial de ponteiros e folhas secas da cana-de-açúcar. Intituto Agrônômico. doi:10.13140/RG.2.1.1452.5046.
- Miyazawa, M, M A Pavan, and J C Franchini. 2000. Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais. *Informações Agronômicas*: 8.
- Motavalli, P. P., J. M. Duxbury, and D. M G de Souza. 1993. The influence of organic soil amendments on sulfate adsorption and sulfur availability in a Brazilian Oxisol. *Plant and Soil* 154: 301–308. doi:10.1007/BF00012535.
- Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In *Methods of soil analysis*, ed. D. .. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, and E. Summer, C, 961–1010. Madison: Soil Science Society of America.
- Nor, Y M. 1981. Sulphur mineralization and adsorption in soils. *Plant and Soil*: 451–459.
- Nziguheba, G, C A . Palm, R J Buresh, and Paul C. 1998. Soil phosphorus fractions and adsorption as affected by organic and inorganic sources. *Plant and Soil* 198: 159–168.

- Palm, C A, C N Gachengo, R J Delve, G Cadisch, and K E Giller. 2001. Organic inputs for soil fertility management in tropical agro ecosystems: application of an organic resource database. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83: 27–42.
- Partey, S T., R F. Preziosi, and G D. Robson. 2013. Maize Residue Interaction with High Quality Organic Materials: Effects on Decomposition and Nutrient Release Dynamics. *Agricultural Research* 2: 58–67. doi:10.1007/s40003-013-0051-0.
- Pavinato, P S, and C. A. Rosolem. 2008. Disponibilidade de nutrientes no solo - Decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 1: 911–920.
- Pinheiro, É F M, E Lima, M B Ceddia, S U, B J R Alves, and R M. Boddey. 2010. Impact of pre-harvest burning versus trash conservation on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region. *Plant and Soil* 333: 71–80. doi:10.1007/s11104-010-0320-7.
- Raij, B van, J C Andrade, H Cantarella, and J A Quaggio, ed. 2001. *Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais*. 1sted. Campinas - SP: Instituto Agrônômico.
- Ribeiro, E.S., L.E. Dias, V.H. Alvarez. V., J.W.V. Mello, and W.L. Daniels. 2001. Dynamics of Sulfur Fractions in Brazilian Soils Submitted to Consecutive Harvests of Sorghum. *Soil Science Society of America Journal* 65: 787. doi:10.2136/sssaj2001.653787x.
- Rosolem, C. A., and J. C. Calonego. 2013. Phosphorus and potassium budget in the soil-plant system in crop rotations under no-till. *Soil and Tillage Research* 126. Elsevier B.V.: 127–133. doi:10.1016/j.still.2012.08.003.
- Schaefer, C E, D D Silva, K W N Paiva, F F Pruski, M R Albuquerque Filho, and M A Albuquerque. 2002. Perdas de solo, nutrientes, materia organica e efeitos microestruturais em Argissolo Vermelho-Amarelo sob chuva simulada. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 37: 669–678. doi:10.1590/S0100-204X2002000500012.
- Segnini, A, J L N Carvalho, D Bolonhezi, D M B P Milori, W T L da Silva, M L Simoes, H Cantarella, I C de Maria, and L Martin-Neto. 2013. Carbon stock and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. *Scientia Agricola* 70: 321–326. doi:10.1590/S0103-90162013000500006.
- Sheehan, J., A. Aden, K. Paustian, J. Brenner, M. Walsh, and R. Nelson. 2004. Energy and Environmental Aspects of Using Corn Stover for Fuel Ethanol. *Journal of Industrial Ecology* 7: 117–146. doi:10.1162/108819803323059433.
- Signor, D, C F Zani, A A Paladini, M D Deon, and C E P Cerri. 2014. Estoques de carbono e qualidade da matéria orgânica do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo* 38: 1402–1410.
- Silva, I R, and E de S Mendonça. 2007. Matéria orgânica do solo. In *Fertilidade do solo*, ed. R. F. Novais, V. H. Alvarez. V., N. Barros, R. L. .. Fontes, R. B. Cantarutti, and J. C. L. Neves, 1sted., 275–374. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Sousa, D.M.G, L.N. Miranda, and S.A. Oliveira. 2007. Acidez do solo e sua correção. In *Fertilidade do solo*, ed. R. F. Novais, V. H. Alvarez. V., N. F. Barros, R. L. Fontes, R. .. Cantarutti, and J. C. .. Neves, 1sted., 205–274. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

- Sousa, G, M V. M Filho, and S Matias. 2012. Perdas de solo, matéria orgânica e nutrientes por erosão hídrica em uma vertente coberta com diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar em Guariba-SP. *Engenharia Agrícola*. 620–627.
- Thierfelder, C, and P.C. Wall. 2010. Rotation in Conservation Agriculture Systems of Zambia: Effects on Soil Quality and Water Relations. *Experimental Agriculture* 46: 309–325. doi:10.1017/S001447971000030X.
- Thorburn, P. J., E. A. Meier, K. Collins, and F. A. Robertson. 2012. Changes in soil carbon sequestration, fractionation and soil fertility in response to sugarcane residue retention are site-specific. *Soil and Tillage Research* 120: 99–111. doi:10.1016/j.still.2011.11.009.
- Tirado-Corbalá, R, R Anderson, D Wang, and J Ayars. 2015. Soil Carbon and Nitrogen Stocks of Different Hawaiian Sugarcane Cultivars. *Agronomy* 5: 239–261. doi:10.3390/agronomy5020239.
- Trivelin, P C O, H C J Franco, R Otto, D a Ferreira, a C Vitti, C Fortes, C E Faroni, E C a Oliveira, and H Cantarella. 2013. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. *Scientia Agrícola* 70: 345–352. doi:10.1590/S0103-90162013000500009.
- Turmel, M S, A Speratti, F Baudron, N Verhulst, and B Govaerts. 2014. Crop residue management and soil health: A systems analysis. *Agricultural Systems* 134. Elsevier Ltd: 6–16. doi:10.1016/j.agsy.2014.05.009.
- Ullah, K, V K Sharma, S Dhingra, G Braccio, M Ahmad, and S Sofia. 2015. Assessing the lignocellulosic biomass resources potential in developing countries: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51: 682–698. doi:10.1016/j.rser.2015.06.044.
- Verhulst, N, B Govaerts, E Verachtert, A Castellanos-Navarrete, M Mezzalama, P Wall, J Deckers, and K D Sayre. 2010. Conservation Agriculture, Improving Soil Quality for Sustainable Production Systems? *Advances in Soil Science: Food Security and Soil Quality*.: 137–208.
- Wilhelm, W. W., J. M. F Johnson, J. L Hatfield, W.B. Voorhes, and D. R. Linden. 2004. Crop and soil productivity response to corn residue removal: a literature review. *Agron. J.* 96: 1–17. doi:10.2134/agronj2004.0001.

ANEXOS

ANEXO A. Valores de pH em CaCl_2 no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha (%)	Rotação com crotalária					
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
%	pH (CaCl_2)					
	Local 1			Local 2		
	0-5 cm			0-5 cm		
0	5,1	5,3	5,2	6,0	5,7	5,7
50	5,0	5,5	5,2	5,9	5,8	5,8
100	5,4	5,1	5,2	5,9	5,6	5,8
Média	5,1	5,3		5,9	5,6	
	5-10 cm			5-10 cm		
0	4,9	5,2	5,0	5,6	5,5	5,3
50	4,9	5,4	5,2	5,7	5,5	5,6
100	5,5	5,0	5,2	5,4	5,4	5,5
Média	5,1	5,2		5,6	5,4	
	10-20 cm			10-20 cm		
0	5,2	5,2	5,2	5,0	5,3	5,1
50	5,5	5,4	5,4	4,8	5,1	5,1
100	5,3	5,1	5,2	5,3	5,2	5,2
Média	5,3	5,2		5,0	5,2	
	20-40 cm			20-40 cm		
0	5,4	5,4	5,4	4,3	4,6	4,4
50	5,6	5,4	5,5	4,3	4,4	4,4
100	5,5	5,3	5,4	4,6	4,5	4,5
Média	5,5	5,4		4,4	4,5	
	Média			Média		
0	5,1	5,3	5,2	5,2	5,3	5,1
50	5,2	5,4	5,3	5,2	5,2	5,2
100	5,4	5,1	5,3	5,3	5,2	5,3
Média	5,3	5,3		5,2		
P _{rotação}		0,889			0,751	
P _{palha}		0,456			0,762	
P _{rotação*palha}		0,137			0,515	
P _{profundidade}		<0,001			<0,001	
P _{profundidade*rotação}		0,199			0,199	
P _{profundidade*palha}		0,355			0,355	

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$), ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

ANEXO B. Valores de Al^{+3} no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha	Rotação com crotalária					
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
%	$\text{Al}^{+3} \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$					
	Local 1			Local 2		
	0-5 cm			0-5 cm		
0	1,8	0,6	1,2	0,1	0,4	0,2
50	2,1	0,4	1,3	0,5	0,2	0,4
100	0,3	1,4	0,8	0,1	0,3	0,2
Média	1,4	0,8		0,2	0,3	
	5-10 cm			5-10 cm		
0	3,3	2,1	2,7	0,3	0,5	0,4
50	1,5	0,5	1,0	0,6	0,4	0,5
100	0,4	1,7	1,1	0,8	0,2	0,5
Média	1,7	1,4		0,6	0,4	
	10-20 cm			10-20 cm		
0	0,7	0,7	0,7	1,3	0,8	1,0
50	0,4	0,7	0,5	2,0	0,9	1,4
100	0,5	0,9	0,7	0,7	0,7	0,7
Média	0,5	0,8		1,3	0,8	
	20-40 cm			20-40 cm		
0	0,4	0,3	0,3	5,3	4,9	5,1
50	0,4	0,4	0,4	5,9	2,5	4,2
100	0,4	0,4	0,4	3,1	4,2	3,6
Média	0,4	0,3		4,8	3,8	
	Média			Média		
0	1,6	0,9	1,2	1,7	1,6	1,7
50	1,1	0,5	0,8	2,2	1,0	1,6
100	0,4	1,1	0,7	1,2	1,3	1,2
Média	1,0	0,8		1,7	1,3	
P _{rotação}		0,638			0,327	
P _{palha}		0,509			0,623	
P _{rotação*palha}		0,285			0,309	
P _{profundidade}		0,0018			<0,001	
P _{profundidade*rotação}		0,095			0,640	
P _{profundidade*palha}		0,512			0,146	

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$), ns= ausência de efeito de ambos os fatores.

ANEXO C. Valores de Ca no solo dos locais 1 e 2 submetidos a manejos de rotação de cultura e níveis de palha

Níveis de palha	Rotação com crotalária					
	Com	Sem	Média	Com	Sem	Média
%	Ca mmol _c dm ⁻³					
	Local 1			Local 2		
	0-5 cm			0-5 cm		
0	36,8	43,1	40,0	20,9	14,6	17,8
50	31,0	48,3	39,7	32,1	17,6	24,9
100	55,5	33,0	44,2	25,8	21,2	23,5
Média	41,1	41,5		26,3	17,8	
	5-10 cm			5-10 cm		
0	27,9	36,8	32,4	14,3	8,5	11,4
50	30,5	40,6	35,5	21,6	19,1	20,3
100	47,5	29,7	38,6	12,4	10,3	11,3
Média	35,3	35,7		16,1	12,7	
	10-20 cm			10-20 cm		
0	35,1	31,0	33,1	8,3	11,6	9,9
50	42,3	39,0	40,6	6,7	15,5	11,1
100	40,3	28,3	34,3	13,2	5,7	9,4
Média	39,2	32,8		9,4	10,9	
	20-40 cm			20-40 cm		
0	29,1	29,4	29,2	14,3	8,5	11,4
50	35,1	31,0	33,1	21,6	19,1	20,3
100	29,7	26,6	28,1	12,4	10,4	11,4
Média	31,3	29,0		16,1	12,7	
	Média			Média		
0	32,2	35,1	33,7	14,4	10,8	12,6
50	34,7	39,7	37,2	20,5	17,8	19,2
100	43,2	29,4	36,3	15,9	11,9	13,9
Média	36,7	34,7		16,9	13,5	
P _{rotação}		0,625			0,506	
P _{palha}		0,754			0,511	
P _{rotação*palha}		0,147			0,891	
P _{profundidade}		<0,001			<0,001	
P _{profundidade*rotação}		0,400			0,337	
P _{profundidade*palha}		0,646			0,812	

¹Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os níveis de palha e minúscula entre os manejos de rotação, para cada local, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,1$). ns= ausência de efeito de ambos os fatores.