

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**GESSO AGRÍCOLA NA CANA-DE-AÇÚCAR: PRODUTIVIDADE,  
DESENVOLVIMENTO RADICULAR E ESTOQUE DE CARBONO  
NO SOLO**

**LARISSA GOMES ARAÚJO**

**TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA**

**BRASÍLIA/DF**  
**DEZEMBRO/2018**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**GESSO AGRÍCOLA NA CANA-DE-AÇÚCAR: PRODUTIVIDADE,  
DESENVOLVIMENTO RADICULAR E ESTOQUE DE CARBONO  
NO SOLO**

**LARISSA GOMES ARAÚJO**

**ORIENTADOR: DR. CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO**

**TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA**

**PUBLICAÇÃO: TESE/2018**

**BRASÍLIA/DF**  
**DEZEMBRO/2018**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**GESSO AGRÍCOLA NA CANA-DE-AÇÚCAR: PRODUTIVIDADE,  
DESENVOLVIMENTO RADICULAR E ESTOQUE DE CARBONO  
NO SOLO**

**LARISSA GOMES ARAÚJO**

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM AGRONOMIA**

**Aprovada por:**

---

**CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO (Orientador)**

Professor Doutor (FAV - Universidade de Brasília) email: cicerocef@unb.br

---

**ALCIDES GATTO**

Professor Doutor (FT - Universidade de Brasília) email: alcidesgatto@unb.br

---

**THOMAZ ADOLPHO REIN**

Pesquisador Doutor (Embrapa Cerrados) email: thomaz.rein@embrapa.br

---

**ROBÉLIO LEANDRO MARCHÃO**

Pesquisador Doutor (Embrapa Cerrados) email: robelio.marchao@embrapa.br

**Brasília/DF, 14 de dezembro de 2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

ARAÚJO, Larissa Gomes

“GESSO AGRÍCOLA NA CANA-DE-AÇÚCAR: PRODUTIVIDADE, DESENVOLVIMENTO RADICULAR E ESTOQUE DE CARBONO NO SOLO”

Orientação: Cícero Célio de Figueiredo, Brasília, 2018. 108 páginas

Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de Brasília / Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2018.

1. Matéria orgânica do solo 2. Carbono particulado 3. Veranicos 4. Fixação de carbono

I. Figueiredo, C.C.de. II. Drº.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, L.G. Gesso agrícola na cana-de-açúcar: produtividade, desenvolvimento radicular e estoque de carbono no solo: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2018, 108 páginas. (Tese de Doutorado em Agronomia).

## CESSÃO DE DIREITOS

**Nome do Autor:** LARISSA GOMES ARAÚJO

**Título da Tese de Doutorado:** Gesso agrícola na cana-de-açúcar: produtividade, desenvolvimento radicular e estoque de carbono no solo

**Grau:** Doutora      **Ano:** 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais de publicação. Nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

---

LARISSA GOMES ARAÚJO

(61) 99997-6298 / email: lga.agro@gmail.com

**OFEREÇO,**

*Ao Criador, pelo dom da vida.*

**DEDICO,**

*À minha família.*

*Especialmente, aos meus pais:*

*José Araújo e Anely Araújo, por toda a dedicação e amor.*

## AGRADECIMENTOS

*Agradeço a Deus, por me conceder a oportunidade de viver e sentir as maravilhas do universo.*

*À toda minha família, em especial aos meus pais: José Araújo e Anely Araújo, aos meus irmãos: Marcos Araújo e Giselly Araújo e ao meu sobrinho: Marcus Henrique, por todo o amor envolvido.*

*Ao meu esposo, Nédio Rodrigo Tormen, obrigada por toda a compreensão e incentivo durante essa caminhada.*

*Ao meu orientador, Dr. Cícero Célio de Figueiredo, por acreditar em minha capacidade de tornar esse trabalho possível e me auxiliar em todos os momentos desde a graduação, sempre mostrado o caminho certo a ser seguido. Te agradeço imensamente por todo o seu tempo de dedicação aos estudantes e ao ensino.*

*Ao meu co-orientador, Pesquisador Djalma Martinhão Gomes de Sousa, obrigada por ensinar e amar a ciência e muito mais que isso, por nos transmitir todo esse conhecimento e dedicação. Levarei para sempre todos os ensinamentos de vida que me apresentou.*

*À Universidade de Brasília e aos professores da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, coordenadores e funcionários por toda a dedicação ao curso de Agronomia.*

*À equipe e amigos do laboratório de Matéria Orgânica do solo, especialmente à Thaís Coser, Juliana Sato, Priscila Reis e Helen Neves.*

*À toda a equipe da Embrapa Cerrados pela estrutura e oportunidade para a realização desse trabalho.*

*Aos pesquisadores da Embrapa Cerrados: Dr. Rafael de Sousa Nunes, Dr. Thomaz Rein, Dr. João de Deus pelas sugestões e contribuições e por estarem sempre dispostos a ajudar.*

*Ao estatístico da Embrapa Cerrados, Juaci Malaquias pela grande contribuição nas análises estatísticas.*

*À equipe de campo e em especial ao técnico agrícola Valmir Vieira de Sousa e aos operários de campo, Denis José, José Francisco, Edson Marques, José Ailson e Cláudio Rodrigues por todo o cuidado na condução dos experimentos e por tornar possível as trabalhosas amostragens.*

*À equipe de laboratórios da Embrapa Cerrados, em especial a Vanessa Pieniz, Fernanda Andrade, Daniella Araújo, Diana Zuim, Josias Matos, Francisco Délvico, Suelen Dessaune, Francisco Bastos pela dedicação e ajuda nas numerosas análises realizadas e pela amizade.*

*Aos estagiários e amigos da Embrapa Cerrados, especialmente à Natalie Milena, Géssica Souza, Scarlett Martinez, Luiz Zancanaro, André Lopes e Caroline Jerke por toda ajuda e amizade construída.*

*Aos membros da banca examinadora, Dr. Alcides Gatto, Dr. Thomaz Rein e Dr. Robélio Marchão, pela disponibilidade e contribuições para esse trabalho.*

*À Capes, pela concessão da bolsa de estudos.*

*Por fim, muito obrigada a todos que contribuíram para a elaboração deste trabalho.*

## RESUMO

A área de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil está concentrada na região do Cerrado, onde é frequente a ocorrência de déficit hídrico e solos com baixos teores de cálcio e toxidez por alumínio nas camadas subsuperfícies, prejudicando o desenvolvimento do sistema radicular e reduzindo o potencial produtivo da cana-de-açúcar. Assim, o uso do gesso agrícola pode ser uma alternativa viável para a correção das propriedades químicas do solo que limitam o desenvolvimento do sistema radicular nas camadas de subsuperfície. Além disso, o favorecimento do maior crescimento das raízes pode promover o acúmulo de carbono (C) no solo, pois as raízes exercem papel fundamental na fixação desse elemento. O presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de compreender o efeito do gesso na distribuição espacial de raízes e no acúmulo de C do solo, associados às alterações nas propriedades químicas em solo cultivado com cana-de-açúcar no Cerrado. Inicialmente foi estudado o efeito residual do gesso no condicionamento do subsolo, nutrição e produtividade da cana-de-açúcar, posteriormente avaliou-se a influência do gesso na distribuição espacial das raízes e propriedades químicas do solo e por fim foi quantificado o acúmulo de C no solo devido a aplicação do gesso. O experimento foi conduzido em área experimental localizada na Embrapa Cerrados, em Planaltina-DF. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, com quatro repetições, sendo os tratamentos compostos por doses de gesso (0; 0,5; 5 e 10 t ha<sup>-1</sup>), que foram aplicadas na superfície do solo em julho de 2009, logo após o plantio da cana-de-açúcar. Após 13 e 87 meses da aplicação dos tratamentos efetuou-se a coleta das amostras de solo em camadas até 120 e 200 cm de profundidade, respectivamente, para a avaliação dos seguintes atributos químicos: sulfato (S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), cálcio (Ca<sup>2+</sup>), magnésio (Mg<sup>2+</sup>) e saturação por alumínio (m). Também foi avaliada a densidade de massa seca de raízes após o primeiro e sétimo corte. Na segunda coleta do solo, aos 87 meses da aplicação do gesso, foram estimados os estoques de C como ácido fúlvico livre (CAFL), C particulado (CP) e C total (CT). Ainda nessa coleta também foram determinados os atributos radiculares: densidade de comprimento, diâmetro e conteúdo de fibras radiculares. Nos sete cortes da cana-de-açúcar foram avaliados os teores foliares de macronutrientes (N, P, K, S, Ca e Mg), produtividade de colmos e açúcares redutores. A aplicação de 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso incrementou os teores de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup> e reduziu a saturação por alumínio após 13 e 87 meses, com maiores intensidades nas camadas subsuperficiais do solo. Considerando as produtividades de colmos acumuladas,

as doses de gesso de 0,5, 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> promoveram incrementos de 9, 22 e 20%, respectivamente, em relação a não aplicação deste insumo. Como consequência da melhoria nas propriedades químicas do solo devido a utilização da dose recomendada de gesso (5 t ha<sup>-1</sup>) houve maior crescimento das raízes, favorecendo a melhor nutrição da cana-de-açúcar. Foi verificado também um longo efeito residual do gesso, possibilitando o incremento da produtividade da cana-de-açúcar durante os cultivos avaliados. Além disso, o uso da dose recomendada de gesso proporcionou maior densidade de comprimento e menor diâmetro radicular e conteúdo de fibras. O Ca<sup>2+</sup> e o S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> foram as principais propriedades associadas ao maior desenvolvimento das raízes ao longo da linha e na entrelinha de plantio, assim como em profundidade. Associado a essas melhorias após 87 meses da sua aplicação, o gesso se configurou como uma excelente tecnologia para acúmulo de C no solo, atendendo, assim, aos preceitos de uma agricultura de baixa emissão de carbono. Os ganhos nos estoques de CT, CP e CAFL promovidos pelo gesso foram de 12,3, 2,8 e 2,2 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, na camada de 0-200 cm, com os maiores incrementos obtidos na camada de 40-200 cm.

**Palavras-chave:** *Saccharum* spp, fixação de carbono, déficit hídrico, comprimento radicular, perfil do solo.

## ABSTRACT

The sugarcane expansion area in Brazil is concentrated in the Cerrado region, where the occurrence of water deficit, soils with low levels of calcium and aluminum toxicity in the subsurface layers impairs the development of the root system reducing the yield potential of sugarcane. Therefore, the use of gypsum can be a viable alternative for correcting soil chemical properties that limit the development of root system in the subsurface layers and compromise crop yield. In addition, root growth may promote the accumulation of carbon in soil, as the roots play a key role in carbon sequestration. The objective of this study was to understand the effect of gypsum on the spatial distribution of roots and soil carbon accumulation, associated to changes in chemical properties promoted by gypsum in a Cerrado soil cultivated with sugarcane. This thesis is comprised by three chapters: in the first one it was studied the residual effect of gypsum on the subsoil conditioning, nutrition and productivity of sugarcane; in the second, it was evaluated the influence of gypsum on the spatial distribution of roots and soil chemical properties; and in the third it was quantified accumulation carbon due to the gypsum application. The experiment was carried out in the experimental field of Embrapa Cerrados, in Planaltina, DF, Brazil. The experimental design consisted of four gypsum doses (0, 0.5, 5 and 10 t ha<sup>-1</sup>) distributed in randomized blocks with four replications. Gypsum was applied once to the soil surface after sugarcane planting in July 2009. The soil was collected from layers up to 120 and 200 cm deep, after 13 and 87 months of gypsum application, respectively for evaluation of soil chemical attributes: sulfate (S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), calcium (Ca<sup>2+</sup>), magnesium (Mg<sup>2+</sup>) and aluminum saturation (m). Also, the root dry mass density was evaluated after the first and seventh sugarcane harvest. In the second soil sampling, after 87 months of gypsum application, carbon stocks of free fulvic acid (FFAC), particulate carbon (PC) and total carbon (TC) were determined. Root attributes length density, diameter and root fiber content were also determined. The variables leaf macronutrient concentrations (N, P, K, S, Ca and Mg), stalk yield and total reducing sugars were determined for the seven crops. The application of 5 t ha<sup>-1</sup> of gypsum increased the SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup> and reduced the aluminum saturation after 13 and 87 months, which were more pronounced in the deeper soil layers. Root growth was higher where the recommended dose of gypsum (5 t ha<sup>-1</sup>) was applied, as a result of better chemical properties in the soil and nutrition of sugarcane. A long residual effect of gypsum was verified, allowing increase of sugarcane yield during seven years. In addition, use of gypsum provided higher root length density and smaller root

diameter and fiber content. The  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{S-SO}_4^{2-}$  contents were the main variables associated the greatest development of roots near the crop row and in the interrow, as well as in the deeper soil layers. Associated with these improvements, after 87 months of application, gypsum has been shown as an excellent technology for the accumulation of carbon in the soil, thus meeting the precepts of low carbon agriculture. The increases in TC, PC and FFAC promoted by gypsum were 12.3, 2.8 and 2.2 t ha<sup>-1</sup>, respectively, in the 0-200 cm layer, with the largest increments obtained in the 40-200 cm depth.

**Keywords:** *Saccharum* spp, carbon fixation, water deficit, root length, soil profile.

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO I

- Figura 5-1: Precipitações pluviométricas acumuladas e irrigações suplementares ocorridas durante cada cultivo (corte) da cana-de-açúcar (primeiro, segundo, terceiro, quarto, quinto, sexto e sétimo corte). ..... 30
- Figura 5-2: Teores de  $S-SO_4^{2-}$  (A e B),  $Ca^{2+}$  trocável (C e D),  $Mg^{2+}$  trocável (E e F) e saturação por alumínio (m%) (G e H) em amostras de solo 13 (A, C, E e G) e 87 meses (B, D, F e H) após a aplicação do gesso no plantio da cana-de-açúcar. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). ..... 35
- Figura 5-3: Densidade de massa seca de raízes ( $g\ dm^{-3}$ ) após o primeiro (A) e o sétimo corte da cana-de-açúcar (B) em resposta a aplicação de gesso no plantio. \*\*, \* Significativo pelo teste de Tukey  $p \leq 0,05$  e  $p \leq 0,1$ , respectivamente. .... 36
- Figura 5-4: Teores foliares de enxofre (A), cálcio (B), magnésio (C) e nitrogênio (D) em sete cortes de cana-de-açúcar após a aplicação dos tratamentos com gesso (0; 0,5, 5 e 10  $t\ ha^{-1}$  de gesso) no plantio. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Barras verticais representam o erro-padrão da média. Linhas tracejadas representam teores adequados segundo Raij et al. (1996). .... 37
- Figura 5-5: Produtividades de colmos (A) e açúcares redutores totais (ART) (B) em sete cortes de cana-de-açúcar, após a aplicação dos tratamentos com gesso (0; 0,5, 5 e 10  $t\ ha^{-1}$  de gesso) no plantio. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Barras verticais representam o erro-padrão da média. .... 38
- Figura 5-6: Produtividades de colmos (A) e açúcares redutores totais (ART) (B) acumulada em sete cortes de cana-de-açúcar, após a aplicação dos tratamentos com gesso (0, 0,5, 5 e 10  $t\ ha^{-1}$  de gesso) no plantio. Equações de regressão (e coeficientes de determinação) obtidos com os dados das quatro repetições. .... 39
- Figura 5-7: Produtividade de colmos por total de água (PCTA) em sete cortes de cana-de-açúcar nos tratamentos com 0 e 5  $t\ ha^{-1}$  de gesso e ganhos relativos na PCTA devido ao uso de 5  $t\ ha^{-1}$  de gesso. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). ..... 40

### CAPÍTULO II

Figura 6-1: Precipitações pluviométricas acumuladas e irrigações suplementares realizadas na cana-de-açúcar do primeiro ao sétimo corte.....	59
Figura 6-2: Representação esquemática das posições de coleta (P1, P2 e P3) do solo, em uma parcela experimental, para a determinação das propriedades químicas e dos atributos radiculares da cana-de-açúcar (a) e ilustração dos três pontos de coleta com a utilização do trado tipo caneco (b).....	61
Figura 6-3: Teores de $\text{Ca}^{2+}$ trocável nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) e em profundidade (40-200 cm) após 87 meses da aplicação do gesso. *, ** Significativo pelo teste de Tukey $p \leq 0,05$ e 0,01, respectivamente. ....	65
Figura 6-4: Teores de $\text{S-SO}_4^{2-}$ extraível nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) e em profundidade (40-200 cm) após 87 meses da aplicação do gesso. *, ** Significativo pelo teste de Tukey $p \leq 0,05$ e 0,01, respectivamente. ....	66
Figura 6-5: Teores de $\text{Al}^{3+}$ trocável nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) e em profundidade (40-200 cm) após 87 meses da aplicação do gesso. *, ** Significativo pelo teste de Tukey $p \leq 0,05$ e 0,01, respectivamente. ....	67
Figura 6-6: Densidade de comprimento de raízes nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) e em profundidade (40-200 cm) após 87 meses da aplicação do gesso. *, ** Significativo pelo teste de Tukey $p \leq 0,05$ e 0,01, respectivamente. ....	68
Figura 6-7: Diâmetro das raízes nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) na sexta-soca, e em profundidade (40-200 cm) após 87 meses da aplicação do gesso. *, ** Significativo pelo teste de Tukey $p \leq 0,05$ e 0,01, respectivamente. ....	69
Figura 6-8: Conteúdo de fibras das raízes nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) na sexta soca e em profundidade (40-200 cm) após 87 meses da aplicação do gesso. *, ** Significativo pelo teste de Tukey $p \leq 0,05$ e 0,01, respectivamente. ....	70
Figura 6-9: Diagramas de ordenação da análise de componentes principais (ACP) envolvendo atributos químicos do solo e parâmetros radiculares nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) e nos tratamentos com e sem a aplicação de gesso. $\text{Al}^{3+}$ : teor de alumínio; $\text{Ca}^{2+}$ : teor de cálcio; $\text{S-SO}_4^{2-}$ : teor	

de sulfato; Comprimento: densidade de comprimento de raízes; Diâmetro: diâmetro das raízes; Fibras: conteúdo de fibras das raízes. .... 71

### CAPÍTULO III

Figura 7-1: Precipitações pluviométricas acumuladas e irrigações suplementares realizadas na cana-de-açúcar do primeiro ao sétimo corte. .... 83

Figura 7-2: Representação esquemática dos nove pontos de coleta, em uma parcela experimental, para a determinação da massa seca de raízes da cana-de-açúcar (a) e ilustração de três pontos de coleta com a utilização do trado tipo caneco (b). .... 85

Figura 7-3: Representação esquemática da amostragem para determinação da densidade do solo composta de 3 sub-amostras, na segunda, terceira e quarta linha de plantio à 20, 47,5 e 75 cm de distância da linha, respectivamente. .... 87

Figura 7-4: Teores de  $S-SO_4^{2-}$  (a),  $Ca^{2+}$  trocável (b) e saturação por alumínio ( $Al^{3+}$ ) (c) em amostras de solo 87 meses após a aplicação do gesso no plantio da cana-de-açúcar. \* Significativo pelo teste de  $t \leq 0,05$ . .... 88

Figura 7-5: Massa seca de raízes (a) e estoque de carbono do ácido fúlvico (CAFL) (b) em amostras de solo 87 meses após a aplicação do gesso no plantio da cana-de-açúcar. \* Significativo pelo teste de teste de  $t \leq 0,05$ . .... 89

Figura 7-6: Estoque de carbono particulado (CP) (a) e estoque de carbono total (CT) (b) em amostras de solo 87 meses após a aplicação do gesso no plantio da cana-de-açúcar. Ganho relativo obtido devido ao uso do gesso nos estoques de CP e CT nas camadas de 0-40; 40-100 e 100-200cm (c). \* Significativo pelo teste de  $t \leq 0,05$ . .... 92

Figura 7-7: Diagramas de ordenação da análise de componentes principais (ACP) envolvendo atributos químicos do solo, raízes de cana-de-açúcar e estoques de carbono do solo. Sat. Al: saturação por alumínio do solo;  $Ca^{2+}$ : teores de cálcio;  $S-SO_4^{2-}$ : teores de sulfato; MR: massa seca de raízes; ECP: estoque de carbono particulado; ECAFL: estoque de carbono do ácido fúlvico livre; ECT: estoque de carbono total. .... 94

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO I

Tabela 5-1: Características químicas do solo antes da correção e da adubação da área experimental <sup>(1)</sup> .....	28
Tabela 5-2: Fontes e doses de nutrientes (N, K <sub>2</sub> O e P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) utilizados para a adubação de manutenção para o terceiro, quarto, quinto, sexto e sétimo cortes de cana-de-açúcar... 30	

### CAPÍTULO II

Tabela 6-1: Características químicas do solo antes da correção e da adubação da área experimental <sup>(1)</sup> .....	58
Tabela 6-2: Fontes e doses de nutrientes (N, K <sub>2</sub> O e P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) utilizados para a adubação do primeiro ao sétimo corte de cana-de-açúcar. ....	60
Tabela 6-3: Equações de regressão e coeficientes de determinação para teores de cálcio ( $\hat{y}$ ) em diferentes camadas do solo (x), doses de gesso, posições de amostragem (P1, P2 e P3) e comparações estatísticas dessas regressões.....	65
Tabela 6-4: Equações de regressão e coeficientes de determinação para densidade de comprimento de raízes ( $\hat{y}$ ) em diferentes camadas do solo (x), doses de gesso, posições de amostragem (P1, P2 e P3) e comparações estatísticas dessas regressões.....	68

### CAPÍTULO III

Tabela 7-1: Características químicas do solo antes da correção e da adubação da área experimental <sup>(1)</sup> .....	82
Tabela 7-2: Fontes e doses de nutrientes (N, K <sub>2</sub> O e P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) utilizados para a adubação do primeiro ao sétimo corte de cana-de-açúcar. ....	84

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	HIPÓTESES E OBJETIVOS .....	3
2.1	HIPÓTESES .....	3
2.2	OBJETIVOS .....	3
2.2.1	Objetivo Geral .....	3
2.2.2	Objetivos Específicos .....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1	Uso do gesso e produtividade dos cultivos agrícolas.....	4
3.2	Dinâmica do gesso no solo .....	5
3.3	Cana-de-açúcar: cenário agrícola brasileiro.....	7
3.4	Morfologia e desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar .....	8
3.5	Raízes e estoque de carbono no solo: influência do gesso.....	10
4	REFERÊNCIAS .....	11
	CAPÍTULO I.....	23
5	EFEITO RESIDUAL DO GESSO NO CONDICIONAMENTO DO SUBSOLO, NUTRIÇÃO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	24
5.1	RESUMO.....	24
5.2	ABSTRACT.....	25
5.3	INTRODUÇÃO .....	26
5.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	28
5.4.1	Descrição e manejo da área experimental .....	28
5.4.2	Amostragem e determinação das propriedades químicas do solo .....	31
5.4.3	Amostragem e determinação da massa seca de raízes.....	32
5.4.4	Diagnose do estado nutricional e produtividade de colmos .....	32

5.4.5	Análise estatística .....	33
5.5	RESULTADOS .....	34
5.5.1	Propriedades químicas do solo e densidade de massa seca de raízes .....	34
5.5.2	Teores foliares de macronutrientes e produtividade por total de água .....	36
5.6	DISCUSSÃO .....	40
5.6.1	Propriedades químicas do solo e densidade de massa seca de raízes .....	40
5.6.2	Teores foliares de macronutrientes e produtividade por total de água .....	43
5.7	CONCLUSÕES .....	46
5.8	REFERÊNCIAS.....	46
CAPÍTULO II.....		53
6	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE RAÍZES DE CANA-DE-AÇÚCAR E SUA RELAÇÃO COM ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO SOB EFEITO DO GESSO .....	54
6.1	RESUMO.....	54
6.2	ABSTRACT.....	55
6.3	INTRODUÇÃO .....	56
6.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	57
6.4.1	Descrição e manejo da área experimental .....	57
6.4.2	Amostragem e determinação dos atributos radiculares .....	60
6.4.3	Determinação dos atributos químicos do solo .....	61
6.4.4	Análises estatísticas .....	62
6.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
6.5.1	Propriedades químicas do solo .....	64
6.5.2	Atributos radiculares da cana-de-açúcar.....	67
6.5.3	Análise de componentes principais e efeito do gesso ao longo da entrelinha de plantio 71	
6.6	CONCLUSÕES .....	72

6.7	REFERÊNCIAS.....	73
CAPÍTULO III .....		
7	COMO O USO DO GESSO INCREMENTA O ESTOQUE DE CARBONO NO PERFIL DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR? .....	77
7.1	RESUMO.....	78
7.2	ABSTRACT.....	79
7.3	INTRODUÇÃO .....	80
7.4	MATERIAL E MÉTODOS .....	81
7.4.1	Descrição e manejo da área experimental .....	81
7.4.2	Amostragem e determinação da massa seca de raízes.....	84
7.4.3	Determinação dos atributos químicos do solo .....	85
7.4.4	Determinação do estoque de carbono na forma de ácido fúlvico livre, carbono total e particulado .....	86
7.4.5	Análises estatísticas .....	87
7.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	88
7.5.1	Propriedades químicas do solo, massa seca de raízes e estoque de carbono do ácido fúlvico livre .....	88
7.5.2	Estoques de carbono particulado e total do solo.....	91
7.5.3	Análise multivariada envolvendo o uso do gesso.....	93
7.6	CONCLUSÕES .....	94
7.7	REFERÊNCIAS.....	94
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	102
9	APÊNDICES .....	103

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil cultivou 8,7 milhões de hectares com cana-de-açúcar na safra 2017/18, destacando-se como o maior produtor mundial dessa cultura e estando à frente de países como Índia e China (FAO, 2018). A produção foi de 633 milhões de toneladas, sendo 45,4% utilizados para a obtenção de açúcar e 54,6% na geração do etanol (Conab, 2018). Além desses produtos, a cana pode ainda ser utilizada na produção de energia elétrica ou etanol de segunda geração a partir da biomassa obtida dos resíduos vegetais, como a palha ou o bagaço gerado no processo de moagem (Pippo e Luengo, 2013; Bezerra e Ragauskas, 2016).

Um grande incentivo de políticas públicas voltadas para o cultivo de cana-de-açúcar ocorreu no Brasil na década de 1970, principalmente relacionado ao aumento da produção de etanol (Goldemberg, 2007). Esses incentivos favoreceram a expansão desse cultivo para a região Centro-Sul brasileira, sendo os estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso do Sul detentores de 80% da área cultivada com cana-de-açúcar do Brasil (Granco et al., 2017; Conab 2018). A expansão do cultivo de cana-de-açúcar nesses estados ocorreu principalmente em áreas de pastagem degradada (Adami et al., 2012; Bordonal et al., 2018).

A cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene e após o seu plantio permite a colheita por várias safras consecutivas, até que ocorra a redução da produtividade e seja necessário o replantio (Cheavegatti-Gianotto et al., 2011). Para que a produtividade dos sucessivos ciclos da cana-de-açúcar seja viável economicamente é necessário atender às exigências dessa cultura, dentre elas a demanda hídrica (Scarpate et al., 2015). O requerimento hídrico da cana-de-açúcar na região Centro-Oeste brasileira é de aproximadamente 1100 a 1300 mm/ano e deve ser distribuído ao longo dos meses de desenvolvimento (Hernandes et al., 2014). O bom desenvolvimento do sistema radicular no perfil do solo é importante para atender a essa demanda hídrica (Smith, 2005). Além disso, as raízes promovem o armazenamento de energia para a rebrota da cana-de-açúcar após a colheita (Trivelin et al., 2002).

A ocorrência frequente de déficit hídrico durante o período chuvoso limita a produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul brasileira, principalmente no Cerrado (Scarpate et al., 2015; Monteiro e Sentelhas, 2017). Adicionalmente, a reduzida fertilidade do solo, associada aos baixos teores de cálcio e toxidez por alumínio no perfil do solo (Lopes e Guilherme 2016) prejudicam o desenvolvimento do sistema radicular

das culturas em geral para as camadas mais profundas do solo e com isso inviabilizam a absorção da água disponível no solo (Ritchey et al., 1980).

O aumento dos teores de cálcio e redução da toxidez por alumínio do solo podem ser corrigidos pela utilização do calcário, no entanto, o seu efeito está restrito às camadas superficiais (Ernani et al. 2004; Caires et al. 2005). Como alternativa a essa limitação do calcário, foi estabelecido o uso do gesso, que promove o aumento dos teores de cálcio e redução da toxidez por alumínio nas camadas subsuperficiais do solo após poucos meses da sua aplicação na superfície (Dalla Nora et al., 2014; Araújo et al., 2016).

A melhoria das propriedades químicas das camadas subsuperficiais do solo devido ao uso do gesso promove um ambiente adequado ao maior crescimento das raízes (Clemente et al., 2017). Associado à elevada demanda hídrica da cana-de-açúcar (Hernandes et al., 2014) e à ocorrência do déficit hídrico na região de expansão desse cultivo (Monteiro e Sentelhas, 2017), o gesso pode elevar as produtividades, devido ao favorecimento do crescimento radicular proporcionando uma eficiente absorção de água disponível no solo (Araújo et al., 2016).

A maior produtividade e o favorecimento do crescimento das raízes de cana-de-açúcar podem promover o acúmulo de carbono no solo (Araújo et al., 2017; Silva-Olaya et al. 2017), pois o sequestro de C atmosférico pela agricultura pode ser alcançado pelo aumento da deposição de biomassa das plantas (Lal 2018). Além disso, a cana-de-açúcar possui alta eficiência de fixação de carbono atmosférico e, portanto, elevada produção de biomassa por hectare (Dinardo-Miranda et al., 2008).

As raízes possuem papel fundamental no acúmulo de carbono no solo, sendo mais efetivas que a parte aérea da planta (Bolinder et al. 1999). No caso da cana-de-açúcar ocorre a renovação de parte do sistema radicular a cada colheita (Otto et al. 2014) e isso permite a deposição de carbono no solo, oriundo das raízes que entraram em senescência (Silva-Olaya et al. 2017).

Além do aumento do potencial produtivo da cana-de-açúcar, que pode ser favorecido pelo uso do gesso devido a melhoria das propriedades químicas do solo, esse corretivo pode ser um importante aliado no sequestro de carbono atmosférico devido ao maior crescimento das raízes. Apesar de ser uma tecnologia já bem estabelecida para a maior parte das culturas, ainda restam dúvidas sobre o potencial do gesso como acumulador de carbono em profundidade e o seu papel na distribuição espacial de raízes de cana-de-açúcar. Além disso, efeitos residuais do gesso em sucessivos cultivos de cana-de-açúcar ainda precisam ser melhor explorados.

## 2 HIPÓTESES E OBJETIVOS

### 2.1 HIPÓTESES

- As melhorias das propriedades químicas do subsolo devido ao uso do gesso favorecem o aumento da produtividade da cana-de-açúcar;
- O crescimento em profundidade das raízes da cana-de-açúcar é incrementado pela aplicação do gesso;
- O maior crescimento das raízes de cana-de-açúcar ocasionados pelo uso do gesso promove incremento do estoque de carbono no solo;
- O aumento do estoque de carbono no solo devido ao uso do gesso ocorre principalmente nas camadas subsuperficiais, zona de atuação desse corretivo.

### 2.2 OBJETIVOS

#### 2.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito do gesso como condicionador do solo no desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar e no acúmulo de carbono em solo do Cerrado.

#### 2.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar os atributos químicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar submetida ao efeito residual de doses de gesso;
- Avaliar o efeito do gesso nos atributos radiculares da cana-de-açúcar nas camadas subsuperficiais do solo;
- Verificar a influência do gesso nos atributos químicos do solo e crescimento das raízes ao longo da entrelinha de plantio;
- Determinar os efeitos da aplicação de gesso nas frações lábeis e estáveis da matéria orgânica do solo;
- Estimar o estoque de carbono nas camadas subsuperficiais do solo devido ao uso do gesso;

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Uso do gesso e produtividade dos cultivos agrícolas

Desde a antiguidade já existem relatos da utilização do gesso na nutrição de plantas pelos gregos e romanos (Borkert et al., 1987). Além da utilização na nutrição de plantas, o gesso tem sido empregado há muitos anos na melhoria de solos sódicos (Chen e Dick, 2011) e no condicionamento de solos ácidos e com baixa fertilidade natural, como no caso do Cerrado (Ritchey et al., 1980), importante região brasileira de atividade agropecuária (Sumner, 2012; Lopes et al., 2012).

Desde o final da década de 1970 pesquisas têm sido desenvolvidas com enfoque no uso do gesso em solos do Cerrado (Ritchey et al., 1980; Sousa e Ritchey, 1985). Desde então, a adoção da gessagem no Brasil tem evoluído, sendo de forma mais intensa na última década, principalmente para áreas de ocorrência de estresse hídrico, solos ácidos e sob o sistema de plantio direto (Zoca e Penn, 2017; Tiecher et al., 2018).

O aumento da área sob utilização do gesso no Cerrado está associado aos incrementos em produtividade devido à utilização dessa tecnologia. Conforme trabalhos conduzidos por Sousa et al. (2009), a utilização do gesso propiciou incrementos de 44,4 e 21,2% na produtividade de algodão e soja, respectivamente. Crusciol et al. (2016) verificaram incrementos de 30% na produtividade de feijoeiro devido a aplicação de gesso e calcário, em relação a utilização apenas de calcário.

Incrementos em produtividade para cultivos agrícolas devido a utilização de gesso também têm sido observados em outras regiões, como no sul do Brasil (Michalovicz et al., 2014; Rampim e Lana, 2015; Tiecher et al., 2018). Sob sistema plantio direto, Caires et al. (2011), avaliando o efeito de doses de gesso nas produtividades de milho e soja, verificaram ajuste quadrático no modelo que descreve a produtividade de milho. No entanto, não observaram efeito do gesso na produtividade da soja. Entretanto, quando associado a déficit hídrico, o uso do gesso possibilitou incrementos na ordem de 14% para a cultura da soja na região Sul (Zandoná et al., 2015).

Além de culturas anuais como soja, milho e feijão, culturas semi-perenes, como a cana-de-açúcar, têm sido beneficiadas devido ao uso de gesso (Lima et al., 2013; Sousa et al., 2015). Ganhos de até 12 t ha<sup>-1</sup> na produtividade de colmos têm sido alcançados para a cultura da cana-de-açúcar devido a aplicação de gesso (Demattê, 2011). A utilização combinada de gesso e calcário proporcionou maiores produtividade de colmos em relação a utilização isolada dos mesmos, conforme verificado por Morelli et al. (1992), que

obtiveram aumentos de 55, 52, e 90 t ha<sup>-1</sup> de colmos acumulados em 4 anos, para calcário, gesso e calcário mais gesso, respectivamente. Crusciol et al. (2014) verificaram incremento de 14% na produtividade de colmos após 12 meses da aplicação de gesso em terceira soca.

As maiores produtividades obtidas pelas culturas agrícolas associadas ao uso do gesso estão relacionadas ao fornecimento dos nutrientes enxofre e cálcio (Broch et al., 2011; Lucheta e Lambais, 2012). Além disso, outro importante efeito positivo ocasionado por esse corretivo está associado ao condicionamento das camadas subsuperficiais do solo para o crescimento radicular, resultado dos maiores teores disponíveis de cálcio e da redução da toxidez de alumínio (Pauletti et al., 2014; Dalla Nora et al., 2014; Moraes et al., 2016). Tal efeito pode favorecer maior desenvolvimento de raízes e eficiência da utilização de água e nutrientes disponíveis no perfil do solo pelos cultivos agrícolas, principalmente sob condições de déficit hídrico.

### 3.2 Dinâmica do gesso no solo

O gesso ou sulfato de cálcio (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) utilizado na agricultura brasileira é obtido de jazidas de gipsita, ou de resíduo (subproduto) da produção de ácido fosfórico (Raij, 2008). No caso do gesso como subproduto da obtenção de ácido fosfórico, contém em sua formulação, na forma úmida em que é comercializado, em torno de 19% de cálcio e 15% de enxofre (Sousa e Lobato, 2004).

Após a aplicação do gesso no solo, quando na presença de umidade decorrente de precipitações pluviométricas ou irrigação, ocorre sua dissolução, ocasionando aumento da atividade individual dos íons na solução e a formação de associações iônicas dos cátions, como cálcio, magnésio e potássio com o sulfato (Zambrosi et al., 2007; Serafim et al., 2012). Portanto, o sulfato pode permanecer de forma livre na solução do solo ou formar complexos solúveis a partir de pareamento iônico, como CaSO<sub>4</sub><sup>0</sup>, MgSO<sub>4</sub><sup>0</sup>, KSO<sub>4</sub><sup>-</sup> e AlSO<sub>4</sub><sup>+</sup> (Pavan e Volkweiss, 1985; Ramos et al., 2013). Tais complexos solúveis, por apresentarem formas neutras ou com menor valência apresentam mobilidade nos solos e, conseqüentemente, possibilitam o aumento dos teores de cátions em subsuperfície (Zambrosi et al., 2007; Vicensi et al., 2016).

O íon cálcio (Ca<sup>2+</sup>) dissociado do gesso promove reações de troca com os demais cátions presentes no complexo de troca do solo, promovendo o aumento da concentração desses cátions na solução do solo (Zambrosi et al., 2007; Favaretto et al., 2008) Outro

importante efeito ocasionado pelo gesso é a redução da atividade do íon  $\text{Al}^{3+}$  da solução do solo, ocasionado pela formação do par iônico  $\text{AlSO}_4^+$ , menos tóxico às raízes em relação ao  $\text{Al}^{3+}$ . (Pavan e Volkweiss, 1985). Além disso, a redução da toxidez por alumínio pode ser favorecida pela insolubilização do mesmo com o aumento do pH do solo, devido à reação de troca entre  $\text{SO}_4^{2-}$  e os grupos de  $\text{OH}^-$  da superfície das argilas, fenômeno conhecido como “auto-calagem” (Reeve e Sumer, 1972; Dalla Nora et al., 2014).

A espécie na solução do solo  $\text{Al}^{3+}$  é tóxica para o crescimento radicular, reduzindo o comprimento das raízes e conseqüentemente a absorção de nutrientes pelas plantas (Arunakumara et al., 2013). Portanto, em solos ácidos, que predominam na maior parte das regiões brasileiras, com elevados teores de alumínio trocável em subsuperfície, ocorre a restrição do crescimento radicular às camadas superficiais do solo coma acidez corrigida, afetando negativamente a utilização de água e nutrientes disponíveis no subsolo (Joris et al., 2013). Além do alumínio, outro importante fator que limita o crescimento radicular nas camadas subsuperficiais dos solos são os baixos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  (Ritchey et al., 1982; Hawkesford et al., 2012).

O calcário é um importante corretivo da acidez do solo, além de importante fonte de cálcio (Rodrighero et al., 2015). No entanto, nas doses normalmente recomendadas, seu efeito é restrito à camada superficial do solo devido sua baixa solubilidade (Ernani et al., 2004; Caires et al., 2005). O gesso, por outro lado, proporciona o aumento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e redução da saturação por alumínio nas camadas subsuperficiais do solo rapidamente (Ritchey et al., 1980; Soratto e Crusciol, 2008a). A mobilidade do  $\text{Ca}^{2+}$  originado do calcário ocorre lentamente, devido ao consumo do ânion carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) pela acidez do solo, enquanto que para o gesso ocorre a formação dos complexos solúveis com o sulfato (Soratto e Crusciol, 2008b; Dalla Nora et al., 2014). Além disso a solubilidade do calcário é de  $0,014 \text{ g L}^{-1}$  de água, enquanto que a do gesso é de  $2,5 \text{ g L}^{-1}$  de água (Raij, 2008).

A aplicação de gesso no solo apresenta longo efeito residual no aumento dos teores de enxofre (Caires et al., 2011) e redução da acidez (Souza et al., 2012) do subsolo. Pauletti et al. (2014) verificaram incrementos nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e redução da saturação por alumínio após 36 e 72 meses da aplicação de gesso. No estudo da combinação de calcário e gesso, Costa e Crusciol (2016) observaram aumento nos teores de sulfato e saturação por bases após 48 e 60 meses da aplicação na camada de 0-60 cm do solo. Portanto, o efeito residual do gesso na melhoria do subsolo pode ser observado por longo período.

### 3.3 Cana-de-açúcar: cenário agrícola brasileiro

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com 8,7 milhões de hectares cultivados, dos quais 84% estão concentrados nas regiões Sudeste e Centro-Oeste. Na safra 2017/18 a produção de cana-de-açúcar foi de 633 milhões de toneladas, proporcionando a geração de 37 milhões de toneladas de açúcar e 27 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2018).

A produtividade média brasileira de cana-de-açúcar na safra 2017/18 foi de 72 t ha<sup>-1</sup>, no entanto já atingiu valores de 81 t ha<sup>-1</sup> na safra 2008/09. No estado de São Paulo, que é o maior produtor de cana-de-açúcar, as perspectivas para a safra 2017/18 são de perdas em produtividade em relação à safra passada, em função do envelhecimento contínuo das lavouras e a ocorrência frequente de estresse hídrico (CONAB, 2018).

A produtividade da cana-de-açúcar é dependente de diversos fatores, associados à variedade (Cheavegatti-Gianotto et al., 2011), propriedades químicas (Landel et al. 2003), físicas (Sá et al., 2016) e biológicas do solo, precipitação, temperatura, insolação, práticas culturais, controle de pragas e doenças e processos relacionados a colheita (Orlando Filho et al., 1994).

No Brasil, o déficit hídrico é o principal fator restritivo da produtividade de cana-de-açúcar, responsável por 75,6% da restrição (Monteiro e Sentelhas, 2017). Tal fato, associado aos baixos teores de Ca<sup>2+</sup> e a elevada saturação por alumínio nos solos do Cerrado (Lopes e Guilherme, 2016) intensificam as limitações em produtividade, pois com a restrição ao desenvolvimento do sistema radicular, a eficiência na utilização de água disponível no subsolo é menor (Sumner, 2011).

Após a colheita da cana-planta ocorrem sucessivos cortes das soqueiras, que levam a uma perda gradual de rendimento até que a cultura já não seja economicamente rentável, demandando a renovação do canavial (Rudorff et al., 2010). O replantio representa um dos maiores custos associados ao cultivo da cana no Brasil (Barros e Milan, 2010) e, portanto, a manutenção do rendimento nos sucessivos cortes da cana soca pode aumentar a longevidade do canavial e maior retorno econômico para o produtor.

O aprofundamento do sistema radicular é uma das principais estratégias para promover o aumento da produtividade das soqueiras (Rossetto et al., 2008). Portanto, a utilização de práticas que promovam maior desenvolvimento e distribuição do sistema

radicular para camadas mais profundas do solo pode proporcionar maior longevidade dos canaviais.

### 3.4 Morfologia e desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar

Os estudos iniciados por Evans (1935) foram primordiais para a compreensão do desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar, caracterizando três tipos funcionais de raízes. De acordo com esses estudos, as primeiras raízes a emergirem são originadas dos colmos plantados, denominadas de raízes superficiais, as raízes de sustentação originadas de brotos jovens que podem atingir até 1,5 m de profundidade e as raízes de cordão formadas por aglomerações de raízes verticais.

No entanto, tal padrão de desenvolvimento do sistema radicular foi atribuído para variedades de cana-de-açúcar cultivadas há muitas décadas, não podendo ser extrapolado para as novas variedades oriundas dos recentes programas de melhoramento genético (Smith et al., 2005). Assim, para as variedades de cana-de-açúcar cultivadas atualmente, o desenvolvimento do sistema radicular inicia-se logo após o plantio dos rebolos e as primeiras raízes a emergirem são originadas da região radicular da gema, denominadas raízes do colmo, que são finas e altamente ramificadas, responsáveis por viabilizarem o crescimento inicial da cultura. Logo em seguida, originam-se as raízes dos perfilhos, que a partir do terceiro mês de cultivo representam o sistema radicular da cana-de-açúcar, devido à senescência das raízes do colmo (Vasconcelos e Dinardo-Miranda, 2011).

A distribuição e o desenvolvimento do sistema radicular são afetados por características genéticas, observado nas diferentes variedades, sendo que algumas podem apresentar sistema radicular concentrado na superfície do solo ou distribuído ao longo do perfil, com predominância de raízes finas ou tenras (Dinardo-Miranda et al., 2008). Além disso, o umedecimento do solo após períodos de estiagem proporciona o crescimento mais vigoroso do sistema radicular apenas de determinadas variedades (Vasconcelos e Dinardo-Miranda, 2011).

A alta variabilidade existente entre a distribuição e a arquitetura do sistema radicular foi demonstrada por Landell et al. (2005), que compararam a distribuição e matéria seca de seis cultivares, onde a variedade de cana-de-açúcar IACSP93-3046 chegou a apresentar até o dobro de matéria seca de raízes em relação a variedade IACSP94-2101. No que diz respeito à distribuição, a variedade IACSP94-4004 apresentou sistema radicular distribuído uniformemente até 80 cm de profundidade,

diferindo da variedade IACSP94-2101, que possui 60% do sistema radicular concentrado nos primeiros 20 cm de perfil do solo.

Além dos fatores genéticos, as raízes de cana-de-açúcar respondem fortemente a fatores climáticos, principalmente, à precipitação pluviométrica (Otto et al., 2011). À medida que se reduz o potencial hídrico do solo ocorre a paralização e posteriormente a morte de parte do sistema radicular, iniciando na superfície do solo (Vasconcelos e Dinardo-Miranda, 2011). Assim, o enraizamento mais profundo no solo reduz a vulnerabilidade do sistema radicular ao estresse hídrico, devido à maior superfície de absorção de água e nutrientes pelas plantas ao longo do perfil do solo (Battie Laclau e Laclau, 2009) e maior estoque de água nas camadas mais profundas. Dentre os parâmetros radiculares, a densidade de comprimento radicular (cm de raiz/cm<sup>3</sup> de solo) exerce papel fundamental na absorção de água (Newman, 1969).

Aliado às características genéticas e aos fatores climáticos, os atributos físicos e químicos do solo configuram os principais componentes responsáveis pela dinâmica de crescimento do sistema radicular (Matsuoka e Garcia, 2011). Dentre os atributos físicos, a resistência à penetração das raízes no solo exerce influência direta no crescimento do sistema radicular (Sá et al., 2016). A aeração do solo também exerce influência no crescimento radicular, através do fornecimento de oxigênio às raízes, favorecendo a respiração e o suprimento energético para a absorção de nutrientes (Vasconcelos e Garcia, 2005).

Os atributos químicos do solo interferem diretamente no crescimento do sistema radicular, por intermédio da disponibilidade de nutrientes e elementos tóxicos, especialmente os teores de cálcio, que podem tornar-se extremamente limitantes (Sumner, 2012). Pois esse nutriente possui função essencial para o alongamento das raízes (Hawkesford et al., 2012). Teores de cálcio trocável nas camadas de subsuperfície do solo abaixo de 0,1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> ou valores de saturação de cálcio na capacidade de troca catiônica efetiva do solo abaixo de 45% conferem alta restrição ao crescimento radicular (Sousa et al., 1992; Ritchey et al., 1989). A toxidez por alumínio também restringe o crescimento radicular, interferindo na absorção de outros nutrientes e reduzindo a taxa de respiração (Rocha et al., 2008). Além disso, provoca alterações morfológicas e fisiológicas negativas no sistema radicular (Sasaki et al., 1996; Arunakumara et al., 2013).

Todos os fatores que interferem no desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar exercem influência direta no estabelecimento da cultura, pois após a colheita, a energia, água e os nutrientes necessários para o rebrote da soqueira serão fornecidos

pelo sistema radicular (Trivelin et al., 2002). Assim, apenas parte do sistema radicular antigo é substituído pelas raízes dos novos perfilhos das soqueiras, conferindo o acúmulo de raízes após sucessivos cortes.

Segundo Vasconcelos et al. (2003), para uma melhor compreensão do crescimento da parte da aérea de cana-de-açúcar é necessário o conhecimento do desenvolvimento do sistema radicular. Entretanto o estudo do sistema radicular é complexo e muito trabalhoso. Portanto, são poucos os estudos para a compreensão da distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em camadas mais profundas do solo (Otto et al., 2009; Matsuoka e Garcia, 2011, Barbosa et al., 2018).

### 3.5 Raízes e estoque de carbono no solo: influência do gesso

A melhoria dos atributos químicos do subsolo em função do uso do gesso pode promover maior distribuição do sistema radicular no perfil do solo e, conseqüentemente, maior eficiência na utilização de água disponível no subsolo, principalmente sob condições de déficit hídrico. Em trabalho conduzido em Latossolo do Cerrado o uso do gesso favoreceu a maior distribuição das raízes de milho, proporcionando 48% da distribuição relativa de raízes na camada abaixo de 30 a 75 cm, enquanto que sem a aplicação do gesso essa proporção foi de 10%, o que favoreceu o melhor aproveitamento da água disponível no subsolo (Sousa e Richey, 1985).

Estudando o efeito da combinação de calcário e gesso na cana-de-açúcar, Rocha et al. (2008) verificaram que o aumento dos teores de  $Ca^{2+}$  no subsolo implicou em maior percentagem de raízes abaixo de 40 cm de profundidade em relação a utilização apenas de calcário. Efeitos positivos no crescimento radicular devido ao uso de gesso também foram verificados por Caires et al. (2016) que estudando a interação entre gesso e nitrato de amônio, verificaram incrementos de 36 a 76% no comprimento radicular do milho em resposta a aplicação de gesso e doses crescentes de nitrogênio.

Além de afetar a distribuição, o gesso modifica a morfologia do sistema radicular, conforme verificado por Carducci et al. (2015) no estudo do sistema radicular de café. Nesse trabalho, doses crescentes de gesso favoreceram o desenvolvimento de raízes finas, que são mais eficientes na absorção de água, bem como uma melhor distribuição espacial do sistema radicular para as camadas subsuperficiais do solo nas maiores doses de gesso.

As raízes e os exsudatos radiculares possuem importante contribuição no acúmulo de carbono no solo (Rasse et al., 2005; Abiven et al., 2005), que permanece protegido

fisicamente por agregados e microporos do solo, favorecendo a formação de frações mais estáveis (Menichetti et al., 2015). Além da adição de carbono mais estável ao solo proporcionado por raízes, ocorre o favorecimento da formação e estabilização de agregados, proporcionando um processo de equilíbrio nos fluxos de carbono do solo (Vezzani e Mielniczuk, 2011).

A combinação da contribuição das raízes no acúmulo de carbono no solo e o efeito do gesso na melhoria do subsolo para o crescimento radicular favorecem o incremento do estoque de carbono no solo. Araújo et al. (2016) observaram acúmulo de 5,4 t ha<sup>-1</sup> no estoque de carbono total na camada de 0-100 cm do solo após 50 meses da aplicação de gesso em cana-de-açúcar com um total de quatro cortes neste período, sendo 20% desse acúmulo na camada de 0-40 cm e 80% na camada de 40-100 cm do solo. Sob sistema de plantio direto em culturas anuais Inagaki et al. (2016) verificaram incremento de 5,3 t ha<sup>-1</sup> no estoque de carbono do solo na camada de 0-60 cm devido ao uso de gesso, em um período de 15 anos.

Além do efeito direto do gesso no aumento de estoque de carbono no solo, devido a melhoria das propriedades químicas do subsolo e, conseqüentemente, incremento da biomassa dos cultivos (Araújo et al., 2016; Inagaki et al., 2016), o uso do gesso pode favorecer o aumento indireto do carbono no solo relacionado ao aumento dos teores de Ca<sup>2+</sup>. Esse cátion exerce papel fundamental na estabilização da matéria orgânica e agregados do solo (Bronick e Lal, 2005) que é explicada pela formação de complexos com argila e a matéria orgânica por intermédio de pontes catiônicas favorecidas por esse elemento (Briedis et al., 2012; Castro et al., 2014).

Apesar da importância das raízes para o incremento de carbono no solo (Bolinder et al. 1999), são poucos os estudos que avaliam a influência do gesso no crescimento das raízes e no armazenamento de carbono no perfil do solo. Assim como as modificações na morfologia das raízes e nos diferentes compartimentos de carbono do solo.

#### **4 REFERÊNCIAS**

ABIVEN, S.; RECOUS, S.; REYES, V.; OLIVER, R. Mineralisation of C and N from root, stem and leaf residues in soil and role of their biochemical quality. **Biology and Fertility of Soils**, v. 42, n. 2, p. 119-128, 2005.

- ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, R. M.; AGUIAR, D. A.; SUGAWARA, L.; M.; MELLO, M. P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, v. 4, n. 4, p. 574-585, 2012.
- ARAÚJO, L. G.; FIGUEIREDO, C. C.; SOUSA, D. M. G.; SOUZA NUNES, R.; REIN, T. A. Influence of gypsum application on sugarcane yield and soil chemical properties in the brazilian Cerrado. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 11, p. 1557, 2016.
- ARAÚJO, L. G.; FIGUEIREDO, C. C.; SOUSA, D. M. G. Gypsum application increases the carbon stock in soil under sugar cane in the Cerrado region of Brazil. **Soil Research**, v. 55, n. 1, p. 38-46, 2017.
- ARUNAKUMARA, K. K. I. U.; WALPOLA, B. C.; YOON, M. H. Aluminum toxicity and tolerance mechanism in cereals and legumes - A review. **Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry**, v. 56, n. 1, p. 1-9, 2013.
- BARBOSA, L. C.; DE SOUZA, Z. M.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; NETO, J. R.; GARSIDE, A. L.; CARVALHO, J. L. N. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. **Geoderma**, v. 13, p. 15-25, 2018.
- BARROS, F. F.; MILAN, M. Qualidade operacional do plantio de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 221-229, 2010.
- BATTIE LACLAU, P. B.; LACLAU, J. P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, v. 114, n. 3, p. 351-360, 2009.
- BEZERRA, T. L.; RAGAUSKAS, A. J. A review of sugarcane bagasse for second-generation bioethanol and biopower production. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 10, n. 5, p. 634-647, 2016.
- BOLINDER, M. A.; ANGERS, D. A.; GIROUX, M.; LAVERDIERE, M. R. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea Mays* L.). **Plant and Soil**, v. 215, n. 1, p. 85-91, 1999.
- BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 2, p. 13, 2018.
- BORKERT, C. M.; PAVAN, M. A.; ANTMANN, A. F. Considerações sobre o uso de gesso na agricultura. **Comunicado técnico**, 40, Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1987. 1-5 p.

BRIEDIS, C.; DE MORAES SÁ, J. C.; CAIRES, E. F.; FÁTIMA NAVARRO, J.; INAGAKI, T. M.; BOER, A.; NETO, C. Q.; FERREIRA, A. O.; CANALLI L. B.; SANTOS, J. B. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. **Geoderma**, v. 170, p. 80-88, 2012.

BROCH, D. L.; PAVINATO, P. S.; POSSENTTI, J. C.; MARTIN, T. N.; DEL QUIQUI, E. M. Soybean grain yield in Cerrado region influenced by sulphur sources. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 3, p. 791-796, 2011.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

CAIRES, E. F.; ALLEONI, L. R.; CAMBRI, M. A.; BARTH, G. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. **Agronomy Journal**, v. 97, n. 3, p. 791-798, 2005.

CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 45-53, 2011.

CAIRES, E. F.; ZARDO FILHO, R.; BARTH, G.; JORIS, H. A. Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO<sub>3</sub>-N in Subsoil. **Pedosphere**, v. 26, n. 4, p. 474-485, 2016.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N.; HECK, R. J.; ROSSONI, D. F.; CARVALHO, T. S.; COSTA, A. L. Gypsum effects on the spatial distribution of coffee roots and the pores system in oxidic Brazilian Latosol. **Soil and Tillage Research**, v. 145, p. 171-180, 2015.

CASTRO, G. S.; CRUSCIOL, C. A.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Management impacts on soil organic matter of tropical soils. **Vadose Zone Journal**, v. 14, n. 1, 2015.

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A.; ABREU, H. M. C.; ARRUDA, P.; BESPALHOK FILHO, J. C. et al. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A reference study for the

regulation of genetically modified cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology**, v. 4, n. 1, p. 62-89, 2011.

CHEN, L.; DICK, W. A. **Gypsum as an agricultural amendment: General use guidelines**. 2011. The Ohio State University Extension, Columbus. Disponível em: <<http://ohioline.osu.edu/b945/index.html>> Acesso em: 15 nov 2016.

CLEMENTE, P. R. A.; BEZERRA, B. K. L.; SILVA, V. S. G. D.; SANTOS, J. C. M. D.; ENDRES, L. Root growth and yield of sugarcane as a function of increasing gypsum doses. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 1, p. 110-117, 2017.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**. Disponível em: <[file:///C:/Users/Larissaga/Downloads/BoletimZCanaZ2ZLevantamentoZ18-19%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/Larissaga/Downloads/BoletimZCanaZ2ZLevantamentoZ18-19%20(3).pdf)> Acesso em: 02 nov 2018.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica das safras**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>> Acesso em: 02 nov. 2018.

COSTA, C. H. M.; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v. 74, p. 119-132, 2016.

CRUSCIOL, C. A. C.; FOLTRAN, R.; ROSSATO, O. B.; MCCRAY, J. M.; ROSSETTO, R. Effects of surface application of calcium-magnesium silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, p. 1843-1854, 2014.

CRUSCIOL, C. A.; ARTIGIANI, A. C.; ARF, O.; CARMEIS FILHO, A. C.; SORATTO, R. P.; NASCENTE, A. S.; ALVAREZ, R. C. Surface application of lime–silicate–phosphogypsum mixtures for improving tropical soil properties and irrigated common bean yield. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 4, p. 930-942, 2016.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C.; BORTOLOTTI, R. P.; FERREIRA, A. O.; REICHARDT, K. Subsoil chemical amelioration and crop yields under continuous long-

term no-till in a subtropical Oxisol. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 45, p. 3338-3349, 2014.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C.; BORTOLOTTI, R. P.; FERREIRA, A. O.; REICHARDT, K. Subsoil chemical amelioration and crop yields under continuous long-term no-till in a subtropical Oxisol. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 45, p. 3338-3349, 2014.

DEMATTE, J. L. I. Ação do gesso e do calcário na relação cálcio: magnésio do solo e na produtividade da cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, 136, Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 11-16 p.

DINARDO-MIRANDA L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas/SP: Instituto Agronômico, 2008.

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. F.; BAYER, C. Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 35, n. 5-6, p. 889-901, 2004.

EVANS, H. The root-system of the sugar-cane: I. Methods of study. **Empire Journal of Experimental Agricultura**, v. 3, p. 351-363, 1935.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS. **Crops**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>> Acesso em: 02 nov. 2018.

FAVARETTO, N.; NORTON, L. D.; BROUDER, S. M.; JOERN, B. C. Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium effects on plant nutrition under conditions of intensive nutrient extraction. **Soil Science**, v. 173, n. 2, p. 108-118, 2008.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, v. 315, n. 5813, p. 808-810, 2007.

GRANCO, G.; CALDAS, M. M.; BERGTOLD, J. S.; SANT'ANNA, A. C. Exploring the policy and social factors fueling the expansion and shift of sugarcane production in the Brazilian Cerrado. **GeoJournal**, v. 82, n. 1, p. 63-80, 2017.

HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; SKRUMSAGER, I.; WHITE, P. Functions of macronutrients. In: MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschners's mineral nutrition of higher plants**. Australia: The University of Adelaide: Elsevier, 2012. p. 135-188.

HERNANDES, T. A. D.; BUFON, V. B.; SEABRA, J. E. Water footprint of biofuels in Brazil: assessing regional differences. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 8, n. 2, p. 241-252, 2014.

INAGAKI, T. M.; MORAES SÁ, J. C.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. P. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 231, p. 156-165, 2016.

JORIS, H. A. W.; CAIRES, E. F.; BINI, A. R.; SCHARR, D. A.; HALISKI, A. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system. **Plant and soil**, v. 365, n. 1-2, p. 409-424, 2013.

LAL, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology**, p. 1-17, 2018.

LANDELL, M. G. A.; CAMPANA, M. P.; FIGUEIREDO, P.; VASCONCELOS, A. C. M.; XAVIER, M. A. et al. Variedades de cana-de-açúcar para o Centro-Sul do Brasil. **Boletim Técnico**, 197, Campinas: Instituto Agrônômico, 2005.

LANDELL, M. G. A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A. C. M.; PERENCIN, D.; ROSSETO, R.; BIDOIA, M. A. P.; SILVA, M. A.; XAVIER, M. A. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 4, p. 741-745, 2003.

LIMA, R. C.; MELLO, L. M.; YANO, É. H.; SILVA, J. O.; CESARIN, A. L. Modalities for soil preparation and gypsum application in Ultisol: stem productivity of sugarcane. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 6, p. 1180-1190, 2013.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. G. A. career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v. 137, p. 1-72, 2016.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; RAMOS, S. J. The saga of the agricultural development of the Brazilian Cerrado. *e-*ifc**, 32, International Potash Institute, 2012. p. 29-56.

LUCHETA, A. R.; LAMBAIS, M. R. Sulfur in agriculture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1369-1379, 2012.

MATSUOKA, S.; GARCIA, A. A. F. Sugarcane underground organs: going deep for sustainable production. **Tropical Plant Biology**, v. 4, n. 1, p. 22-30, 2011.

MENICHETTI, L.; EKBLAD, A.; KÄTTERER, T. Contribution of roots and amendments to soil carbon accumulation within the soil profile in a long-term field experiment in Sweden. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 200, p. 79-87, 2015.

MICHALOVICZ, L.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S.; KAWAKAMI, J.; NASCIMENTO, R. D.; KRAMER, L. F. M. Soil fertility, nutrition and yield of maize and barley with gypsum application on soil surface in no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1496-1505, 2014.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap: can it be determined at national level with a simple agrometeorological model? **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 3, p. 272-284, 2017.

MORAES, V. R.; BRITO, O. R.; FIORETTO, R. A.; MOREIRA, A. Changes in chemical properties of an oxisol due to gypsum application. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 47, n. 5, p. 571-580, 2016.

MORELLI, J. L., DALBEN, A. E., ALMEIDA, J. O. C., & DEMATTÊ, J. L. I. Calcário e gesso na produtividade da cana de açúcar e nas características químicas de um Latossolo de textura média álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, n. 2, p. 187-194, 1992.

NEWMAN, E.I. Resistance to water flow in soil and plant I. Soil resistance in relation to amounts of root: theoretical estimates. **Journal of Applied Ecology**, p. 1-12, 1969.

ORLANDO FILHO, J.; MACEDO, N.; TOKESHI, H. Seja o doutor do seu canavial. **Informações Agronômicas**, 67, Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 1994. 16 p.

OTTO, R.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; DE OLIVEIRA, E. C. A.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. The role of nitrogen fertilizers in sugarcane root biomass under field conditions. **Agricultural Sciences**, v. 5, n. 14, p. 1527, 2014.

OTTO, R.; SILVA, A. P.; FRANCO, H. C. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, v. 117, p. 201-210, 2011.

OTTO, R.; TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 601-611, 2009.

PAULETTI, V.; PIERRI, L. D.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Long-term effects of the application of gypsum and lime in a no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 495-505, 2014.

PAVAN, M. A.; VOLKWEISS, S. J. Efeitos do gesso nas relações solo - planta: princípios. In: **Anais Seminário sobre o uso do fosfogesso na agricultura**, Brasília, Brasil, 1985, 107-118 p.

PIPPPO, W. A.; LUENGO, C. A. Sugarcane energy use: accounting of feedstock energy considering current agro-industrial trends and their feasibility. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v.4, p. 1-13, 2013.

RAIJ, B van. Gesso na agricultura. **Informações Agronômicas**, 122, Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 12-23 p.

RAMOS, B. Z.; VAZ FLORIANO TOLEDO, J. P.; LIMA, J. M.; SERAFIM, M. E.; Ribeiro Bastos, A. R.; Gontijo Guimarães, P. T.; Coscione, A. R. Doses de gesso em cafeeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, 2013.

RAMPIM, L.; LANA, M. C. Ion mobility and base saturation after gypsum application in continuous soybean-wheat cropping system under no-till. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 6, p. 468, 2015.

RASSE, D. P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M. F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. **Plant and soil**, v. 269, n. 1-2, p. 341-356, 2005.

REEVE, N. G.; SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity in Natal oxisols by leaching of surface-applied amendments. **Agrochimophisica**, v. 4, n. 1, p. 1-5, 1972.

RITCHEY, K. D.; SOUSA, D. M. G.; RODRIGUES, G. C. Inexpensive biological tests for soil calcium deficiency and aluminum toxicity. **Plant and Soil**, v. 120, n. 2, p. 273-282, 1989.

RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E.; COSTA, U. F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savanna Oxisols. **Soil Science**, v. 133, n. 6, p. 378-382, 1982.

RITCHEY, K. D.; SOUZA, D. M.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, v. 72, n. 1, p. 40-44, 1980.

ROCHA, A. T.; OLIVEIRA, A. C.; RODRIGUES, A. N.; LIRA, J. M. A.; FREIRE, F. J. Use of Araripe gypsum to improve sugarcane root environment. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, p. 307-312, 2008.

RODRIGHERO, M. B.; BARTH, G.; CAIRES, E. F. Surface application of lime with different magnesium contents and particle sizes under a no-till system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1723-1736, 2015.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C.; CANTARELLA, H.; LANDELL, M. G. A. Manejo conservacionista e reciclagem de nutrientes em cana-de-açúcar tendo em vista a colheita mecânica. **Informações Agronômicas**, 124, Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2008.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production

in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.

SÁ, M. A. C.; SANTOS, J. D. D. G.; FRANZ, C. A. B.; REIN, T. A. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entrelinhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1610-1622, 2016.

SASAKI, M.; YAMAMOTO, Y.; MATSUMOTO, H. Lignin deposition induced by aluminum in wheat (*Triticum aestivum*) roots. **Physiologia Plantarum**, v. 96, n. 2, p. 193-198, 1996.

SCARPARE, F. V.; HERNANDES, T. A. D.; RUIZ-CORRÊA, S. T.; KOLLN, O. T.; CASTRO GAVA, G. J.; SANTOS, L. N. S.; VICTORIA, R. L. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 4576-4584, 2016.

SERAFIM, M. E.; LIMA, J. M.; LIMA, V. M. P.; ZEVIANI, W. M.; PESSONI, P. T. Alterações físico-químicas e movimentação de íon sem Latossolo gibbsítico sob doses de gesso. **Bragantia**, v. 71, n. 1, p. 75-81, 2012.

SILVA-OLAYA, A. M.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. E. P.; ALLEN, D. J.; MELLO, F. F. C.; CERRI, C. C. Quantifying above and belowground biomass carbon inputs for sugar-cane production in Brazil. **Soil Research**, v. 55, n. 7, p. 640-648, 2017.

SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3, p. 169-183, 2005.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. Atributos químicos do solo decorrente da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 675-688, 2008b.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. Dolomite and phosphogypsum surface application effects on annual crops nutrition and yield. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 2, p. 261-270, 2008a.

SOUSA, D. M. G.; EDSON, L.; REIN, T. A. Uso do gesso agrícola nos solos do cerrado. **Circular Técnica**, 32, Planaltina: Embrapa, 2005. 19 p.

SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A. Manejo da fertilidade do solo para culturas anuais: experiências no cerrado. **Informações Agronômicas**, 126, Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2009. 1-7 p.

SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A.; NUNES, R. S.; SANTOS JUNIOR, J. D. G. Recomendações para a correção da acidez do solo para cana-de-açúcar no Cerrado. **Comunicado Técnico**, 177, Planaltina: Embrapa, 2015. 1-6 p.

SOUSA, D. M. G.; REIN, T. R.; LOBATO, E.; RITCHEY, K. D. Sugestões para a diagnose e recomendação de gesso em solos de Cerrado. In: **Anais Seminário sobre o uso do gesso na agricultura**, Uberaba, Brasil, 1992, p. 139-158.

SOUSA, D. M. G.; RITCHEY, K. D. Uso do gesso no solo de Cerrados. In: **Anais Seminário sobre o uso de fosfogesso na agricultura**, Brasília, Brasil, 1985, p. 119-144.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004.

SOUZA, F. R.; JUNIOR, E. J. R.; FIETZ, C. R.; BERGAMIN, A. C.; ROSA, Y. B. C. J.; ZEVIANI, W. M. Efeito do gesso nas propriedades químicas do solo sob dois sistemas de manejo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 5, p. 1717-1731, 2012.

SUMNER, M. E. Out of sight out of mind: subsurface factors in sugarcane yield decline. **South African Sugar Technologist Association**, v 84, p. 1–27, 2011.

SUMNER, M. E. Review of Brazilian research on subsoil acidity. **South African Sugar Technologist Association**, v. 85, p. 67-79, 2012.

TIECHER, T.; PIAS, O. H. D. C.; BAYER, C.; MARTINS, A. P.; DENARDIN, L. G. D. O.; ANGHINONI, I. Crop Response to Gypsum Application to Subtropical Soils Under No-Till in Brazil: a Systematic Review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 2018.

TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, M. D.; GAVA, G. J. C.; SARRIÉS, G. A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, 2002.

VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D.; JORGE, L. A. C.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 849-858, 2003.

VASCONCELOS, A. C. M.; GARCIA, J. C. Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. Cana-de-açúcar: Ambientes de produção. **Informações Agronômicas**, 110, Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2005.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, 2011.

VICENSI, M.; MÜLLER, M. M. L.; KAWAKAMI, J.; NASCIMENTO, R. D.; MICHALOVICZ, L.; LOPES, C. Do rates and splitting of phosphogypsum applications influence the soil and annual crops in a no-tillage system? **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Nutrient concentration in soil water extracts and soybean nutrition in response to lime and gypsum applications to an acid Oxisol under no-till system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 79, n. 2, p. 169-179, 2007.

ZANDONÁ, R. R.; BEUTLER, A. N.; BURG, G. M.; FARIAS BARRETO, C.; SCHMIDT, M. R. Gesso e calcário aumentam a produtividade e amenizam o efeito do déficit hídrico em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 2, 2015.

ZOCA, S. M.; PENN, C. An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture. **Advances in Agronomy**, v. 144, p. 1-44, 2017.

## **CAPÍTULO I**

# **EFEITO RESIDUAL DO GESSO NO CONDICIONAMENTO DO SUBSOLO, NUTRIÇÃO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR**

## 5 EFEITO RESIDUAL DO GESSO NO CONDICIONAMENTO DO SUBSOLO, NUTRIÇÃO E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR

### 5.1 RESUMO

A redução na produtividade, após sucessivas colheitas da cana-de-açúcar, pode tornar a manutenção do canavial inviável economicamente, necessitando de replantio, que representa elevado custo. Apesar de conhecidos os benefícios do gesso no condicionamento do subsolo, ainda há carência de informação sobre a duração dos seus efeitos nos atributos químicos do solo e produtividade de canaviais. Portanto, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efeito residual de doses de gesso nos atributos químicos do solo, na densidade de raízes e na produtividade em sete cortes da cana-de-açúcar. Um experimento foi conduzido numa área experimental localizada na Embrapa Cerrados, em Planaltina-DF, constituído por quatro doses de gesso (0; 0,5; 5 e 10 t ha<sup>-1</sup>), distribuídas em blocos casualizados, com quatro repetições. Aplicou-se o gesso a lanço na superfície do solo após o plantio da cana-de-açúcar, em julho de 2009. Após 13 e 87 meses da aplicação do gesso efetuou-se a amostragem do solo em camadas até 120 e 200 cm de profundidade, respectivamente, para a avaliação dos atributos químicos do solo: sulfato (S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), cálcio (Ca<sup>2+</sup>), magnésio (Mg<sup>2+</sup>) e saturação por alumínio (m). Também foi avaliada a densidade de massa seca de raízes após o primeiro e sétimo corte. Nos sete cortes foram avaliados os teores foliares de macronutrientes (N, P, K, S, Ca e Mg), produtividade de colmos, açúcares redutores totais (ART) e produtividade de colmos por total de água da precipitação pluviométrica e irrigação suplementar (PCTA). A aplicação de 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso incrementou os teores de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup> e reduziu a saturação por alumínio após 13 e 87 meses, com maiores intensidades nas camadas subsuperficiais do solo. Como consequência a este condicionamento químico das camadas subsuperficiais do solo, a densidade de massa seca de raízes após o primeiro e sétimo corte foi incrementada em 18 e 37% nas camadas de 0-120 e 0-200, respectivamente, em relação a ausência de aplicação do gesso. Além disso, os tratamentos com 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso aumentaram os teores foliares de S, Ca e N em relação aos tratamentos com 0 e 0,5 t ha<sup>-1</sup> de gesso. Como consequência do maior crescimento radicular e melhor nutrição da cana-de-açúcar, o uso do gesso proporcionou longo efeito residual, observado no incremento da produtividade de colmos, açúcares e PCTA mesmo após sete cultivos de cana-de-açúcar.

**Palavras-chave:** *Saccharum* spp., açúcares redutores totais, nutrição da cana, sistema radicular.

## 5.2 ABSTRACT

Although the benefits of gypsum for subsoil conditioning are known, there is still a lack of information regarding the duration of its effects on soil chemical attributes and sugarcane productivity. Therefore, the objective of this work was to evaluate the residual effect of gypsum doses on soil chemical attributes, root density and productivity in seven sugarcane crops. The experiment was conducted in an experimental area located at Embrapa Cerrados, in Planaltina, DF, Brazil. The experimental design consisted of four gypsum doses (0, 0.5, 5 and 10 t ha<sup>-1</sup>) distributed in randomized blocks with four replications. Gypsum was applied only one time to the soil surface after sugarcane planting in July 2009. After 13 and 87 months of gypsum application soil samples were collected from layers down to 120 and 200 cm deep, respectively, for evaluation of soil chemical attributes: sulfate (S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), calcium (Ca<sup>2+</sup>), magnesium (Mg<sup>2+</sup>) and aluminum saturation (m). Also, the root dry mass density was evaluated after the first and seventh sugarcane crops, in September 2010 and 2016, respectively. Leaf macronutrient concentrations (N, P, K, S, Ca and Mg), stalk yield and total reducing sugars (TRS) and stalk yield per total water from rainfall and supplemental irrigation (SYTW) were evaluated for the seven crops. The gypsum application of 5 t ha<sup>-1</sup> increased SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and Ca<sup>2+</sup> and reduced the aluminum saturation after 13 and 87 months, which were more pronounced in the subsurface layers. As a consequence of this chemical conditioning of the subsurface soil layers, the root dry mass density after the first and seventh sugarcane crops increased by 18 and 37% in the 0-120 and 0-200 layers, respectively, in relation to the absence of gypsum application. Furthermore, treatments with 5 and 10 t ha<sup>-1</sup> of gypsum increased the leaf contents of S, Ca and N in relation to treatments with 0 and 0.5 t ha<sup>-1</sup> of gypsum. As a consequence of the increased root growth and better nutrition of sugarcane, the use of gypsum provided a long residual effect, observed in the increase of stalk and sugar yields, as well as SYTW even after seven sugarcane harvests.

**Keywords:** *Saccharum* spp., total reducing sugars, sugarcane nutrition, root system.

### 5.3 INTRODUÇÃO

No Brasil, a cana-de-açúcar ocupa 8,7 milhões de hectares, o que representa 38% da área plantada com essa cultura no mundo (Faostat, 2016). Nos últimos 10 anos, a expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil foi de 2,5 milhões de hectares, com maior representatividade na região Centro-Sul (Conab, 2016), ocupando principalmente áreas sob pastagens (Rudorff et al., 2010; Adami et al., 2012). A produtividade média nesse mesmo período foi de 76 t ha<sup>-1</sup>, destinando-se em torno de 45% para a produção de açúcar e 55% para a produção de etanol (Conab, 2016).

A cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene, portanto permanece nos campos comerciais, em média, de três a seis ciclos, sendo necessário o replantio após esse período devido ao declínio na produtividade (Cheavegatti-Gianotto et al., 2011). A redução na produtividade, após sucessivas colheitas, pode tornar a manutenção do canavial inviável economicamente, ocorrendo a necessidade do replantio.

Para melhorar a eficiência econômica da produção de cana-de-açúcar torna-se necessário aumentar a longevidade dos canaviais por meio da manutenção de níveis adequados de produtividade nas soqueiras, uma vez que o replantio é um dos maiores custos associados a esse cultivo (Barros e Milan, 2010). Dentre os fatores que afetam a longevidade dos canaviais, se destacam as propriedades químicas do solo em superfície e subsuperfície (Landell et al., 2003) e a intensidade do déficit hídrico durante o crescimento da cultura (Dantas Neto et al., 2006; Monteiro e Sentelhas, 2017).

Grande parte da área cultivada com cana-de-açúcar na região Centro-Sul ocorre sob Latossolos (Cherubin et al., 2015), a maioria apresentando baixos teores de cálcio e elevada saturação por alumínio em superfície e subsuperfície (Sumner, 2012). Tais fatores prejudicam o desenvolvimento do sistema radicular de diversas culturas, devido ao papel fundamental do cálcio na divisão celular e crescimento dos meristemas apicais (Prado e Natale, 2004; Marschner, 2012). Adicionalmente, o cálcio possui baixa mobilidade nas plantas (White e Broadley, 2003) e o alumínio, em altas concentrações no solo, está associado a diversas anormalidades morfológicas e fisiológicas nos tecidos radiculares, resultando em menor absorção de água e nutrientes (Arunakumara et al., 2013).

No caso da cana-de-açúcar, as raízes desempenham papel essencial para o crescimento das soqueiras pois, após a colheita, a energia, água e os nutrientes necessários

para o rebrote serão fornecidos pelo sistema radicular, conforme mencionado por Trivelin et al. (2002). Além disso, o favorecimento do crescimento radicular para as camadas subsuperficiais do solo promove maior eficiência na absorção de água e nutrientes. Portanto, a restrição do sistema radicular às camadas superficiais do solo pode ocasionar a limitação da produtividade das soqueiras e, conseqüentemente, da longevidade dos canaviais (Sumner, 2011).

O cálcio proveniente do gesso, diferentemente do calcário, cujo ânion acompanhante (carbonato) é consumido na neutralização da acidez da camada superficial do solo, tem capacidade de atingir as camadas sub-superficiais do solo acompanhando a translocação do sulfato (Reeve e Sumner, 1972; Ritchey et al., 1980). Nesse sentido, trabalhos têm demonstrado o aumento na disponibilidade de cálcio e redução da saturação por alumínio das camadas mais profundas do solo devido a aplicação de gesso (Toma et al., 1999; Caires et al., 2011; Dalla Nora et al., 2014; Araújo et al., 2016), constituindo uma melhoria do ambiente radicular das camadas subsuperficiais do solo (Sumner, 2011).

Para culturas anuais sob sistema plantio direto, verifica-se prolongado efeito residual do gesso no aumento dos teores de enxofre (Caires et al., 2011) e redução da acidez potencial nas camadas subsuperficiais do solo (Souza et al., 2012). Ainda neste sistema, Pauletti et al. (2014) verificaram redução da saturação por alumínio e incrementos nos teores de cálcio, após 36 e 72 meses da aplicação de gesso, proporcionando o aumento da produtividade de milho e soja. Além disso, Dalla Nora et al. (2014) relataram que a combinação de calcário e gesso proporcionou melhoria das propriedades químicas das camadas superficiais e subsuperficiais do solo após seis meses da aplicação, efeito que se intensificou após 22 meses, propiciando incrementos de produtividade para soja e milho.

Apesar dos diversos trabalhos com sistemas de cultivo com culturas anuais, ainda são escassos os estudos sobre o efeito residual de doses de gesso nos atributos químicos do solo e na produtividade da cana-de-açúcar. Carvalho et al. (2013) verificaram efeito positivo da aplicação combinada de gesso e vinhaça no aumento da saturação por bases e teor de sulfato e na redução dos componentes da acidez das camadas subsuperficiais do solo já após 6 meses da aplicação desses produtos. Relacionado à melhoria nas propriedades químicas do subsolo após 20 meses da aplicação de gesso, Lima et al. (2013) observaram incrementos na produção de açúcar e colmos para o primeiro e segundo corte de cana-de-açúcar, respectivamente. Portanto, este trabalho foi realizado com o objetivo

de avaliar o efeito residual de doses de gesso nos atributos químicos do solo, na densidade de raízes, nutrição e produtividade em sete cortes da cana-de-açúcar.

## 5.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.4.1 Descrição e manejo da área experimental

O experimento foi conduzido em área experimental localizada na Embrapa Cerrados, em Planaltina - DF (latitude 15° 36' S, longitude de 47° 42' W e altitude de 1014 m). O clima é do tipo Cwa segundo a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), com precipitação média anual de 1.500 mm e temperatura média anual de 21,3 °C. A vegetação original era Cerrado sentido restrito e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (Embrapa, 2013), contendo 660 g kg<sup>-1</sup> de argila. A composição mineralógica da fração argila do horizonte diagnóstico do solo estudado consistiu de: caulinita (634 g kg<sup>-1</sup>); gibbsita (195 g kg<sup>-1</sup>); hematita (108 g kg<sup>-1</sup>); e goethita (61 g kg<sup>-1</sup>) (Rein, 2008).

A área experimental havia sido desmatada há aproximadamente 35 anos, mantida sob vegetação espontânea com predominância de gramíneas (*Brachiaria decumbens* e *Andropogon gayanus*) e ausência de animais em pastejo. Em outubro de 2008 a área foi dividida em quatro parcelas e amostrada nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm para a determinação dos atributos químicos do solo que são apresentados na Tabela 5-1.

**Tabela 5-1:** Características químicas do solo antes da correção e da adubação da área experimental<sup>(1)</sup>.

Camada cm	pH <sub>H2O</sub>	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	CTC	m <sup>a</sup>	V	MO <sup>b</sup>	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	P
		-----		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----		---- % ----	----	g kg <sup>-1</sup>	-----	mg dm <sup>-3</sup> ----
0 a 20	4,9	1,16	0,19	0,06	0,09	8,6	77	4	24	4,4	0,8
20 a 40	5,0	0,93	0,27	0,02	0,05	6,9	73	5	18	3,4	0,6
40 a 60	5,0	0,61	0,16	0,01	0,03	5,5	75	4	14	2,8	0,5

<sup>(1)</sup> Segundo os métodos descritos em Embrapa (1997), valores médios, n = 4; <sup>a</sup>Saturação por alumínio; <sup>b</sup>Matéria orgânica do solo.

Em fevereiro de 2009 as doses de corretivos e fertilizantes foram definidas conforme Sousa e Lobato (2004). O calcário dolomítico (CaO 36% e MgO 17%) foi aplicado manualmente na dose de 7,0 Mg ha<sup>-1</sup> (PRNT de 100%), requerida para elevar a 50% a saturação por bases do solo na camada de 0-40 cm, incorporado com grade aradora na profundidade de aproximadamente 20 cm, seguida de aração com arado de aivecas na

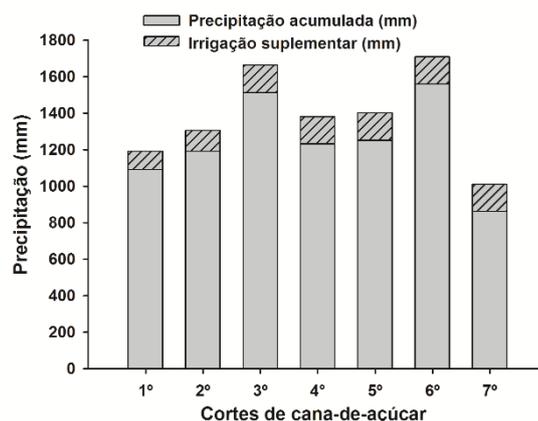
profundidade de aproximadamente 40 cm. Para a adubação corretiva foram aplicados a lanço o termofosfato magnésiano ( $240 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $93 \text{ kg ha}^{-1}$  de Mg), cloreto de potássio ( $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ ) e, como fonte de micronutrientes,  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  (fritted trace elements - FTE BR 10), sendo então incorporados ao solo com grade aradora na profundidade de 20 cm.

Em março de 2009 a área do experimento foi semeada com *Crotalaria juncea* (20 sementes por metro e espaçamento de 45 cm entrelinhas), prática largamente adotada na região Centro-Sul por ocasião da renovação de canaviais. O adubo verde foi cortado com roçadeira picadora na fase de florescimento.

A cana-de-açúcar, variedade RB867515, foi plantada em julho de 2009, na estação seca. A área foi sulcada na profundidade de aproximadamente 40 cm e adubada no sulco com ureia ( $42 \text{ kg ha}^{-1}$  de N) e superfosfato triplo ( $183 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ). As mudas utilizadas de cana planta, com idade de nove meses, foram provenientes de multiplicação efetuada na área experimental da Embrapa Cerrados. Assim, foram plantados três colmos paralelos no sistema “pé com ponta”, para garantir a brotação de pelo menos 12 gemas por metro linear.

Os tratamentos com gesso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) foram aplicados a lanço na superfície do solo após o plantio da cana-de-açúcar. A dose do gesso foi calculada conforme a expressão  $[Y=75X]$ , em que Y é a dose de gesso úmido (base 15% de enxofre) expressa em  $\text{kg ha}^{-1}$ , e X é o teor de argila (%) na camada de 40-60 cm conforme recomendação oficial para cultivos perenes na região do Cerrado, prescrita por Sousa e Lobato (2004). Portanto, a dose recomendada de gesso para o solo desse experimento foi de  $5 \text{ t ha}^{-1}$  sendo os tratamentos 0; 0,1; 1,0 e 2,0 vezes a dose recomendada. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com 4 repetições. As parcelas experimentais, com  $60 \text{ m}^2$  consistem de 5 linhas de 8 m de comprimento, espaçadas em 1,5 m.

Realizaram-se quatro irrigações por aspersão (irrigação suplementar) cada uma de 25 mm para proporcionar a brotação das gemas após o plantio e incorporação do gesso ao solo (Figura 5-1). Em novembro de 2009 foi realizada a adubação de cobertura para a cana-de-açúcar com ureia ( $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de N) e cloreto de potássio ( $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ ).



**Figura 5-1:** Precipitações pluviométricas acumuladas e irrigações suplementares ocorridas durante cada cultivo (corte) da cana-de-açúcar (primeiro, segundo, terceiro, quarto, quinto, sexto e sétimo corte).

A colheita da cana planta (primeiro corte) foi efetuada manualmente, sem despalha à fogo em agosto de 2010. Para propiciar o pleno rebrote da soqueira realizou-se irrigação suplementar, prática comum na região para cana-de-açúcar colhida durante a estação seca. Desta forma, aplicou-se duas lâminas de 57 mm cada, uma e duas semanas após a colheita (Figura 5-1). Adubação de manutenção da primeira soca (segundo corte) foi realizada com nitrato de amônio ( $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de N) e cloreto de potássio ( $150 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ ) e efetuada em novembro de 2010 no início da estação chuvosa.

**Tabela 5-2:** Fontes e doses de nutrientes (N,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) utilizados para a adubação de manutenção para o terceiro, quarto, quinto, sexto e sétimo cortes de cana-de-açúcar.

Corte cana-de-açúcar	Fonte	Dose <sup>(1)</sup> – $\text{kg ha}^{-1}$ (N, $\text{K}_2\text{O}$ e $\text{P}_2\text{O}_5$ )
3º, 4º e 5º	Nitrato de amônio	120
	Cloreto de potássio	150
	Fosfato monoamônico	50
6º	Nitrato de amônio	150
	Cloreto de potássio	200
	Fosfato monoamônico	50
7º	Nitrato de amônio	225
	Cloreto de potássio	400
	Fosfato monoamônico	50

<sup>(1)</sup> Conforme Sousa e Lobato (2004).

A colheita do segundo corte ocorreu em agosto de 2011, seguida pela fragmentação da palha de cana-de-açúcar depositada no solo com utilização de roçadeira do tipo trituradora. Essa operação foi realizada com o propósito de fragmentar a palha da

cana, simulando o que ocorreria na colheita mecanizada comercial. A adubação de manutenção realizada para o terceiro, quarto, quinto, sexto e sétimo cortes encontram-se na Tabela 5-2. Em relação a colheita dos cortes posteriores da cana-de-açúcar (terceiro, quarto, quinto, sexto e sétimo), foram sempre efetuadas no mês de agosto com posterior fragmentação da palha de cana-de-açúcar depositada no solo. As irrigações suplementares ocorreram durante o primeiro mês após cada corte (Figura 5-1), composta de três irrigações de 50 mm a cada duas semanas, para garantir a rebrota.

#### 5.4.2 Amostragem e determinação das propriedades químicas do solo

A primeira amostragem do solo foi efetuada em setembro de 2010, um mês após a colheita do primeiro corte da cana-de-açúcar (cana-planta), nos tratamentos com 0; 0,5; 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso, em oito camadas de 15 cm, até 120 cm de profundidade, utilizando-se o trado holandês. Para compor uma amostra composta foram coletadas, na área útil de cada parcela, cinco sub-amostras, de forma aleatória, no centro da entre-linha (a 75 cm de distância da linha de plantio).

A segunda amostragem do solo foi realizada em setembro de 2016, um mês após o sétimo corte nos tratamentos com 0; 0,5; 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso, em dez camadas de 20 cm, até 200 cm de profundidade, utilizando-se o trado holandês. Para cada amostra composta foram coletadas nove sub-amostras, três em cada uma das posições de 20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, em três linhas.

Para a realização das análises químicas do solo, as amostras foram homogeneizadas, secas ao ar e passadas em peneira de malha 2 mm. Na determinação dos teores de cálcio (Ca<sup>2+</sup>), magnésio (Mg<sup>2+</sup>) e alumínio trocáveis (Al<sup>3+</sup>) foi utilizado como extrator o cloreto de potássio 1 mol L<sup>-1</sup>, sendo o Ca<sup>2+</sup> e o Mg<sup>2+</sup> determinados por espectrometria de absorção atômica (Shimadzu AA-6300) e o Al<sup>3+</sup> por titulação com solução de hidróxido de sódio 0,01 mol L<sup>-1</sup>. O enxofre (S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) foi extraído com fosfato de cálcio monobásico monohidratado 0,01 mol L<sup>-1</sup>, na relação solo:solução, 1:5 e quantificado por espectroscopia de emissão atômica com plasma de argônio indutivamente acoplado (Thermo Scientific iCAP 6000). Para o cálculo da saturação por alumínio [m, % = (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup>) / Al<sup>3+</sup>] foram determinados os teores de potássio (K<sup>+</sup>) utilizando-se o extrator Mehlich-1 e a determinação por espectrofotometria de chama.

#### 5.4.3 Amostragem e determinação da massa seca de raízes

A primeira amostragem de raízes foi efetuada em setembro de 2010, um mês após a colheita da cana-planta, nos tratamentos com 0 e 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso, em oito camadas de 15 cm, até 120 cm de profundidade utilizando-se o trado tipo caneco, com 10 cm de diâmetro interno. As avaliações foram efetuadas, retirando-se duas sub-amostras à 20 cm da linha de plantio da cana-de-açúcar.

A segunda amostragem de raízes foi realizada em setembro de 2016, um mês após o sétimo corte, nos tratamentos com 0 e 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso, em 10 camadas de 20 cm, até 200 cm de profundidade, utilizando-se o mesmo trado tipo caneco, com 10 cm de diâmetro interno. Foram retiradas três sub-amostras à 20 cm da linha de plantio da cana-de-açúcar.

Nos dois períodos de amostragem, as raízes foram separadas do solo por dispersão em água em recipiente de 10 L, desfazendo-se manualmente os agregados para a separação do solo das raízes. Posterior a isso, as raízes eram capturadas em peneira de malha de 0,5 mm e acondicionadas em sacos plásticos para o armazenamento em geladeira (4 °C). Após isso, procedeu-se em laboratório uma limpeza minuciosa das raízes, sendo essas dispostas em bandejas com água para a coleta de pequenas impurezas com pinça e novamente capturadas em peneira (malha 0,5 mm). Estes procedimentos foram adaptados a partir de Böhm (1979). Em seguida, as raízes foram secas em estufa a 65°C, e, posteriormente, quantificada a massa de matéria seca de raízes. A densidade de massa seca de raízes foi calculada pela relação entre a massa de raízes e o volume de solo amostrado em cada profundidade, sendo expressa em g dm<sup>-3</sup>.

#### 5.4.4 Diagnóstico do estado nutricional e produtividade de colmos

Nos sete cultivos da cana-de-açúcar, na fase de máximo desenvolvimento vegetativo, no mês de fevereiro, foram coletadas folhas-diagnóstico para a determinação dos macronutrientes (S, Ca, Mg, N, P e K) em todas as doses de gesso (0; 0,5; 5 e 10 t ha<sup>-1</sup>). Foram coletadas vinte folhas recém expandidas com lígula visível (folha +1) da área útil da parcela, para compor uma amostra composta. De cada folha foi utilizado apenas o terço médio (20 cm centrais), excluída a nervura central.

As amostras de tecido foliar foram secas em estufa com circulação forçada de ar (65 °C) até atingirem massa constante, sendo, posteriormente, moídas em moinho de facas e encaminhadas para as análises dos teores de macronutrientes. O método Kjeldahl foi utilizado para a determinação do nitrogênio, procedendo-se a digestão da amostra com

ácido sulfúrico, peróxido de hidrogênio e catalizadores, seguido de destilação e dosagem por titulação com ácido sulfúrico (0,025 mol L<sup>-1</sup>). Para a determinação dos demais macronutrientes (P, K, Ca, Mg e S), procedeu-se a digestão com ácido nítrico e peróxido de hidrogênio, seguida pela dosagem em espectroscopia de emissão atômica com plasma de argônio indutivamente acoplado (Thermo Scientific iCAP 6000).

A produtividade de colmos industriais por hectare dos sete cortes da cana-de-açúcar foi determinada a partir do corte e pesagem da área útil da parcela, que consistiu das 3 linhas centrais, com 5 m de comprimento, após exclusão de 1,5 m em cada extremidade da parcela, totalizando 22,5 m<sup>2</sup>. Teores de açúcares foram determinados para amostras de dez colmos, e expressos como açúcares redutores totais (ART) conforme os protocolos do Consecana (2006).

Para o cálculo da produtividade de colmos por total de água (PCTA) foi considerada a relação entre a produtividade de colmos e a precipitação total mais a irrigação suplementar ocorrida durante cada ciclo (cana-planta e socas), calculada de acordo com a equação:

$$\text{PCTA (kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}) = \text{produtividade de colmos (kg ha}^{-1}) / (\text{total de precipitação} + \text{irrigação suplementar) (mm)}.$$

#### 5.4.5 Análise estatística

Os resultados dos atributos químicos do solo em cada camada, densidade de massa seca de raízes, teores de macronutrientes foliares, produtividade de colmos, ART e PCTA foram submetidos à análise de variância (ANOVA) utilizando-se o teste F. Foram verificados os pressupostos da análise de variância, pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett.

A ANOVA foi realizada utilizando-se o PROC GLM do software SAS 9.1 (Statistical Analysis System) e quando apresentada significância estatística o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) foi utilizado para distinção das médias.

As significâncias dos modelos de regressão entre doses de gesso e produtividade acumulada de colmos e ART, nos setes cortes da cana-de-açúcar, foram avaliadas estatisticamente utilizando-se o *software* SAS 9.1.

## 5.5 RESULTADOS

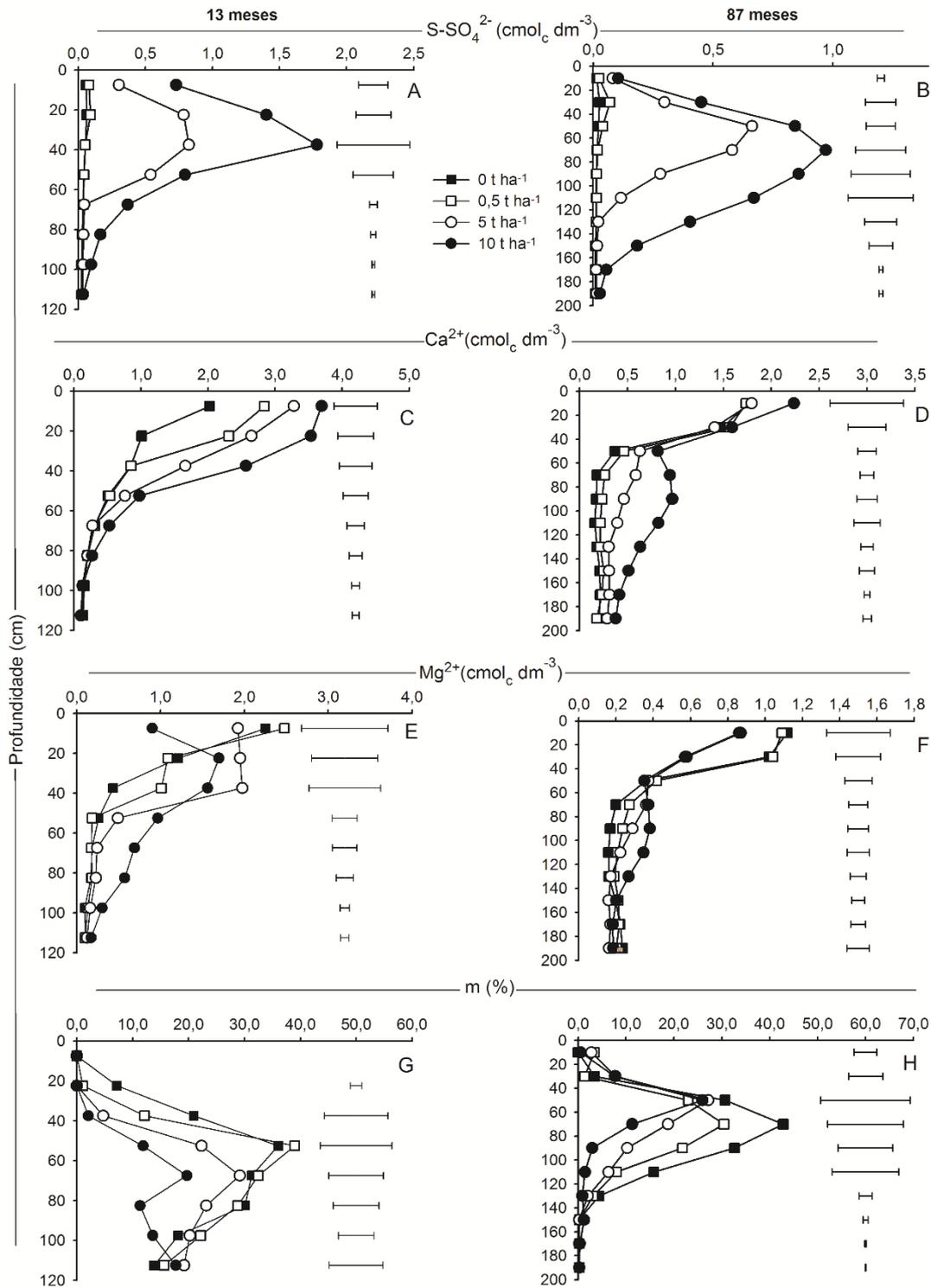
### 5.5.1 Propriedades químicas do solo e densidade de massa seca de raízes

O rápido efeito inicial da aplicação de gesso foi verificado no aumento dos teores de  $S-SO_4^{2-}$  e  $Ca^{2+}$  e redução na saturação por alumínio no perfil do solo após 13 meses da sua aplicação. Com a dose de  $5\text{ t ha}^{-1}$  houve aumento nos teores de  $S-SO_4^{2-}$  até 60 cm, enquanto a dose de  $10\text{ t ha}^{-1}$  promoveu esse incremento até 105 cm de profundidade em relação as doses de 0 e  $0,5\text{ t ha}^{-1}$  (Figura 5-2a). De forma semelhante, as doses de 5 e  $10\text{ t ha}^{-1}$  promoveram incremento nos teores de  $Ca^{2+}$  na camada de 0-45 cm em relação aos tratamentos de 0 e  $0,5\text{ t ha}^{-1}$ , observado aos 13 meses da aplicação (Figura 5-2c). Por sua vez, foi observada a diminuição da saturação por alumínio nas camadas de 30-60 e 30-90 cm do solo, para a aplicação de 5 e  $10\text{ t ha}^{-1}$  de gesso respectivamente, em relação ao tratamento controle (Figura 5-2g).

Além de seu rápido efeito inicial, a utilização do gesso apresenta elevado efeito residual, observado pela manutenção dos maiores teores de  $S-SO_4^{2-}$  e  $Ca^{2+}$  e redução na saturação por alumínio em profundidade no solo mesmo após 87 meses de sua aplicação. Tais aumentos nos teores de  $S-SO_4^{2-}$  e  $Ca^{2+}$  atingiram 100 cm para a dose de  $5\text{ t ha}^{-1}$  e 200 cm para a dose de  $10\text{ t ha}^{-1}$  (Figuras 5-2b e 5-2d). Por sua vez, a redução na saturação por alumínio nos tratamentos de 5 e  $10\text{ t ha}^{-1}$  de gesso atingiu 100 e 140 cm de profundidade, respectivamente em comparação ao tratamento controle (Figura 5-2h).

Além do  $S-SO_4^{2-}$  e  $Ca^{2+}$  contidos no gesso, este insumo afeta a distribuição no solo de outros nutrientes, especialmente quando aplicado em elevadas doses, conforme verificado nas Figuras 5-2e e 5-2f, onde a dose de  $10\text{ t ha}^{-1}$  de gesso promoveu maior movimentação do  $Mg^{2+}$  para as camadas subsuperficiais do solo, em relação aos demais tratamentos. Tal movimentação foi observada aos 13 meses da aplicação de  $10\text{ t ha}^{-1}$  de gesso, devido a redução dos teores de  $Mg^{2+}$  na camada de 0-15 cm e como consequência, o aumento nos teores nas camadas abaixo de 45 cm (Figura 5-2e). Aos 87 meses, comparando ao tratamento controle ( $0\text{ t ha}^{-1}$  de gesso), a aplicação de  $5\text{ t ha}^{-1}$  de gesso proporcionou o incremento dos teores de  $Mg^{2+}$  na camada de 60-100 cm, associado a sua redução nas camadas superficiais, na mesma comparação, a dose de  $10\text{ t ha}^{-1}$  de gesso resultou num incremento dos teores de  $Mg^{2+}$  na camada de 80-140 cm, associado a um decréscimo nas camadas superficiais (Figura 5-2f).

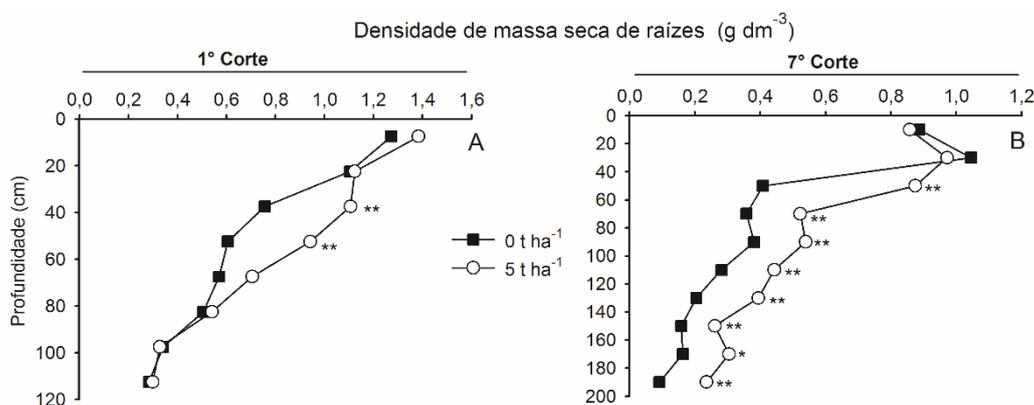
No caso do potássio ( $K^+$ ) trocável, seus teores no perfil do solo não foram influenciados pelas doses de gesso (dados não apresentados).



**Figura 5-2:** Teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (A e B), Ca<sup>2+</sup> trocável (C e D), Mg<sup>2+</sup> trocável (E e F) e saturação por alumínio (m%) (G e H) em amostras de solo 13 (A, C, E e G) e 87 meses (B, D, F e H) após a aplicação do gesso no plantio da cana-de-açúcar. Barras horizontais representam a diferença mínima significativa pelo teste de Tukey (p<0,05).

Respondendo positivamente a melhoria do ambiente químico com a aplicação de 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso a densidade de massa seca de raízes aumentou em 18% em relação ao controle após o primeiro corte da cana-de-açúcar na camada de 0-120 cm. Os maiores incrementos na densidade de massa seca de raízes foram observados nas camadas de 30-45 e 45-60 cm com acréscimos de 46 e 56%, respectivamente (Figura 5-3a).

Verificou-se efeito residual da melhoria do ambiente químico promovido pelo gesso na densidade de raízes. Este foi bem pronunciado após o sétimo corte da cana, com aumento em 37% na densidade de raízes no perfil de solo (0-200 cm) com a aplicação de 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso na cana-planta. Tais ganhos ocorreram nas camadas abaixo de 40 cm de profundidade, proporcionando incrementos de 41 a 157% na densidade de massa seca de raízes (Figura 5-3b).



**Figura 5-3:** Densidade de massa seca de raízes (g dm<sup>-3</sup>) após o primeiro (A) e o sétimo corte da cana-de-açúcar (B) em resposta a aplicação de gesso no plantio. \*\*, \* Significativo pelo teste de Tukey p ≤ 0,05 e p ≤ 0,1, respectivamente.

### 5.5.2 Teores foliares de macronutrientes e produtividade por total de água

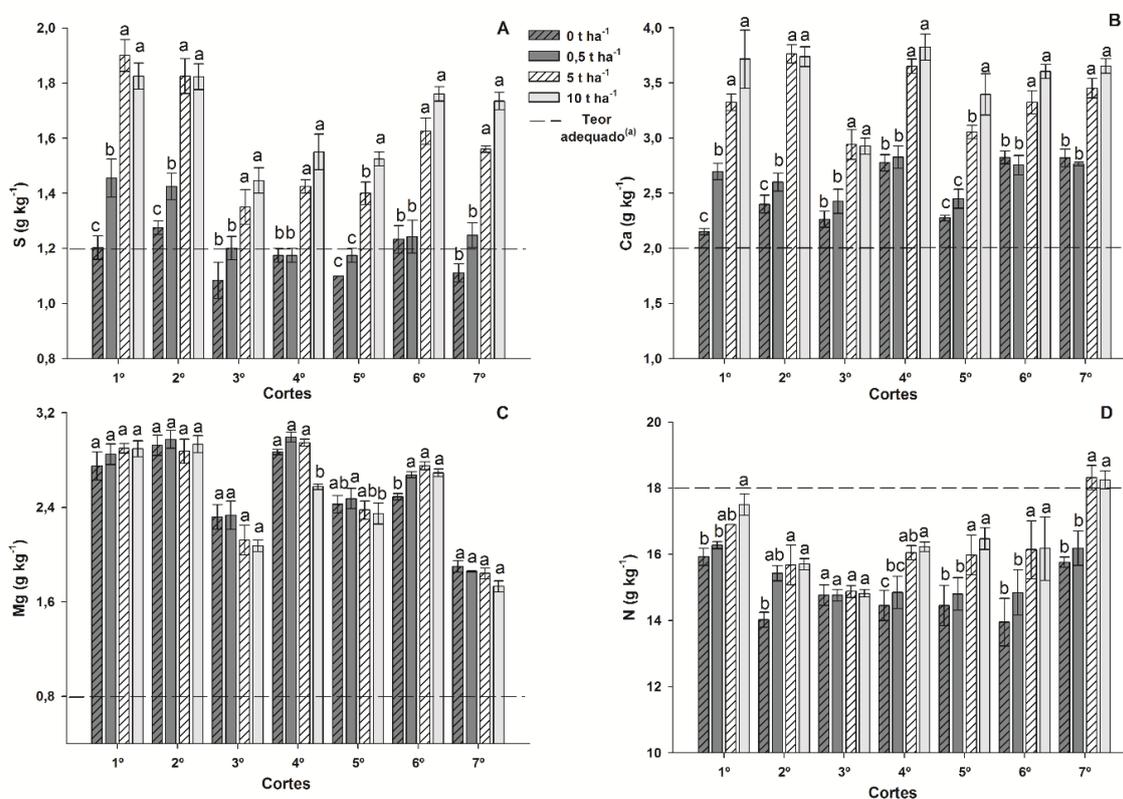
As doses de 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso proporcionaram teores foliares adequados de macronutrientes ao longo dos sete cortes da cana-de-açúcar, com exceção do nitrogênio (Figura 5-4).

Os teores foliares de enxofre (S) nos sete cortes da cana-de-açúcar sob doses de gesso variaram de 1,1 a 1,9 g kg<sup>-1</sup> (Figura 5-4a). Em todos os cortes as doses de 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso proporcionaram maiores teores de S foliar em relação as doses de 0 e 0,5 t ha<sup>-1</sup> (p ≤ 0,05). Por sua vez, apenas no quinto corte houve diferença no teor de S foliar entre as duas maiores doses de gesso, com 10 t ha<sup>-1</sup> apresentando valores estatisticamente

superiores a dose recomendada ( $5 \text{ t ha}^{-1}$ ).

As doses de 5 e  $10 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso também proporcionaram maiores teores foliares de Ca em todos os cortes da cana-de-açúcar em relação aos tratamentos de 0 e  $0,5 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso ( $p \leq 0,05$ ). Esses últimos tratamentos apresentaram teores semelhantes de Ca do terceiro ao sétimo corte, enquanto no primeiro e segundo cortes os teores foram superiores para o tratamento com  $0,5 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso.

As doses de gesso não promoveram alterações nos teores foliares de magnésio (Mg) no primeiro, segundo, terceiro e sétimo corte da cana-de-açúcar (Figura 5-4c). No entanto, no quarto e quinto corte ocorreu uma redução nos teores foliares de Mg para o tratamento com  $10 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso em relação à aplicação de  $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ .

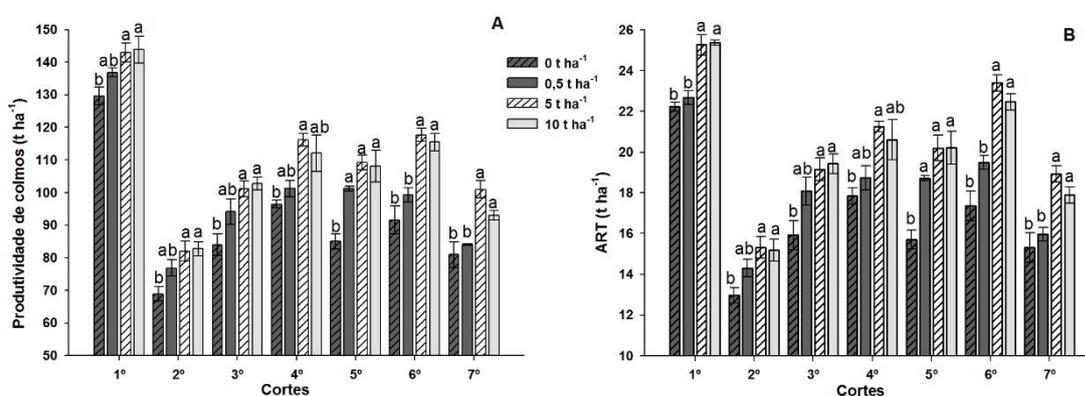


**Figura 5-4:** Teores foliares de enxofre (A), cálcio (B), magnésio (C) e nitrogênio (D) em sete cortes de cana-de-açúcar após a aplicação dos tratamentos com gesso (0; 0,5, 5 e  $10 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso) no plantio. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Barras verticais representam o erro-padrão da média. Linhas tracejadas representam teores adequados segundo Raij et al. (1996).

Os teores foliares de nitrogênio (N) variaram de  $14,0$  a  $18,3 \text{ g kg}^{-1}$  (Figura 5-4d). Os tratamentos com a aplicação de 5 e  $10 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso resultaram em aumento dos

teores de N em relação as doses de 0 e 0,5 t ha<sup>-1</sup> na maioria dos cortes avaliados, com exceção do terceiro, que apresentou teores semelhantes de N foliar para todas as doses de gesso. No entanto, apenas no sétimo corte os teores foliares de N foram considerados adequados (Raij et al 1996), nos tratamentos de 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso.

As doses de gesso não alteraram os teores foliares de fósforo (P) e potássio (K) nos sete cortes da cana-de-açúcar, cujos teores médios para os quatro tratamentos e sete cortes foram de 1,67; 1,72; 1,68 e 1,68 e 10,3; 10,3; 10,1 e 10,3, respectivamente (dados não apresentados).



**Figura 5-5:** Produtividades de colmos (A) e açúcares redutores totais (ART) (B) em sete cortes de cana-de-açúcar, após a aplicação dos tratamentos com gesso (0; 0,5, 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso) no plantio. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente pelo teste de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Barras verticais representam o erro-padrão da média.

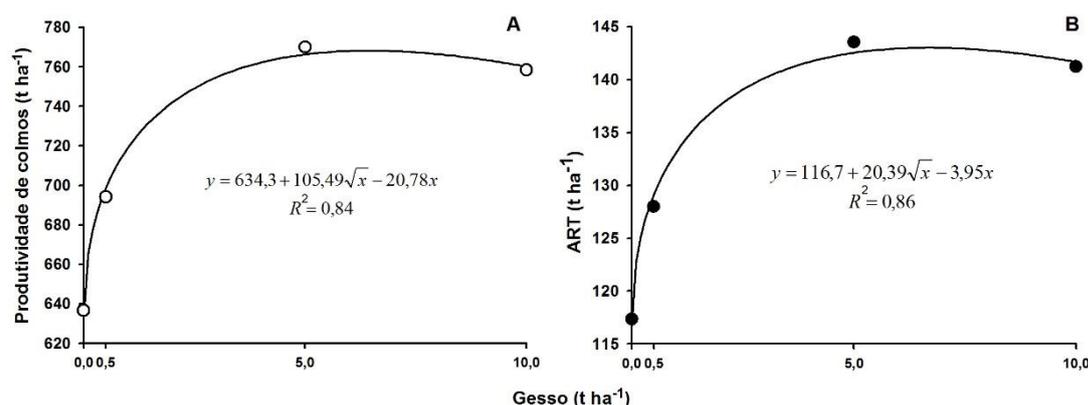
De maneira geral a aplicação de gesso nas doses de 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> promoveu maiores produtividades de colmos e de açúcares redutores totais (ART) comparadas ao controle (Figura 5-5). Esse efeito permaneceu nos sete cortes da cana-de-açúcar. No primeiro corte da cana-de-açúcar a produtividade de colmos variou de 129,7 a 143,9 t ha<sup>-1</sup> e nos demais cortes de 68,9 a 117,7 t ha<sup>-1</sup> (Figura 5-5a). A dose de 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso aumentou a produtividade de colmos em relação ao tratamento controle em 10, 19, 20, 20, 29, 28 e 25%, avaliado do primeiro ao sétimo corte, respectivamente. Além disso, as produtividades observadas para a dose recomendada (5 t ha<sup>-1</sup>) foram semelhantes ao tratamento com 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso para todos os cortes avaliados. A produtividade média de colmos dos sete cortes obtida com a dose de 0,5 t ha<sup>-1</sup> de gesso foi 9% superior em relação ao controle, sendo as diferenças entre estes dois tratamentos significativas

(Tukey,  $p \leq 0,05$ ) apenas no quinto corte.

A produtividade de açúcares redutores totais (ART) variou de 13,0 a 25,4 t ha<sup>-1</sup> para os setes cortes da cana-de-açúcar em função de doses de gesso (Figura 5-5b). Os menores valores de ART foram observados para o segundo corte (13,0 a 15,2 t ha<sup>-1</sup>) e os maiores para o primeiro corte da cana-de-açúcar (22,2 a 25,4 t ha<sup>-1</sup>). Comparado ao tratamento controle, a aplicação de 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso incrementou em 14, 18, 20, 19, 29, 35 e 24% a produção de ART do primeiro ao sétimo corte da cana-de-açúcar, respectivamente. Não foram observadas diferenças na produção de ART para os sete cortes da cana-de-açúcar entre os tratamentos com 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso.

Considerando as produtividades de colmos acumuladas nos sete cortes, as doses de gesso de 0,5, 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> promoveram incrementos de 9, 22 e 20%, respectivamente, em relação a não aplicação deste insumo (Figura 5-6a). Os ganhos observados na produtividade acumulada de ART foram equivalentes aos da produtividade de colmos de 9, 22 e 20% nas doses de 0,5; 5 e 10 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, em relação ao tratamento controle (Figura 5-6b).

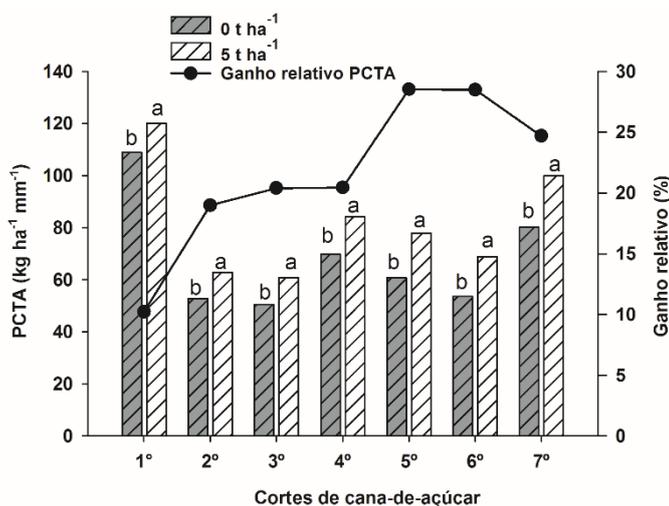
Os ganhos na produtividade de açúcares com a aplicação de gesso refletem basicamente o seu efeito na produtividade de colmos, já que em nenhum dos cortes houve efeito significativo ( $p \leq 0,05$ ) dos tratamentos sobre os teores de açúcares expressos em kg de ART por tonelada de colmos.



**Figura 5-6:** Produtividades de colmos (A) e açúcares redutores totais (ART) (B) acumulada em sete cortes de cana-de-açúcar, após a aplicação dos tratamentos com gesso (0, 0,5, 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso) no plantio. Equações de regressão (e coeficientes de determinação) obtidos com os dados das quatro repetições.

Como consequência do incremento em produtividade, a aplicação de 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso favoreceu a eficiência de uso da água expressa pela produtividade de colmos por total de água recebida por precipitação pluviométrica e irrigação suplementar (PCTA) em todos os cortes avaliados, com ganhos variando entre 10 e 20 kg ha<sup>-1</sup> de colmos por mm<sup>-1</sup> de água, em relação ao tratamento controle (Figura 5-7). O maior ganho médio de PCTA foi obtido no sétimo corte da cana, onde o uso do gesso propiciou o ganho de 20 kg ha<sup>-1</sup> de colmos mm<sup>-1</sup> de água, comparados ao tratamento controle. Nesse corte, ocorreu a menor precipitação (1.010 mm) entre os sete cortes considerados, nos quais a média foi de 1.441 mm, ou seja, uma diferença de 431 mm (Figura 5-1).

De modo geral, observa-se uma tendência de aumento do ganho relativo do PCTA comparando-se os tratamentos com e sem gesso, com valores de 10% no primeiro corte, 20% na média do segundo a quarto corte e 27% para a média do quinto ao sétimo corte.



**Figura 5-7:** Produtividade de colmos por total de água (PCTA) em sete cortes de cana-de-açúcar nos tratamentos com 0 e 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso e ganhos relativos na PCTA devido ao uso de 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso. Médias seguidas de letras distintas diferem significativamente pelo teste de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

## 5.6 DISCUSSÃO

### 5.6.1 Propriedades químicas do solo e densidade de massa seca de raízes

O pronunciado efeito residual do gesso é decorrente da adsorção do S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> nas camadas subsuperficiais do solo (Ritchey et al., 1980), devido ao menor pH e menores teores de matéria orgânica nessas camadas, o que resulta em maior desenvolvimento de

cargas positivas do solo, maior adsorção do  $S-SO_4^{2-}$  e adsorção concomitante de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  (Marcano-Martinez e McBride, 1989). Assim, os maiores teores desse ânion nos tratamentos de 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso na camada de 40-120 cm em relação à camada de 0-40 cm do solo (Figura 5.2a e 5-2 b) é ocasionada pela aplicação do calcário, que promove aumento no pH (Soratto e Crusciol, 2008), como também do maior teor de matéria orgânica e do ânion fosfato dos fertilizantes fosfatados que reduz a adsorção de  $S-SO_4^{2-}$  nas camadas superficiais do solo. A precipitação acumulada após a aplicação do gesso, 1190 e 5538 mm para a primeira e segunda amostragem do solo, permitiu a movimentação do  $S-SO_4^{2-}$  (Michalovicz et al., 2014).

A movimentação do  $S-SO_4^{2-}$  no perfil do solo aos 13 e 87 meses após a aplicação de 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso (Figuras 5-2a e 5-2b), corrobora a recomendação de gesso baseada no teor de argila do solo para culturas perenes (Sousa e Lobato, 2004), uma vez que considera a correção de uma camada de 60 cm de solo, que somada a camada de 40 cm onde o calcário foi incorporado totalizam um perfil corrigido de 100 cm.

Os maiores teores de  $Ca^{2+}$  nas camadas subsuperficiais do solo devido à aplicação de 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso, mesmo após 87 meses (Figuras 5-2c e 5-2d), demonstram o seu prolongado efeito residual no condicionamento químico das camadas subsuperficiais do solo e estão associados à sua movimentação como íon acompanhante do  $S-SO_4^{2-}$  (Reeve e Sumner, 1972; Ritchey et al., 1980), promovendo maior disponibilidade desse nutriente para o crescimento radicular (Blum et al., 2012; Dalla Nora et al., 2014; Pauletti et al., 2014). Conforme relatado por Sousa et al. (1992), para que não ocorra restrição ao crescimento de raízes, são necessários em torno de 0,5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de  $Ca^{2+}$ . Portanto, a aplicação da dose recomendada de gesso possibilitou o alcance de tais teores na camada de 0-100 cm do solo após 87 meses da sua aplicação, corroborando tanto a eficácia da recomendação como também o efeito residual do gesso na melhoria do subsolo (Figura 5-2d).

No entanto, quando utilizadas doses elevadas de gesso, como 10 t ha<sup>-1</sup>, que é o dobro da dose recomendada para esse solo, conforme Sousa e Lobato (2004), ocorre maior intensidade na movimentação de outros cátions no perfil do solo, principalmente o  $Mg^{2+}$  (Figuras 5-2e e 5-2f), o que pode ocasionar problemas de suprimento deste nutriente. Resultado semelhante foi encontrado por Caires et al., (1999) em estudo conduzido em Latossolo Vermelho de textura média, onde observaram redução dos teores de  $Mg^{2+}$  na camada de 0-20 cm e consequente aumento nos teores na camada de 20-60 cm após 14 meses da aplicação de 12 t ha<sup>-1</sup> de gesso.

A distribuição do  $Mg^{2+}$  no perfil do solo promovida por doses elevadas de gesso decorre da reação de troca catiônica com  $Ca^{2+}$  proveniente da dissolução do produto, levando ao aumento no seu teor na solução do solo e a translocação como cátion acompanhante do  $S-SO_4^{2-}$  (Pavan e Volkweiss, 1985). Além disso, a movimentação é mais acentuada na presença de maiores teores de  $Mg^{2+}$  no solo (Caires et al., 1998).

A partir dos teores de  $Mg^{2+}$  (Figuras 5-2e e 5-2f) calculou-se as suas quantidades presentes no perfil do solo aos 13 e 87 meses (dados não apresentados). Comparando-se os tratamentos 0 e 10 t  $ha^{-1}$  de gesso, aos 13 meses as quantidades de  $Mg^{2+}$  no perfil do solo foram, respectivamente, 4,7 e 6,9  $cmol_c dm^{-3}$  na camada de 0-120 cm, e 3,8 e 3,7  $cmol_c dm^{-3}$  aos 87 meses na camada de 0-200 cm. A maior quantidade de  $Mg^{2+}$  encontrada para o tratamento com 10 t  $ha^{-1}$  de gesso aos 13 meses reflete o “efeito do íon comum” proporcionado pelo sulfato de cálcio retardando a dissolução do carbonato de cálcio e favorecendo a do carbonato de magnésio presente no calcário dolomítico.

O efeito do gesso na redução da saturação por alumínio (m), que ocorreu já após 13 meses de sua aplicação, persistiu mesmo após sete cortes da cana-de-açúcar (Figuras 5-2g e 5-2h), corroborando com Pauletti et al. (2014), que também verificaram longo efeito residual do gesso na redução do valor de m na camada 60 a 80 cm de Latossolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa sob cultivo de soja, após 72 meses da aplicação de 1,5 t  $ha^{-1}$  gesso. Essa redução no valor de saturação por alumínio observada para as doses de 5 e 10 t  $ha^{-1}$  de gesso aos 13 e 87 meses da aplicação, está associada ao aumento dos teores das bases trocáveis ( $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ ) no perfil do solo (Figuras 5-2c, 5-2d, 5-2e e 5-2f) e a pequena redução nos teores de alumínio trocável (Araújo et al., 2016). Conforme observado em diversos trabalhos, o uso do gesso pode reduzir os teores de alumínio trocável do solo (Caires et al., 1999; Carvalho et al., 2013; Crusciol et al., 2014), seja pelo efeito da troca de ligantes entre o  $S-SO_4^{2-}$  e a  $OH^-$ , elevando o pH do solo, conhecido como “autocalagem” (Reeve e Sumner, 1972), como pela lixiviação de alumínio devido a formação do par iônico  $AlSO_4^+$  (Pavan e Volkweiss, 1985).

Associado à melhoria das propriedades químicas no perfil do solo, os incrementos das raízes da cana-de-açúcar observados após o primeiro e sétimo corte (Figuras 5-3a e 5-3b) foram mais expressivos nas camadas abaixo de 40 cm de profundidade. A ausência de efeito na camada de 0-40 cm do solo possivelmente está associada as condições favoráveis ao crescimento radicular devido a incorporação profunda de calcário antes do plantio da cana-de-açúcar, o que propiciou baixa saturação por alumínio e teores de  $Ca^{2+}$  superiores a 1,0  $cmol_c dm^{-3}$ , possibilitando desenvolvimento radicular semelhante na

camada arável sem aplicação do gesso.

Por sua vez, os aumentos nos teores de  $S-SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  e a redução da saturação por alumínio nas camadas mais profundas do solo devido ao uso do gesso (Figura 5-2) são mantidos por longos períodos devido à aplicação de gesso associado à alta capacidade de adsorção de  $S-SO_4^{2-}$  dos Latossolos argilosos e outros solos altamente intemperizados (Toma et al., 1999; Caires et al., 2011; Pauletti et al., 2014). Isso favoreceu o incremento da densidade de massa seca de raízes da cana-de-açúcar (Figura 5-3), efeito que atingiu maiores profundidades ao longo do tempo. Melhor distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar no perfil do solo em resposta ao uso do gesso foi também verificada por Rocha et al. (2008), para as camadas abaixo dos 40 cm de profundidade.

A longevidade do efeito do gesso no solo tem como resultado o maior aprofundamento radicular, favorecendo maior eficiência na absorção de nutrientes, como enxofre, cálcio e nitrogênio (Figuras 5-4a, 5-4b e 5-4d), o que possivelmente tem favorecido a manutenção de elevadas produtividades nos sete cortes da cultura (Figura 5-5).

#### 5.6.2 Teores foliares de macronutrientes e produtividade por total de água

Os teores foliares de S observados para os tratamentos de 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> para todos os cortes da cana-de-açúcar estão dentro dos teores indicados para a cana-de-açúcar, que variam de 1,2 a 2,0 g kg<sup>-1</sup> (Raij et al., 1996) (Figura 5-4a). Esses resultados demonstram o prolongado efeito do gesso no suprimento de S às plantas, com manutenção de níveis adequados durante sete cortes da cana-de-açúcar. Alguns trabalhos têm mostrado o aumento das concentrações de S foliar devido a aplicação de gesso na cana-de-açúcar (Viator et al., 2002), trigo (Caires et al., 2002) e feijão (Crusciol et al., 2016), que estão associados a presença desse elemento no gesso. Por outro lado, os teores no limite inferior daqueles indicados como adequados nos tratamentos de 0 e 0,5 t ha<sup>-1</sup> estão associados a menor disponibilidade desse nutriente em tais tratamentos.

De forma semelhante ao S, os maiores teores de foliares de Ca nos tratamentos de 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso estão associados a maior disponibilidade desse nutriente no perfil do solo, contribuindo para à melhor nutrição da planta, pois o Ca não apresenta mobilidade via floema nas plantas, sendo importante a maior disponibilidade desse nutriente no perfil do solo para o crescimento radicular nas camadas subsuperficiais. O Ca é o terceiro macronutriente mais exportado pela cana-de-açúcar (Coleti et al., 2006;

Franco et al., 2007). Viator et al. (2002) e Carvalho et al. (2013) também verificaram maiores teores foliares de Ca sob aplicação de gesso em cana-de-açúcar, devido a maior disponibilidade desse nutriente no solo.

Os menores teores foliares de Mg para o tratamento com 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso, observados no quarto corte em relação aos demais e no quinto corte em relação a dose de 0,5 t ha<sup>-1</sup> (Figura 5-4c), podem estar relacionados a maior translocação do Mg<sup>2+</sup> da camada superficial e à maior relação Ca/Mg do solo devido a aplicação da maior dose de gesso, proporcionando maior absorção de Ca em detrimento do Mg. Conforme, observado por Medeiros et al. (2008), o aumento da absorção de Ca, devido a maiores relações Ca/Mg do solo, reduziu a absorção de Mg pelo milho.

Contudo, os teores de Mg foliares nos sete cortes da cana-de-açúcar, independente do tratamento se mantiveram bem acima do nível crítico de 0,8 g kg<sup>-1</sup> (Raij et al., 1996). Apesar disso, no sétimo corte foi observado uma redução de 45% dos teores de Mg, em relação à média dos demais cortes. A adubação de manutenção com maior dose de K (Tabela 5-2) para esse corte provavelmente ocasionou a redução da absorção de Mg<sup>2+</sup>. Tendência semelhante foi observada por Rosolem et al. (1984), que verificaram menores teores foliares de Mg no sorgo sob maiores doses de adubação potássica.

O aumento dos teores foliares de N nas doses de 5 e 10 t ha<sup>-1</sup> de gesso em relação a não aplicação (Figura 5-4d) pode estar relacionado ao aumento da densidade de raízes nas camadas subsuperficiais, conforme observado na figura 5-3, favorecendo a maior eficiência de absorção do fertilizante nitrogenado, pois o nitrato apresenta grande mobilidade no perfil do solo. Caires et al. (2016) relataram melhoria na eficiência de uso de N devido à maior absorção de nitrato do subsolo como resultado do aumento do comprimento da raiz do milho após o uso de gesso. Além disso, ocorre sinergismo no processo de absorção de N e S na cana-de-açúcar (Franco et al., 2007), com a deficiência de S reduzindo a absorção e assimilação de N pelas plantas (Prosser et al., 2001; Bouranis et al., 2014).

O condicionamento das camadas subsuperficiais do solo devido a aplicação de 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso (Figura 5-2) propiciou maior crescimento radicular (Figura 5-3) e melhor absorção de nutrientes (Figura 5-4), o que justifica os incrementos médios de produtividade de colmos e ART nos sete cortes, em relação as doses de 0 e 0,5 t ha<sup>-1</sup> (Figura 5-5). Contudo, parte significativa dos ganhos de produtividade propiciadas pelo gesso pode ser atribuído ao seu efeito como fonte de enxofre, nutriente deficiente neste solo para as culturas em geral. A menor dose aplicada, 0,5 t ha<sup>-1</sup> de gesso

(aproximadamente 75 kg ha<sup>-1</sup> de S), insuficiente para promover alterações significativas nas propriedades químicas das camadas subsuperficiais, propiciou aumento na produtividade acumulada de colmos de 11 t ha<sup>-1</sup> em relação ao tratamento sem gesso (Figura 5-6). Este ganho em produtividade corresponde a 40% do ganho verificado com a dose recomenda de 5 t ha<sup>-1</sup>.

As respostas ao gesso aumentaram com o tempo, com ganhos médios na produtividade de colmos nos períodos do segundo ao quarto cortes e do quinto ao sétimo cortes de 19 e 27%, respectivamente (Figura 5-5). Provavelmente os maiores incrementos observados no segundo período estão associados à exaustão do sulfato do solo no tratamento sem gesso e ao maior crescimento radicular nas camadas subsuperficiais com gesso verificado com o passar dos cultivos, como sugere a comparação da densidade de massa seca das raízes no sétimo corte, em relação ao primeiro corte (Figuras 5-3a e 5-3b). Com maior quantidade e melhor distribuição das raízes em profundidade, além da energia e nutrientes acumulados nos tecidos radiculares, favorecendo uma melhor rebrota (Trivelin et al., 2002; Tavares et al., 2010), se tem a possibilidade de utilizar melhor os nutrientes aplicados ao solo, com destaque ao N, Ca e S, como indicado na figura 5-4.

Considerando-se o preço médio do ART de R\$ 0,50 kg<sup>-1</sup> e o custo de 5 t de gesso posto na propriedade e aplicado ao solo (R\$ 1.000,00), a margem bruta de lucro devido a aplicação de gesso (5 t ha<sup>-1</sup>) foi de R\$ 12.000,00. Essa avaliação foi feita obtendo a diferença da produção de ART de sete cortes da cana dos tratamentos com a dose de gesso recomendada e sem gesso (26,2 t ha<sup>-1</sup>). Com isso foi obtido nesse período um retorno de R\$ 12,0 para cada R\$ 1,00 investido em gesso.

Considerando que o déficit hídrico é o principal fator que limita a produtividade da cana no Brasil (Monteiro e Sentelhas, 2017), a melhor produtividade de colmos por total de água (PCTA) obtida após a aplicação de gesso habilita essa tecnologia como uma alternativa de manejo que pode ser indicada para minimizar as perdas em função do déficit hídrico (Figura 5-7). Parte dos ganhos na PCTA obtidos nos períodos do primeiro ao terceiro cortes e do quarto ao sétimo cortes para a produção de colmos pode ser atribuída ao enxofre como nutriente (42%), obtido comparando-se os tratamentos 0 e 0,5 t ha<sup>-1</sup> e parte ao aprofundamento do sistema radicular da cana devido aplicação do gesso como condicionador do solo (58%), obtido comparando-se os tratamentos 0,5 e 5 t ha<sup>-1</sup>. Além disso, o maior ganho de PCTA devido ao uso do gesso foi obtido sob a menor precipitação (sétimo corte) (Figura 5-7), evidenciando a importância desta tecnologia, especialmente em anos de maior restrição hídrica.

## 5.7 CONCLUSÕES

O uso de gesso resultou na melhoria da qualidade química do subsolo, expressa no aumento do S-SO<sub>4</sub><sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e redução da saturação por alumínio. Esse efeito aumenta com a dose de gesso e persiste ao longo do tempo, com efeito residual de pelo menos 87 meses após a aplicação deste insumo.

Em resposta a melhoria do subsolo, a densidade de massa seca de raízes foi incrementada já após o primeiro corte na dose de gesso recomendada, atingindo maiores profundidades com o tempo e favorecendo maior eficiência na absorção de nutrientes, especialmente N, Ca e S.

Maior produtividade da cana-de-açúcar foi proporcionada pelo efeito residual do gesso, com retorno econômico ocorrendo na dose recomendada para este solo segundo critério adotado na região.

## 5.8 REFERÊNCIAS

ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, R. M.; AGUIAR, D. A.; SUGAWARA, L. M.; MELLO, M. P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane. **Sustainability**, v. 4, n. 4, p. 574-585, 2012.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ARAÚJO, L. G.; FIGUEIREDO, C. C.; SOUSA, D. M. G.; SOUZA NUNES, R.; REIN, T. A. Influence of gypsum application on sugarcane yield and soil chemical properties in the brazilian Cerrado. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 11, p. 1557, 2016.

ARUNAKUMARA, K. K. I. U.; WALPOLA, B. C.; YOON, M. H. Aluminum toxicity and tolerance mechanism in cereals and legumes - A review. **Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry**, v. 56, n. 1, p. 1-9, 2013.

BARROS, F. F.; MILAN, M. Qualidade operacional do plantio de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 221-229, 2010.

- BÖHM, W. Methods of studying root systems. Springer-Verlag: New York, 1979.
- BLUM, J.; HERPIN, U.; MELFI, A. J.; MONTES, C. R. Soil properties in a sugarcane plantation after the application of treated sewage effluent and phosphogypsum in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 115, p. 203-216, 2012.
- BOURANIS, D. L.; DIONIAS, A.; CHORIANOPOULOU, S. N.; LIAKOPOULOS, G.; NIKOLOPOULOS, D. Distribution profiles and interrelations of stomatal conductance, transpiration rate and water dynamics in young maize laminae under nitrogen deprivation. **American Journal of Plant Sciences**, v. 5, n. 05, p. 659, 2014.
- CAIRES, E. F.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 27-34, 1998.
- CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, 1999.
- CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 2, p. 357-364, 2002.
- CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 45-53, 2011.
- CAIRES, E. F.; ZARDO FILHO, R.; BARTH, G.; JORIS, H. A. Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO<sub>3</sub>-N in subsoil. **Pedosphere**, v. 26, n. 4, p. 474-485, 2016.
- CARVALHO, J. M.; ANDREOTTI, M.; BUZETTI, S.; CARVALHO, M. D. P. Produtividade de cana soca sem queima em função do uso de gesso e vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, p. 1-9, 2013

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A.; ABREU, H. M. C.; ARRUDA, P.; BESPALHOK FILHO, J. C.; BURNQUIST, W. L.; CRESTE, S.; DI CIERO, L.; FERRO, J. Á.; FIGUEIRA, A. V. O.; FILGUEIRAS, T. S.; GROSSI-DE-SÁ, M. F.; GUZZO, E. C.; HOFFMANN, H. P.; LANDELL, M. G.A.; MACEDO, N.; MATSUOKA, S.; REINACH, F. C.; ROMANO, E.; SILVA, W. J.; SILVA FILHO, M. C.; ULIAN, E. C. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A reference study for the regulation of genetically modified cultivars in Brazil. **Tropical plant biology**, v. 4, n. 1, p. 62-89, 2011.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; CERRI, C. E. P.; SILVA OLIVEIRA, D. M.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. C. Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils—effects of land use change on soil chemical attributes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 211, p. 173-184, 2015.

COLETI, J. T.; CASAGRANDE, J. C.; STUPIELLO, J. J.; RIBEIRO, L. O.; OLIVEIRA, G. R. Remoção de macronutrientes pela cultura da cana-planta e cana-soca em Argissolos, variedades RB 835486 e SP 81-3250. **Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 24, n. 5, p. 32-36, 2006.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica das safras**. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&> > Acesso em: 25 out 2016.

CRUSCIOL, C. A. C.; FOLTRAN, R.; ROSSATO, O. B.; MCCRAY, J. M.; ROSSETTO, R. Effects of surface application of calcium-magnesium silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, p. 1843-1854, 2014.

CRUSCIOL, C. A.; ARTIGIANI, A. C.; ARF, O.; CARMEIS FILHO, A. C.; SORATTO, R. P.; NASCENTE, A. S.; ALVAREZ, R. C. Surface Application of lime–silicate–phosphogypsum mixtures for improving tropical soil properties and irrigated common bean yield. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 4, p. 930-942, 2016.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C.; BORTOLOTTI, R. P.; FERREIRA, A. O.; REICHARDT, K. Subsoil chemical amelioration and crop yields under continuous long-term no-till in a subtropical Oxisol. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 45, p. 3338-3349, 2014.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L. D. C.; FARIAS, C. D.; AZEVEDO, H. D.; AZEVEDO, C. D. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e ambiental**, v. 10, n. 2, p. 283-288, 2006

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa Sistema de Informação: Brasília, 2013.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS. **Crops**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>> Acesso em: 25 out 2016.

FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O. Macronutrients accumulation in sugarcane crop related to nitrogen fertilization and cultural residues incorporated to the soil at planting. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 669-674, 2007.

LANDELL, M. G. D. A., PRADO, H. D., VASCONCELOS, A. C. M. D., PERECIN, D., ROSSETTO, R., BIDOIA, M. A. P., SILVA, M. A.; XAVIER, M. A. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 4, p. 741-745, 2003.

LIMA, R. C.; MELLO, L. M.; YANO, É. H.; SILVA, J. O.; CESARIN, A. L. Modalities for soil preparation and gypsum application in Ultisol: stem productivity of sugarcane. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 6, p. 1180-1190, 2013.

MARCANO-MARTINEZ, E.; MCBRIDE, M. B. Calcium and sulfate retention by two Oxisols of the Brazilian Cerrado. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 1, p. 63-69, 1989.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Academic Press: London, 2012.

MEDEIROS, J. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, Á. L.; DALLA ROSA, J.; COLPO GATIBONI, L. Relação cálcio: magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Álico. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 4, 2008.

MICHALOVICZ, L.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S.; KAWAKAMI, J.; NASCIMENTO, R. D.; KRAMER, L. F. M. Soil fertility, nutrition and yield of maize and barley with gypsum application on soil surface in no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 5, p. 1496-1505, 2014.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap: can it be determined at national level with a simple agrometeorological model? **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 3, p. 272-284, 2017.

PAULETTI, V.; PIERRI, L. D.; RANZAN, T.; BARTH, G.; MOTTA, A. C. V. Long-term effects of the application of gypsum and lime in a no-till system. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 38, n. 2, p. 495-505, 2014.

PAVAN, M. A.; VOLKWEISS, S. J. Efeitos do gesso nas relações solo - planta: princípios. In: **Anais Seminário sobre o uso do fosfogesso na agricultura**, Brasília, Brasil, 1985, 107-118 p.

PRADO, R. M.; NATALE, W. Calagem na nutrição de cálcio e no desenvolvimento do sistema radicular da goiabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 10, p. 1007-1012, 2004.

PROSSER, I. M.; PURVES, J. V.; SAKER, L. R.; CLARKSON, D. T. Rapid disruption of nitrogen metabolism and nitrate transport in spinach plants deprived of sulphate. **Journal of Experimental Botany**, v. 52, n. 354, p. 113-121, 2001.

RAIJ, B VAN.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, Instituto Agrônômico: Campinas, 1996.

REEVE, N. G.; SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface-applied amendments. **Agrochemophysica**, v. 4, n. 1, p. 1-5, 1972.

REIN, T. A. Surface chemical properties and nitrate adsorption of Oxisols from the Brazilian savannas. 2008. 509 p. (Tese doutorado), Cornell University, New York.

RITCHEY, K. D.; SOUZA, D. M.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, v. 72, n. 1, p. 40-44, 1980.

ROCHA, A. T.; OLIVEIRA, A. C.; RODRIGUES, A. N.; LIRA, J. M. A.; FREIRE, F. J. Use of Araripe gypsum to improve sugarcane root environment. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 3, p. 307-312, 2008.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; BRINHOLI, O. Efeito das relações Ca/Mg, Ca/K e Mg/K do solo na produção de sorgo sacarino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 12, p. 1443-1448, 1984.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M. A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo State (Brazil) using Landsat data. **Remote sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057-1076, 2010.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Métodos de determinação de cálcio e magnésio trocáveis e estimativa do calcário residual em um Latossolo submetido à aplicação de calcário e gesso em superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 663-673, 2008.

SOUSA, D. M. G.; REIN, T. R.; LOBATO, E.; RITCHEY, K. D. Sugestões para a diagnose e recomendação de gesso em solos de Cerrado. In: **Anais Seminário sobre o uso do gesso na agricultura**, Uberaba, Brasil, 1992, p. 139-158.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004.

SOUZA, F. R.; JUNIOR, E. J. R.; FIETZ, C. R.; BERGAMIN, A. C.; ROSA, Y. B. C. J.; ZEVIANI, W. M. Efeito do gesso nas propriedades químicas do solo sob dois sistemas de manejo. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 5, p. 1717-1731, 2012.

SUMNER, M. E. Out of sight out of mind: subsurface factors in sugarcane yield decline. *Proceedings of the South African Sugar Technology Association*, v. 84, p. 1-27, 2011.

SUMNER, M. E. Review of Brazilian research on subsoil acidity. *Proceedings of the South African Sugar Technology Association*, v. 85, p. 67-79, 2012.

TAVARES, O. C. H.; LIMA, E.; ZONTA, E. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. **Acta Scientiarum: Biological Sciences**, v. 32, n. 1, 2010.

TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, M. D.; GAVA, G. J. C.; SARRIÉS, G. A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduo da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, 2002.

TOMA, M.; SUMNER, M. E.; WEEKS, G.; SAIGUSA, M. Long-term effects of gypsum on crop yield and subsoil chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 4, p. 891-895, 1999.

VIATOR, R. P.; KOVAR, J. L.; HALLMARK, W. B. Gypsum and compost effects on sugarcane root growth, yield, and plant nutrients. **Agronomy journal**, v. 94, n. 6, p. 1332-1336, 2002.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Calcium in plants. **Annals of Botany**, v. 92, n. 4, p. 487-511, 2003.

## **CAPÍTULO II**

# **DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE RAÍZES DE CANA-DE- AÇÚCAR E SUA RELAÇÃO COM ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO SOB EFEITO DO GESSO**

## 6 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE RAÍZES DE CANA-DE-AÇÚCAR E SUA RELAÇÃO COM ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM LATOSSOLO SOB EFEITO DO GESSO

### 6.1 RESUMO

O cultivo de cana-de-açúcar no Brasil está predominantemente localizado na região Centro-Sul onde ocorre com frequência déficit hídrico, decorrente da prolongada estação seca e dos períodos de estiagem durante a estação chuvosa. Dessa forma o déficit hídrico prejudica a produtividade dos cultivos agrícolas. Além disso, os solos apresentam acidez e baixa disponibilidade de nutrientes em todo o perfil. Portanto, a aplicação do gesso, como condicionador do solo para o crescimento radicular em profundidade tem sido uma prática estabelecida. Apesar disso, são poucos os estudos voltados para a compreensão do efeito do gesso na distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em camadas mais profundas do solo. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do gesso na distribuição horizontal e em profundidade do sistema radicular da cana-de-açúcar e nos atributos químicos em um Latossolo do Cerrado. Para tanto, um experimento foi realizado sob o delineamento de blocos completos casualizados com quatro repetições, com dois tratamentos selecionados para o presente estudo: controle (sem gesso) e com gesso ( $5 \text{ t ha}^{-1}$ ). Após 87 meses da aplicação do gesso, no sétimo corte da cultura, efetuou-se a coleta de solo na profundidade de 0-200 cm, em camadas de 20 em 20 cm, em três posições laterais de amostragem na entrelinha em relação às linhas de plantio (20, 47,5 e 75 cm). Nessas amostras de solo também foram determinados os teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{S-SO}_4^{2-}$  e  $\text{Al}^{3+}$ , assim como os atributos radiculares: densidade de comprimento, diâmetro e conteúdo de fibras no tecido. O uso do gesso promoveu a melhoria das propriedades químicas do solo nas camadas subsuperficiais (40-200 cm) e posições amostrais. Essa melhoria proporcionou maior densidade de comprimento radicular e menor diâmetro radicular, bem como conteúdo de fibras, sendo o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{S-SO}_4^{2-}$  as principais variáveis que contribuíram para esse desempenho dos atributos radiculares. A posição de amostragem próxima a linha de plantio diferiu das demais posições avaliadas, associado a maior presença do  $\text{Al}^{3+}$ .

**Palavras-chave:** comprimento radicular, fibras, alumínio, Cerrado, *Saccharum* spp.

## 6.2 ABSTRACT

Sugarcane cultivation in Brazil is predominantly located in the south-central regions of the country where water deficit occurs due to the prolonged dry season and drought during the rainy season, impairing the productivity of agricultural crops. In addition, the soils present in general acidity and low availability of nutrients throughout the profile. Therefore, the application of gypsum as a soil conditioner for root growth in depth has been an established practice. Despite this, few studies have focused on understanding the effect of gypsum on the distribution of the root system of sugarcane in the deeper soil layers. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of gypsum on the horizontal and deep distribution of the sugarcane root system and chemical attributes in a Cerrado Latosol. Therefore, an experiment was conducted in a randomized complete blocks design with four replications, with two selected treatments: control (without gypsum) and gypsum ( $5 \text{ t ha}^{-1}$ ). After 87 months of gypsum application, at the seventh harvest, soil was collected at 0-200 cm depth, in layers of 20 in 20 cm, in three horizontal sampling positions relation to the crop rows (20, 47.5 and 75 cm).  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{S-SO}_4^{2-}$  and  $\text{Al}^{3+}$  contents were also determined, as well as the root attributes: length density, diameter and fiber content. The use of gypsum improved the soil chemical properties throughout the profile and sample positions. This improvement provided higher root length density and smaller root diameter as well as fiber content being  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{S-SO}_4^{2-}$  the main variables that contributed to this performance of the root attributes. The position next plant line differ from the other measured positions, associated with increased of  $\text{Al}^{3+}$ .

**Keywords:** root length, fibers, aluminum, Cerrado, *Saccharum* spp.

### 6.3 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido pela Índia e China (FAO, 2018). Na última safra agrícola brasileira a produção de cana-de-açúcar foi de 633 milhões de toneladas, onde 45,4% foi destinada para a geração de açúcar e 54,6% para o etanol (Conab, 2018). No caso do etanol obtido da cana-de-açúcar o balanço energético é mais positivo quando comparado com outros cultivos agrícolas, como a beterraba e milho (Goldemberg et al., 2008).

A região Centro-Sul é a principal responsável pela produção de cana-de-açúcar no Brasil (Adami et al., 2012), que está predominantemente localizada no bioma Cerrado. Nessa região o regime pluviométrico é caracterizado como sazonal, com estação seca prolongada, e com a ocorrência de períodos de estiagem durante a estação chuvosa (Assad et al., 1993; Silva et al., 2008), ocasionando o alto risco de estresse hídrico para os cultivos agrícolas. No caso da cana-de-açúcar o déficit hídrico é o principal fator responsável pela perda em produtividade (Monteiro e Sentelhas, 2017).

Além do déficit hídrico que reduz o potencial produtivo da cana-de-açúcar (Hernandes et al., 2013), os solos do Cerrado são altamente intemperizados com elevada acidez, toxidez por  $Al^{3+}$  e baixos teores de  $Ca^{2+}$  nas camadas mais profundas do solo (Fageria e Baligar, 2011; Lopes e Guilherme, 2016). Portanto, como consequência a isso, ocorre a limitação do desenvolvimento do sistema radicular dos cultivos agrícolas, o que prejudica a absorção de água e nutrientes (Ritchey et al., 1980; Carvalho e Rajj, 1997).

O desenvolvimento do sistema radicular e suas implicações na absorção de água e nutrientes ao longo do perfil do solo tem importante participação na produtividade da cana-de-açúcar (Smith, 2005). No caso da absorção de água, a densidade de comprimento radicular e volume de solo ocupado determinam a capacidade de absorção de água das plantas (Newman, 1969; Battie Laclau e Laclau, 2009). Portanto, é essencial garantir o crescimento do sistema radicular da cana-de-açúcar para as camadas mais profundas do solo, favorecendo a utilização da água disponível, quando sob estresse hídrico (Matsuoka e Garcia, 2011). No entanto, a distribuição das raízes de cana-de-açúcar no solo é dependente das características genéticas e do ambiente de cultivo (Vasconcelos e Casagrande, 2008; Battie Laclau e Laclau, 2009).

Dentre os fatores relacionados aos ambientes de cultivo, os teores de  $Ca^{2+}$  e  $Al^{3+}$  nas camadas superficiais e subsuperficiais do solo interfere diretamente na distribuição e crescimento das raízes. O  $Ca^{2+}$  é essencial para o alongamento das raízes e possui baixa mobilidade nas plantas (White e Broadley, 2003; Hawkesford et al., 2012), enquanto a

presença do  $\text{Al}^{3+}$  no solo provoca alterações morfológicas e fisiológicas negativas no sistema radicular (Sasaki et al., 1996; Arunakumara et al., 2013). Dessa forma, alguns trabalhos têm sido conduzidos nos solos do Cerrado com a aplicação de gesso, com a finalidade de redução da toxidez por  $\text{Al}^{3+}$  e o aumento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  nas camadas subsuperficiais do solo (Ritchey et al., 1980; Araújo et al., 2016; Costa e Crusciol, 2016). Esse efeito do gesso está associado à sua maior solubilidade em relação ao calcário (Zoca e Penn, 2017) e também à longa permanência do íon acompanhante  $\text{S-SO}_4^{2-}$  no perfil dos Latossolos e outros solos tropicais altamente intemperizados (Ritchey et al., 1980; Pavan et al., 1984; Sousa e Lobato, 2004; Araújo et al., 2018).

Portanto, devido a melhoria das propriedades químicas das camadas subsuperficiais do solo pelo uso do gesso ocorre um ambiente mais favorável ao crescimento radicular (Clemente et al., 2017). No entanto, são poucos os estudos voltados para a compreensão da distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em camadas mais profundas do solo (Otto et al., 2009; Matsuoka e Garcia, 2011; Barbosa et al., 2018). Também são escassas as informações sobre a distribuição horizontal e em profundidade de raízes e de atributos radiculares de cana-de-açúcar sob efeito do gesso. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar a influência do gesso na distribuição espacial dos atributos radiculares e sua relação com propriedades químicas do solo.

## 6.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 6.4.1 Descrição e manejo da área experimental

O experimento foi conduzido em área experimental localizada na Embrapa Cerrados, em Planaltina - DF (latitude  $15^{\circ} 36' \text{ S}$ , longitude de  $47^{\circ} 42' \text{ W}$  e altitude de 1014 m). O clima é do tipo Cwa segundo a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), com precipitação média anual de 1.500 mm e temperatura média anual de  $21,3^{\circ} \text{C}$ . A vegetação original era Cerrado sentido restrito e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (Embrapa, 2013), contendo  $660 \text{ g kg}^{-1}$  de argila (clayey red Latosol - fine, mixed, isohyperthermic Rhodic Haplustox). A composição mineralógica da fração argila do horizonte diagnóstico do solo estudado consistiu de: caulinita ( $634 \text{ g kg}^{-1}$ ); gibbsita ( $195 \text{ g kg}^{-1}$ ); hematita ( $108 \text{ g kg}^{-1}$ ); e goethita ( $61 \text{ g kg}^{-1}$ ) (Rein, 2008).

Após o corte da vegetação nativa, a área experimental foi mantida sob vegetação espontânea com predominância de gramíneas forrageiras (*Brachiaria decumbens* e *Andropogon gayanus*) por 35 anos. Em outubro de 2008 amostras de solo foram coletadas

na área nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm para a determinação dos atributos químicos do solo que são apresentados na Tabela 6-1.

**Tabela 6-1:** Características químicas do solo antes da correção e da adubação da área experimental<sup>(1)</sup>.

Camada	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	CTC <sup>a</sup>	m <sup>b</sup>	V	MO <sup>c</sup>	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	P <sup>d</sup>
cm		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					---- % ----		g kg <sup>-1</sup>	--- mg dm <sup>-3</sup> ---	
0 a 20	4,9	1,16	0,19	0,06	0,09	8,6	77	4	24	4,4	0,8
20 a 40	5,0	0,93	0,27	0,02	0,05	6,9	73	5	18	3,4	0,6
40 a 60	5,0	0,61	0,16	0,01	0,03	5,5	75	4	14	2,8	0,5

<sup>(1)</sup> Segundo os métodos descritos em Embrapa (1997), valores médios,  $n = 4$ ; <sup>a</sup> Capacidade de troca de cátions a pH 7; <sup>b</sup>Saturação por alumínio; <sup>c</sup>Matéria orgânica do solo (Walkley-Black); <sup>d</sup> extrator Mehlich-1.

Em fevereiro de 2009 as doses de corretivos e fertilizantes foram definidas conforme Sousa e Lobato (2004). O calcário dolomítico (CaO 36% e MgO 17%) foi aplicado manualmente na dose de 7,08 t ha<sup>-1</sup> (PRNT de 100%), requerida para elevar a 50% a saturação por bases do solo na camada de 0-40 cm, incorporado com grade aradora, seguida de aração com arado de aivecas. Após estes procedimentos, para a adubação corretiva foram aplicados a lanço o termofosfato magnesiano fundido (240 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 93 kg ha<sup>-1</sup> de Mg), cloreto de potássio (120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O) e, como fonte de micronutrientes, 100 kg ha<sup>-1</sup> de FTE BR-10 em pó (micronutrientes na forma de oxissulfatos e outras), sendo então incorporados ao solo com grade aradora na profundidade de 20 cm.

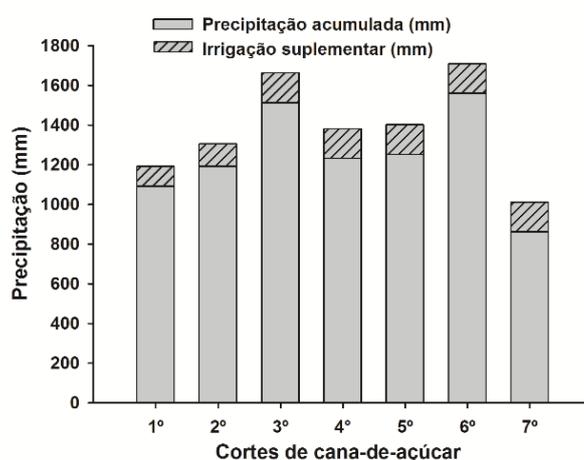
Em março de 2009 a área do experimento foi semeada com *Crotalaria juncea* (20 sementes por metro e espaçamento de 45 cm entre linhas), prática largamente adotada na região Centro-Sul brasileira por ocasião da renovação de canaviais. O adubo verde foi cortado com roçadeira picadora na fase de florescimento.

A cana-de-açúcar, variedade RB867515, foi plantada em julho de 2009, na estação seca. A área foi sulcada na profundidade de aproximadamente 40 cm e adubada no sulco com ureia e superfosfato triplo, conforme apresentado na Tabela 6-2. Em seguida, foram plantados três colmos de cana-de-açúcar paralelos no sistema “pé com ponta”, para garantir a brotação de pelo menos 12 gemas por metro linear.

O gesso agrícola (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O, com 21,3% de Ca<sup>2+</sup> e 17,2% de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) foi aplicado a lanço na superfície do solo após o plantio da cana-de-açúcar. A dose do gesso foi calculada conforme a expressão [Y=75X], em que Y é a dose de gesso úmido (base

15% de enxofre) expressa em  $\text{kg ha}^{-1}$ , e  $X$  é o teor de argila (%) na camada de 40-60 cm conforme recomendação oficial para cultivos perenes na região do Cerrado, prescrita por Sousa e Lobato (2004). Portanto, os seguintes tratamentos foram estudados: 1)  $0 \text{ t ha}^{-1}$ , tratamento controle, sem aplicação de gesso; e 2)  $5 \text{ t ha}^{-1}$ , dose de gesso recomendada. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com 4 repetições. As parcelas experimentais, com  $60 \text{ m}^2$ , consistiram de 5 linhas de 8 m de comprimento, espaçadas em 1,5 m. A área útil de cada parcela consistiu das 3 linhas centrais da parcela de 5 m de comprimento, após exclusão de 1,5 m em cada extremidade da parcela, totalizando  $22,5 \text{ m}^2$ .

Realizaram-se quatro irrigações por aspersão (irrigação suplementar), prática comum na região para cana-de-açúcar plantada durante a estação seca, cada uma de 25 mm para proporcionar a brotação das gemas após o plantio (Figura 6-1). Em novembro de 2009 foi realizada a adubação de cobertura (Tabela 6-2). A colheita da cana-planta (primeiro corte) foi efetuada manualmente, sem despalha à fogo, em agosto de 2010.



**Figura 6-1:** Precipitações pluviométricas acumuladas e irrigações suplementares realizadas na cana-de-açúcar do primeiro ao sétimo corte.

A colheita da primeira à sexta soca (segundo ao sétimo corte) foi sempre efetuada no mês de agosto com posterior fragmentação da palha de cana-de-açúcar depositada no solo, com utilização de roçadeira do tipo trituradora. Essa operação foi realizada com o propósito de picar a palha da cana, simulando o que ocorreria na colheita mecanizada comercial. Após sete a dez dias da conclusão da colheita foram efetuadas em todos os anos irrigações suplementares para propiciar a rebrota na estação seca (Figura 6-1). A

adubação anual de manutenção da cana-soca foi realizada no mês de novembro, conforme apresentado na Tabela 6-2.

**Tabela 6-2:** Fontes e doses de nutrientes (N, K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) utilizados para a adubação do primeiro ao sétimo corte de cana-de-açúcar.

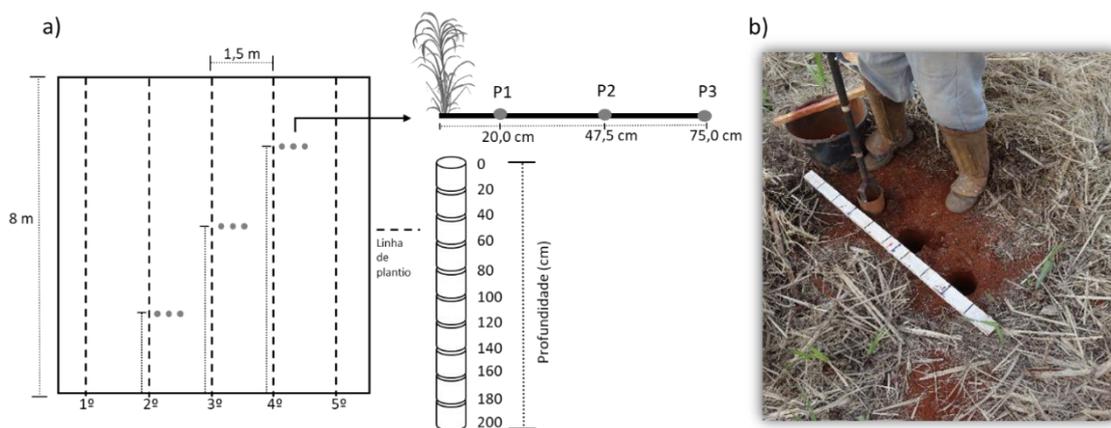
Corte cana-de-açúcar	Fonte	Dose <sup>(1)</sup> – kg ha <sup>-1</sup> (N, K <sub>2</sub> O e P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
1°	Ureia <sup>a</sup>	102
	Cloreto de potássio	150
	Superfosfato triplo <sup>b</sup>	183
2°	Nitrato de amônio	120
	Cloreto de potássio	150
3°, 4° e 5°	Nitrato de amônio	120
	Cloreto de potássio	150
	Fosfato monoamônico	50
6°	Nitrato de amônio	150
	Cloreto de potássio	200
	Fosfato monoamônico	50
7°	Nitrato de amônio	225
	Cloreto de potássio	400
	Fosfato monoamônico	50

<sup>(1)</sup> Conforme Sousa e Lobato (2004); <sup>a</sup>A quantidade total aplicada representa a soma de adubação de base no sulco de plantio (42 kg ha<sup>-1</sup> N) e adubação de cobertura (60 kg ha<sup>-1</sup> N); <sup>b</sup>Aplicação total realizada na base.

#### 6.4.2 Amostragem e determinação dos atributos radiculares

A amostragem para a determinação dos atributos radiculares foi efetuada em setembro de 2016, um mês após a colheita da sexta soca (sétimo corte) da cana-de-açúcar, em dez camadas de 20 cm, até 200 cm de profundidade, utilizando-se trado tipo caneco com 10 cm de diâmetro (volume de 1571 cm<sup>3</sup>). As avaliações foram efetuadas em três posições perpendiculares a linha de plantio com três subamostras, a 20, 47,5 e 75 cm de distância da segunda, terceira e quarta linha, que serão tratadas nesse trabalho como posições P1, P2 e P3, respectivamente, conforme apresentado no esquema de amostragem das raízes na Figura 6-2.

Logo após a amostragem realizou-se a pré-lavagem das raízes em campo para a separação do solo, utilizando-se peneira de malha de 0,5 mm. Após essa etapa, as raízes foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em geladeira (4°C) para posterior limpeza em bandeja com água para a retirada de impurezas por catação manual. Ao término da limpeza, as raízes foram divididas em duas alíquotas.



**Figura 6-2:** Representação esquemática das posições de coleta (P1, P2 e P3) do solo, em uma parcela experimental, para a determinação das propriedades químicas e dos atributos radiculares da cana-de-açúcar (a) e ilustração dos três pontos de coleta com a utilização do trado tipo caneco (b).

A primeira alíquota de raízes, de aproximadamente 100 mg foi separada, pesada e acondicionada em solução 30% de álcool etílico em geladeira (4°C) para determinação da densidade de comprimento e diâmetro radicular. Para isso, a massa de raízes foi colorida com cloreto de pararosanilina (5 g L<sup>-1</sup>), seca ao ar em papel de germinação e escaneada, com posterior digitalização das imagens e análise pelo programa Safira (Jorge e Rodrigues, 2008) para quantificar a densidade de comprimento (cm cm<sup>-3</sup>) e o diâmetro das raízes (mm). Após esses procedimentos, essa alíquota foi levada para estufa para determinação de matéria seca.

A segunda alíquota de raízes foi levada para a secagem em estufa a 65°C e determinação da massa de matéria seca de raízes. Após, realizou-se a determinação do teor de fibras, por meio da moagem em moinho com peneira de malha de 1 mm e determinação da fibra insolúvel em detergente neutro (FDN) de acordo com Van Soest et al. (1991). Essa determinação foi realizada pelo sistema ANKON utilizando-se o equipamento ANKON 220 (Berchielli, 2001).

#### 6.4.3 Determinação dos atributos químicos do solo

As amostras de solo utilizadas para a determinação dos atributos químicos foram obtidas a partir das amostras de raízes, sendo retirado 150 g de solo anterior ao processo de lavagem das raízes (Figura 6-2). Portanto, foram utilizadas três sub-amostras para

compor uma amostra composta de cada posição (P1, P2 e P3) e camada da parcela experimental.

Os teores de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) foram extraídos com solução de cloreto de potássio  $1 \text{ mol L}^{-1}$  (relação solo:solução 1:10), sendo o  $\text{Ca}^{2+}$  determinado por espectrometria de absorção atômica (Shimadzu AA-6300) e o  $\text{Al}^{3+}$  por titulação com solução de NaOH  $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ . O enxofre ( $\text{S-SO}_4^{2-}$ ) foi extraído com solução de  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  de fosfato de cálcio monobásico monohidratado (relação solo:solução 1:5) e quantificado por espectrometria de emissão atômica com plasma de argônio indutivamente acoplado (Thermo Scientific iCAP 6000).

#### 6.4.4 Análises estatísticas

Na análise estatística foram gerados, para diferentes posições de amostragem e doses de gesso, um total de dezoito modelos lineares resultantes da relação entre a “profundidade” (x), onde foram avaliadas as camadas subsuperficiais de 40-200 cm, onde a aplicação do gesso proporcionou mudanças importantes e as “propriedades químicas do solo e atributos radiculares” (y), dados por:

$$y_i = \beta + \beta_1 x_i + \varepsilon_i$$

onde:

$y_i$ : corresponde ao i-ésimo valor da variável resposta,  $i=1,2, \dots, N$  observações;

$x_i$ : corresponde ao i-ésimo valor da variável explicativa,  $i=1,2, \dots, N$  observações;

$\beta$ : corresponde ao parâmetro coeficiente linear do modelo;

$\beta_1$ : corresponde ao parâmetro coeficiente angular do modelo;

$\varepsilon_i$ : corresponde aos erros aleatórios.

Em alguns casos foram utilizados o modelo de regressão linear segmentado com platô. Esse modelo pode ser representado por:

$$y_i = \begin{cases} \beta + \beta_1 x_i + \varepsilon_i & \text{se, } x_i \leq x_c \\ P + \varepsilon_i & \text{se, } x_i > x_c \end{cases} \quad i=1, \dots, 10$$

onde:

$x_c$ : é o parâmetro relativo à profundidade para a qual o modelo linear se transforma em platô;

$P$ : é o valor da variável resposta sob análise a partir do ponto  $X_c$  correspondente ao platô.

No presente estudo, a partir da verificação dos pressupostos de linearidade, normalidade, homogeneidade e independência dos resíduos, para o ajuste dos modelos de regressão linear foi empregado o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários para a estimação dos parâmetros  $\beta$ . O ajuste de um modelo por este método pressupõe que a média dos resíduos seja nula; a variância do erro seja constante e igual a  $\sigma^2$ ; os resíduos sejam independentes, ou seja, os erros são variáveis aleatórias com distribuição normal.

Após a geração dos modelos de regressão linear foi testada a possibilidade de construção de um modelo de regressão único para cada uma das diferentes posições de amostragem e doses de gesso. Para tanto, foi aplicado um teste que verifica a igualdade de duas regressões lineares denominado Método da Identidade de Modelos (Regazzi e Silva, 2003).

O Método da Identidade de Modelos no atual estudo pode ser descrito a partir da seguinte sequência lógica:

Foram geradas as seguintes relações lineares:

$$y_{1i} = a_1 + b_1x_{1i} + e_{1i} \quad i=1, \dots, n_1$$

$$y_{2i} = a_2 + b_2x_{2i} + e_{2i} \quad i=1, \dots, n_2$$

Cada uma relativa a dois conjuntos de observações de acordo com as posições de amostragem e doses de gesso.

Foram combinadas todas as  $n_1+n_2$  observações e calculou-se a estimativa de quadrados mínimos dos parâmetros  $a$  e  $b$  na regressão combinada. Desta equação foi obtida a soma de quadrados de resíduo  $S_{\text{geral}}$  com grau de liberdade igual a  $n_1+n_2-p$ , em que  $p$  corresponde ao número de parâmetros estimados ( $p=2$ ).

Fez-se o cálculo da soma de quadrados de resíduo para as duas equações  $S_1$  e  $S_2$ , com os seus respectivos graus de liberdade  $n_1-p$  e  $n_2-p$ . Fez-se a soma das duas somas de quadrados de resíduo, obtendo assim:  $S_3 = S_1+S_2$  com seus graus de liberdade  $n_1+n_2 -2p$ . Assim, foi obtido o  $S_4 = S_{\text{geral}} + S_3$ .

Finalmente, calculou-se a estatística  $F_{\text{calc}}$  da seguinte forma:

$$F_{\text{cal}} = (S_4/p)/(S_3/(n_1+n_2-2p)), \text{ com } p \text{ e } n_1+n_2 -2p \text{ graus de liberdade.}$$

Como regra de decisão determinou-se que se  $F_{\text{cal}} > F_{\text{tabelado}}$ , para um determinado nível de significância  $\alpha$ , rejeita-se a hipótese de que os parâmetros  $a$  e  $b$  são os mesmos para os dois conjuntos de observações.

Utilizando os pacotes “FactoMineR” e “factoextra” presentes no software estatístico R (versão 3.4.0), realizou-se a análise de componentes principais (ACP), para identificar, entre as variáveis analisadas (teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{S-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ , densidade de comprimento

radicular, diâmetro radicular e conteúdo de fibras) aquelas que contribuíram com maior peso na combinação linear dos dois primeiros componentes principais.

## 6.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.5.1 Propriedades químicas do solo

Os dados das camadas de 0-20 cm e 20-40 cm das propriedades químicas do solo estão apresentados no Apêndice A (Tabelas 1, 2, 3 e 4), pois essas camadas superiores estão sob efeito principalmente do calcário, que foi incorporado a 40 cm de profundidade por ocasião da instalação do experimento. Portanto, na apresentação e discussão dos resultados foram avaliadas as camadas subsuperficiais de 40-200 cm, onde a aplicação do gesso proporcionou mudanças importantes nas propriedades químicas do solo.

Apesar de ter sido aplicado na superfície do solo e em área total da parcela, o gesso promoveu o incremento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  de forma diferenciada nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) na camada de 40-200 cm de profundidade (Tabela 6-3). Nas posições P1 e P2 foram observados maiores incrementos dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  em relação à P3 na camada de 120-200 cm. Além disso, sob a aplicação do gesso a movimentação mais intensa do  $\text{Ca}^{2+}$  ocorreu na camada de 40-120 cm, enquanto que no tratamento sem a aplicação de gesso os modelos que explicam os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  não diferiram nas três posições na camada de 40-120 cm.

A maior movimentação do  $\text{Ca}^{2+}$  e seu enriquecimento nas camadas subsuperficiais nas posições P1 e P2 nos tratamentos sem e com aplicação de gesso (Figura 6-3, Tabela 6-3) pode estar relacionada à maior acidificação superficial do solo na zona da linha de cana associada à aplicação anual localizada dos fertilizantes (Tabela 6-2), com a consequente presença de ânions acompanhantes ( $\text{Cl}^-$  e  $\text{NO}_3^-$ ) carreando  $\text{Ca}^{2+}$ . Outro fator que pode ter contribuído para tal movimentação é a complexação de cálcio com espécies orgânicas solúveis no solo (Franchini et al., 2003), associada à maior presença de raízes e consequente ciclagem de resíduos orgânicos próxima à linha de cana (Figura 6-6). Zambrosi et al. (2008) verificaram maior participação de ânions orgânicos na movimentação de  $\text{Ca}^{2+}$ , em relação aos inorgânicos, como  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{PO}_4^{2-}$ , após a aplicação de calcário em sistema de plantio direto.

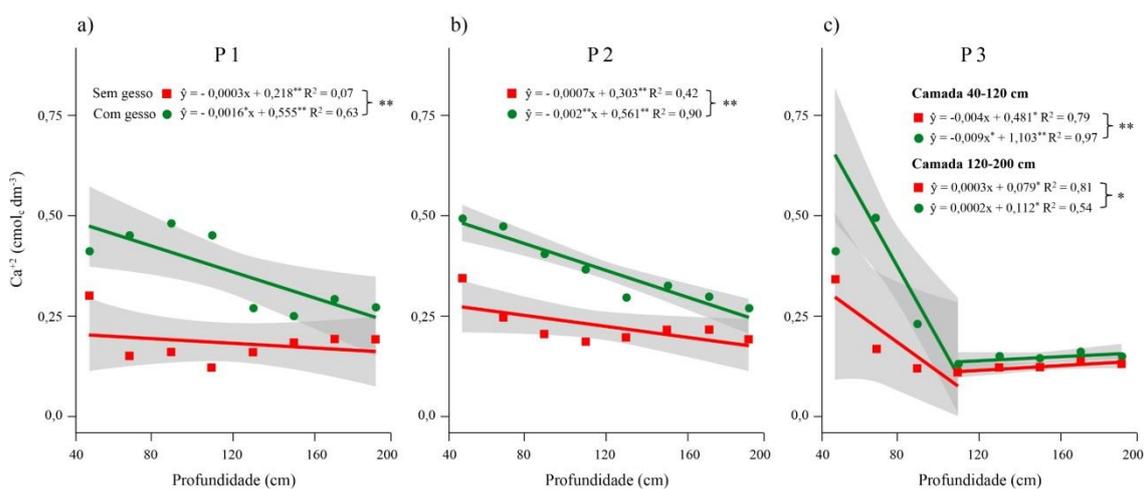
O aumento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  devido ao uso do gesso nas camadas abaixo de 40 cm de profundidade é favorecido pela sua maior solubilidade em relação ao calcário

(Ritchey et al., 1980; Zoca e Penn, 2017). Além disso, no caso do gesso ocorre a permanência do ânion acompanhante no solo, o  $\text{SO}_4^{2-}$ , o que proporciona a movimentação do  $\text{Ca}^{2+}$  ao longo do perfil, pois no caso da calagem a reação de neutralização da acidez do solo consome o ânion  $\text{HCO}_3^-$  (Pavan et al., 1984). Diversos trabalhos têm mostrado o aumento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  nas camadas subsuperficiais do solo devido a aplicação de gesso (Ritchey et al., 1980; Araújo et al., 2016; Costa e Crusciol, 2016).

**Tabela 6-3:** Equações de regressão e coeficientes de determinação para teores de cálcio ( $\hat{y}$ ) em diferentes camadas do solo ( $x$ ), doses de gesso, posições de amostragem (P1, P2 e P3) e comparações estatísticas dessas regressões.

Doses	Camada (cm)	P1	R <sup>2</sup>	P2	R <sup>2</sup>	P3	R <sup>2</sup>
-----Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )-----							
Sem gesso	40-120	$\hat{y}=0,397^-0,0026x$	0,73	$\hat{y}=0,455^-0,0027x$	0,89	$\hat{y}=0,481^-0,004x$	0,79
Sem gesso	120-200	$\hat{y}=0,041+0,0008x^*$	0,86	$\hat{y}=0,158^++0,0002x$	0,31	$\hat{y}=0,079^++0,0003x$	0,81
Com gesso	40-120	$\hat{y}=0,387^++0,0008x$	0,48	$\hat{y}=0,618^{**}-0,0023x^*$	0,96	$\hat{y}=1,103^{**}-0,009x^*$	0,97
Com gesso	120-200	$\hat{y}=0,568^*-0,0018x$	0,43	$\hat{y}=0,454^{**}-0,001x$	0,69	$\hat{y}=0,112^*-0,0002x$	0,54
-----Significância das equações de regressão-----							
		P1 x P2		P1 x P3		P2 x P3	
Sem gesso	40-120	ns		ns		ns	
Sem gesso	120-200	*		**		**	
Com gesso	40-120	*		**		**	
Com gesso	120-200	ns		**		**	

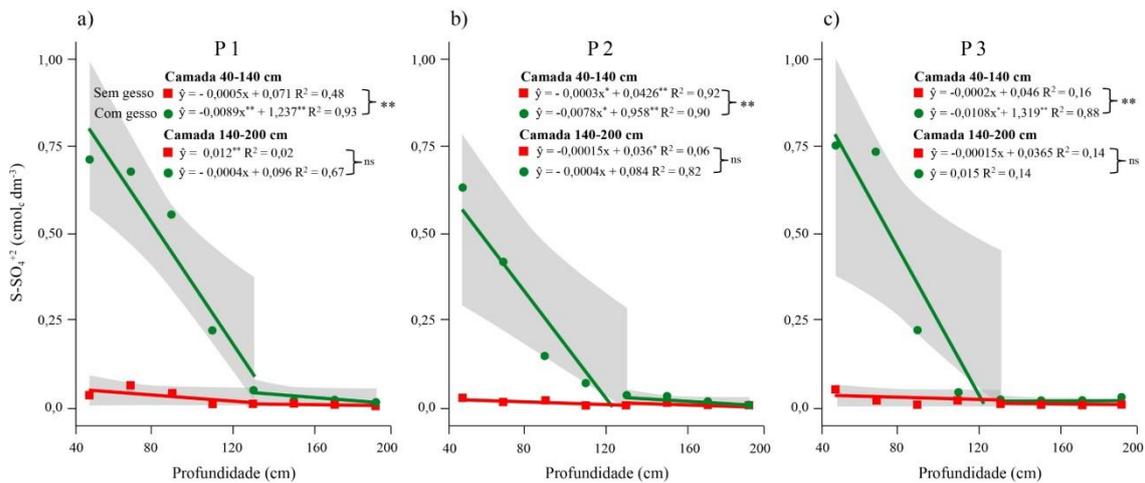
\*, \*\*Significância estatística para  $p \leq 0,05$  e  $p \leq 0,01$ , respectivamente.



**Figura 6-3:** Teores de  $\text{Ca}^{2+}$  trocável nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) e em profundidade (40-200 cm) após 87 meses da aplicação do gesso. \*, \*\* Significativo pelo teste de Tukey  $p \leq 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.

De forma diferenciada ao observado para os teores de  $\text{Ca}^{2+}$ , tanto a distribuição do  $\text{S-SO}_4^{2-}$  como a do  $\text{Al}^{3+}$  nas camadas subsuperficiais do solo foram semelhantes em todas as posições, P1, P2 e P3 em cada tratamento. Dessa maneira, é discutido apenas o efeito do gesso em cada posição.

Conforme observado na Figura 6-4, o uso do gesso promoveu o incremento dos teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  em todas as posições de amostragem na camada de 40-140 cm. No entanto, abaixo de 140 cm de profundidade não foi observado aumento dos teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  devido ao uso do gesso, diferentemente do  $\text{Ca}^{2+}$  (Figura 6-3), para o qual pequenos aumentos nos teores foram verificados nas camadas de 140-200 cm, nas posições P1 e P2. Assim, verificou-se maior mobilidade do  $\text{Ca}^{2+}$  em relação ao  $\text{S-SO}_4^{2-}$  nas posições mais próximas da linha de plantio, onde são aplicados anualmente os fertilizantes.

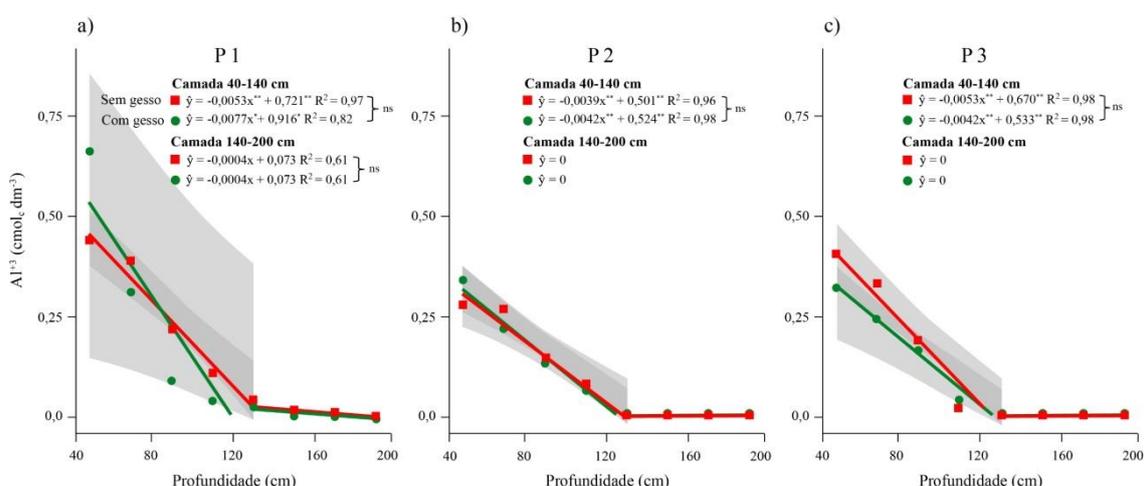


**Figura 6-4:** Teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  extraível nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) e em profundidade (40-200 cm) após 87 meses da aplicação do gesso. \*, \*\* Significativo pelo teste de Tukey  $p \leq 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.

O aumento dos teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  nas camadas subsuperficiais do solo devido ao uso de gesso está associado à sua lixiviação, propiciada pelas precipitações pluviométricas ocorrida durante a condução do experimento (Figura 6-1). Além disso, a incorporação do calcário na camada de 0-40 cm de profundidade, a adubação fosfatada corretiva e o maior teor de matéria orgânica reduzem a adsorção do  $\text{S-SO}_4^{2-}$  nas camadas superficiais favorecendo sua movimentação no perfil do solo (Marcano-Martinez e

McBride, 1989).

Dentre os atributos químicos avaliados, os teores de  $Al^{3+}$  trocáveis foram os que sofreram a menor alteração devido ao uso do gesso (Figura 6-5). Essa menor resposta pode estar relacionada à acidificação do solo (Apêndice A – Tabela 2), ocasionada pelas adubações nitrogenadas de manutenção realizadas nos sete anos de cultivo da cana-de-açúcar (Tabela 6-2). Tais adubações foram realizadas próximo da linha de plantio e, portanto, provocaram a maior acidificação na posição P1, e como consequência maiores teores de  $Al^{3+}$ .



**Figura 6-5:** Teores de  $Al^{3+}$  trocável nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) e em profundidade (40-200 cm) após 87 meses da aplicação do gesso. \*, \*\* Significativo pelo teste de Tukey  $p \leq 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.

### 6.5.2 Atributos radiculares da cana-de-açúcar

A densidade de comprimento de raízes apresentou comportamento semelhante ao observado para os teores de  $Ca^{2+}$  nas três posições com uso do gesso (Tabelas 6-3 e 6-4). De maneira geral, a densidade de raízes no perfil decresceu da posição P1 para a posição P2 (Figura 6-6, Tabela 6-4). Sem aplicação de gesso, os modelos lineares ajustados para as densidades de comprimento de raízes nas posições P1 e P2 não diferiram, demonstrando distribuição do comprimento radicular distinto ao apresentado no tratamento com uso do gesso.

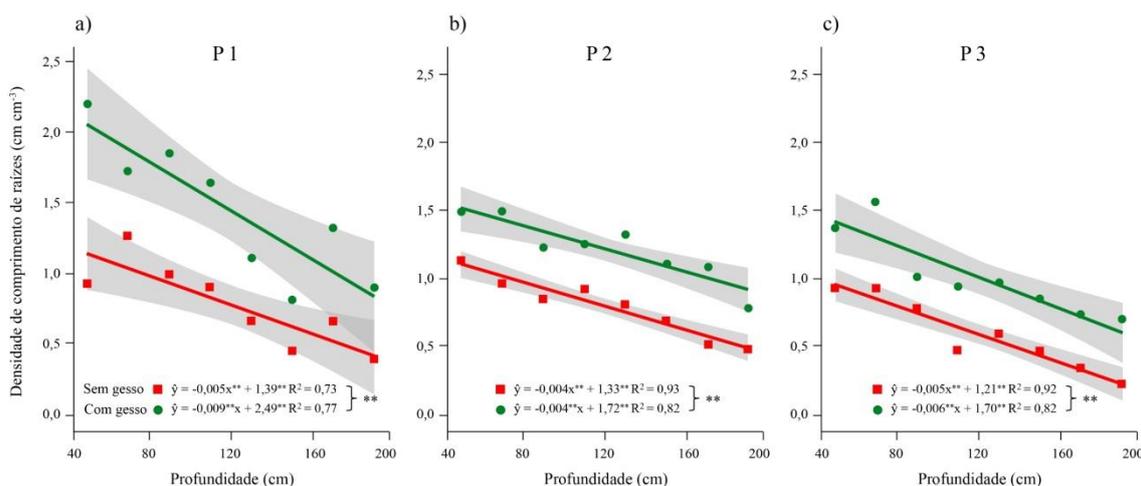
O uso do gesso também proporcionou maior densidade de comprimento radicular nas três posições de amostragem (P1, P2 e P3) apresentados na Figura 6-6. Portanto, independentemente da posição de amostragem a aplicação do gesso favoreceu o maior

comprimento radicular na camada de 40 a 200 cm de profundidade, com incrementos médios de 86, 52 e 71% nas posições P1, P2 e P3, respectivamente.

**Tabela 6-4:** Equações de regressão e coeficientes de determinação para densidade de comprimento de raízes ( $\hat{y}$ ) em diferentes camadas do solo (x), doses de gesso, posições de amostragem (P1, P2 e P3) e comparações estatísticas dessas regressões.

Doses	Camada (cm)	P1	R <sup>2</sup>	P2	R <sup>2</sup>	P3	R <sup>2</sup>
-----Densidade de comprimento de raízes (cm cm <sup>-3</sup> )-----							
Sem gesso	40-200	$\hat{y}=1,39^{**}-0,005x^{**}$	0,73	$\hat{y}=0,13^{**}-0,0044x^{**}$	0,93	$\hat{y}=0,21^{**}-0,005x^{**}$	0,92
Com gesso	40-200	$\hat{y}=2,49^{**}-0,009x^{**}$	0,77	$\hat{y}=0,72^{**}-0,004x^{**}$	0,82	$\hat{y}=1,70^{**}-0,006x^{**}$	0,82
-----Significância das equações de regressão-----							
		P1 x P2		P1 x P3		P2 x P3	
Sem gesso	40-200	ns		*		**	
Com gesso	40-200	*		*		**	

\*, \*\*Significância estatística para  $p \leq 0,05$  e  $p \leq 0,01$ , respectivamente.

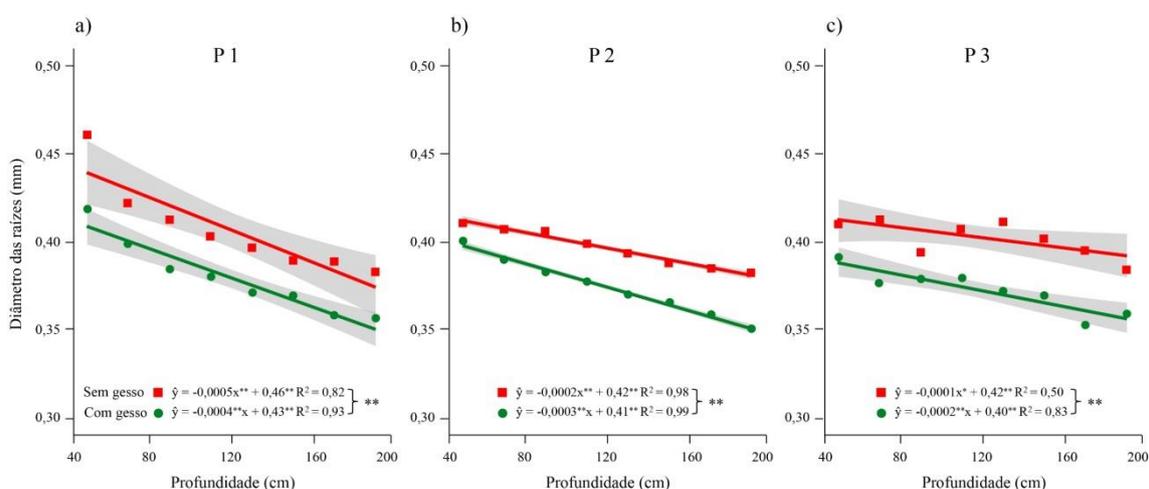


**Figura 6-6:** Densidade de comprimento de raízes nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) e em profundidade (40-200 cm) após 87 meses da aplicação do gesso. \*, \*\* Significativo pelo teste de Tukey  $p \leq 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.

O aumento dos teores de Ca<sup>2+</sup> na camada de 40-200 cm de profundidade promovido pelo uso do gesso nas três posições de amostragem favoreceu a maior densidade de comprimento radicular, com destaque para a posição P1 que apresentou os maiores teores de Ca<sup>2+</sup>. Isto é verificado pelo alto grau de correlação ( $p \leq 0,01$ ) entre essas variáveis (0,73; 0,63 e 0,69) nas posições P1, P2 e P3, respectivamente. Esse efeito pode estar relacionado com maior disponibilidade de Ca<sup>2+</sup> na região de crescimento das raízes.

Pois o  $\text{Ca}^{2+}$  possui importante participação no alongamento radicular (Hawkesford et al., 2012) e mobilidade na planta é baixa (White e Broadley, 2003).

Dessa forma, torna-se evidente que, além da contribuição das características genéticas ocorre grande influência do ambiente de cultivo no crescimento das raízes (Vasconcelos e Casagrande, 2008; Battie Laclau e Laclau, 2009). Neste sentido, o uso do gesso como condicionador das camadas de subsuperfície para o maior crescimento radicular, devido ao aumento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e a redução da toxidez por  $\text{Al}^{3+}$ , tem sido verificado em diversos trabalhos (Ritchey et al., 1980; Araújo et al., 2016; Costa e Crusciol, 2016; Clemente et al., 2017).



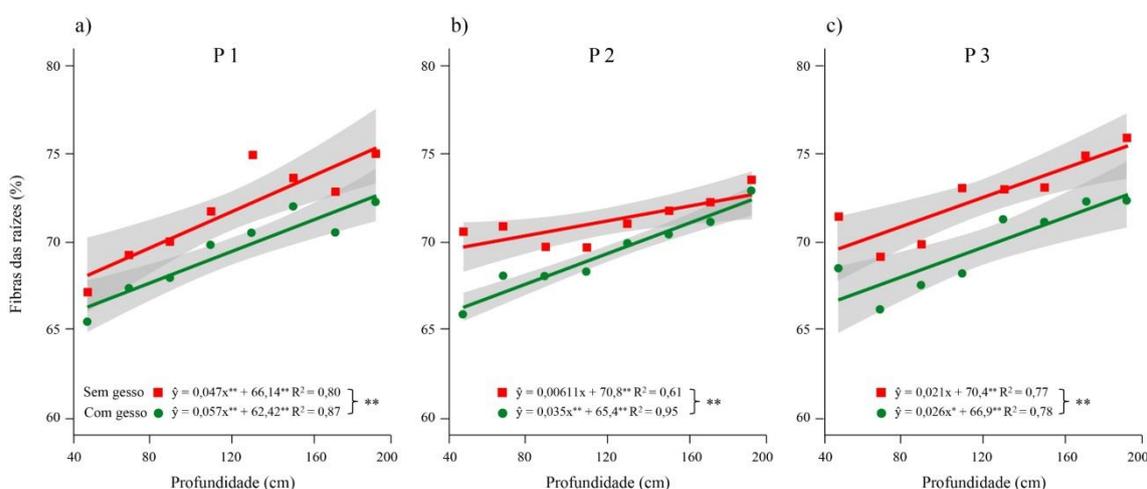
**Figura 6-7:** Diâmetro das raízes nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) na sexta-soca, e em profundidade (40-200 cm) após 87 meses da aplicação do gesso. \*, \*\* Significativo pelo teste de Tukey  $p \leq 0,05$  e  $0,01$ , respectivamente.

Além do incremento do comprimento radicular (Figura 6-7), o uso do gesso também proporcionou a redução do diâmetro das raízes de cana-de-açúcar, com as maiores reduções ocorrendo na posição P3. Esse efeito do gesso está relacionado a menor toxidez por  $\text{Al}^{3+}$ , verificado pela alta correlação ( $p \leq 0,01$ ) entre essas variáveis (0,67; 0,59 e 0,37 nas posições P1, P2 e P3, respectivamente). Outra observação quanto ao diâmetro radicular foi a sua redução com a profundidade de amostragem das raízes independente dos tratamentos.

A redução nos teores de  $\text{Al}^{3+}$  e o aumento da soma de bases promovem a menor saturação desse elemento no solo (Apêndice A – Tabela 2), conforme verificado por Araújo et al. (2018). Dessa maneira, favorece o maior crescimento das raízes. Outro

importante fator que contribui para isso é o aumento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  que, além de reduzir a saturação por  $\text{Al}^{3+}$ , ativa mecanismos nas plantas de proteção a toxicidade por este elemento (Matsumoto, 2000).

Diversos distúrbios morfológicos e fisiológicos nas raízes são ocasionados pela presença de  $\text{Al}^{3+}$  nos solos ácidos (Arunakumara et al., 2013). Dentre as principais alterações, ocorre a inibição ou inadequada divisão celular nos ápices radiculares (Meda e Furlani, 2005). Sasaki et al. (1996) estudando o efeito do  $\text{Al}^{3+}$  em raízes de trigo observaram a acentuada redução do comprimento das células das raízes, assim como o aumento do diâmetro das mesmas.



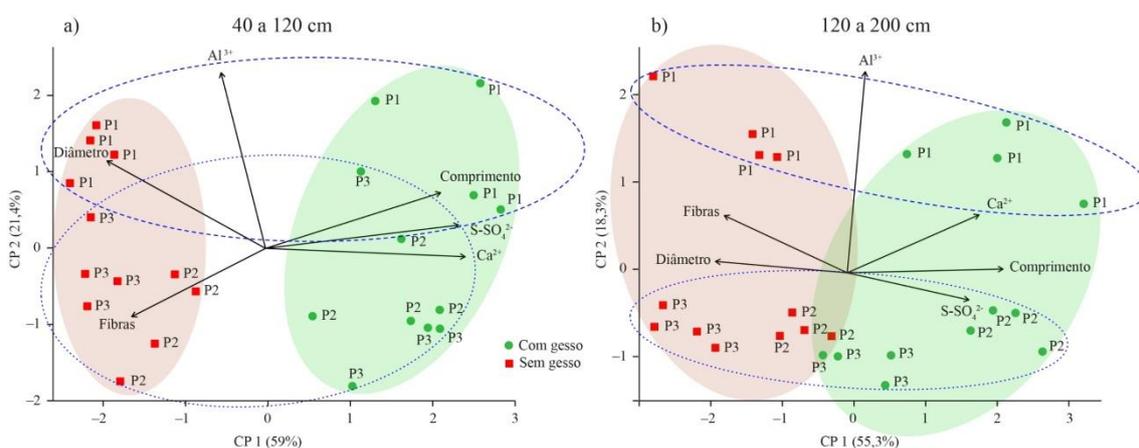
**Figura 6-8:** Conteúdo de fibras das raízes nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) na sexta soca e em profundidade (40-200 cm) após 87 meses da aplicação do gesso. \*, \*\* Significativo pelo teste de Tukey  $p \leq 0,05$  e 0,01, respectivamente.

Além das alterações no comprimento e diâmetro radicular, a aplicação do gesso promoveu a modificação da composição da parede celular das raízes. Conforme observado na figura 6-8, no tratamento com o uso do gesso ocorreu a redução do conteúdo de fibras em todas as posições de amostragem na camada de 40-200 cm de profundidade. Tal redução no conteúdo de fibras pode estar relacionada às melhorias no ambiente químico para o desenvolvimento radicular promovidas pelo uso do gesso. Em alguns trabalhos tem sido verificado o aumento do conteúdo de fibras na parede celular das raízes induzida pelo  $\text{Al}^{3+}$  (Sasaki et al., 1996; Tabuchi e Matsumoto, 2001). Observou-se também um aumento no conteúdo de fibras com aumento da profundidade de amostragem das raízes para os tratamentos sem e com gesso.

### 6.5.3 Análise de componentes principais e efeito do gesso ao longo da entrelinha de plantio

A análise de componentes principais (ACP) foi realizada para determinar as variações entre as posições de amostragem (P1, P2 e P3) e os tratamentos com e sem a aplicação de gesso. Para tanto foram consideradas as propriedades químicas do solo e os atributos radiculares da cana-de-açúcar nas camadas de 40-120 e 120-200 cm, representados nas figuras 6-9a e 6-9b, respectivamente.

Nas duas camadas de solo avaliadas houve uma clara distinção entre os tratamentos com e sem gesso. O CP1 foi o principal responsável pela separação dos tratamentos com e sem gesso, representando 59 e 55% da variação total das variáveis em estudo nas camadas de 40-120 e 120-200 cm, respectivamente. As principais variáveis associadas aos tratamentos com aplicação do gesso foram os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  e comprimento radicular, independentemente da posição de amostragem (P1, P2 e P3). Por outro lado, no tratamento sem a aplicação do gesso as principais variáveis foram o  $\text{Al}^{3+}$ , o diâmetro e as fibras radiculares. Esses dados, portanto, reforçam a importância do fornecimento de  $\text{Ca}^{2+}$  para adequado crescimento radicular e o efeito antagônico do  $\text{Al}^{3+}$ , associado ao aumento do diâmetro e fibras radiculares.



**Figura 6-9:** Diagramas de ordenação da análise de componentes principais (ACP) envolvendo atributos químicos do solo e parâmetros radiculares nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente) e nos tratamentos com e sem a aplicação de gesso.  $\text{Al}^{3+}$ : teor de alumínio;  $\text{Ca}^{2+}$ : teor de cálcio;  $\text{S-SO}_4^{2-}$ : teor de sulfato; Comprimento: densidade de comprimento de raízes; Diâmetro: diâmetro das raízes; Fibras: conteúdo de fibras das raízes.

Com relação a distribuição das posições P1, P2 e P3, foi possível observar a formação de dois grupos, sendo o primeiro composto pela posição P1 e o segundo pelas posições P2 e P3, em ambas as camadas de solo avaliadas (40-120 e 120-200 cm) (Figuras 6-9a e 6-9b). O CP 2 foi o principal responsável pela separação dessas posições.

Na camada de 40-120 cm de profundidade foi verificado que o  $Al^{3+}$  e o diâmetro radicular foram as variáveis que mais se associaram à posição P1 (Figura 6-9a), confirmando que a acidificação do solo e o aumento dos teores de  $Al^{3+}$  nessa posição, promovidos pela aplicação dos fertilizantes ao longo dos anos de cultivo da cana, trazem como consequência um maior diâmetro das raízes. Por sua vez, na camada mais profunda (120-200 cm) o CP2 obteve maior contribuição das variáveis  $Al^{3+}$  e  $Ca^{2+}$ , que apresentaram maior relação com a posição P1 (Figura 6-9a). Assim, confirma-se a maior mobilidade do  $Ca^{2+}$  na posição P1, possivelmente devido a maior concentração de ânions orgânicos e inorgânicos.

Portanto, a partir dessa ACP ficou evidente a capacidade do gesso de agir como condicionador das camadas subsuperficiais do solo para o crescimento radicular e também a sua influência ao longo da entrelinha de plantio. Além de propiciar melhor ambiente para o crescimento radicular nas camadas subsuperficiais, o gesso supre o enxofre para a cultura neste solo altamente deficiente neste nutriente, o que também contribui para a maior produção de biomassa aérea e subterrânea (Araújo et al., 2016, 2018).

## 6.6 CONCLUSÕES

O uso do gesso resulta em melhoria das propriedades químicas das camadas subsuperficiais do solo (40-200 cm) nas três posições amostrais na entrelinha de plantio. Tal melhoria proporcionou maior densidade de comprimento radicular, bem como o menor diâmetro radicular e conteúdo de fibras.

O  $Ca^{2+}$  e o  $S-SO_4^{2-}$  foram as principais variáveis associadas ao maior comprimento radicular na camada de 40-120 cm, enquanto que na camada mais profunda (120-200 cm) o  $Ca^{2+}$  teve maior influência. O diâmetro e o conteúdo de fibras das raízes apresentaram comportamento antagônico aos teores de  $Ca^{2+}$  e comprimento radicular.

Portanto, conclui-se que o ambiente químico do solo e as propriedades radiculares próximo a linha de plantio da cana-de-açúcar (P1) possuem comportamento distinto em

relação à entre linha de plantio (P2 e P3), em especial na camada mais profunda avaliada nesse trabalho (120-200 cm). Essa diferenciação na distribuição espacial dos atributos radiculares da cana-de-açúcar é de fundamental importância para compreender a dinâmica do uso de nutrientes e água no ambiente de produção dessa cultura.

## 6.7 REFERÊNCIAS

ADAMI, M.; RUDORFF, B. F. T.; FREITAS, R. M.; AGUIAR, D. A.; SUGAWARA, L. M.; MELLO, M. P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, v. 4, n. 4, p. 574-585, 2012.

ASSAD, E. D.; SANO, E. E.; MASUTOMO, R.; CASTRO, L. H. R.; SILVA, F. A. M. Veranicos na região dos Cerrados brasileiros frequência e probabilidade de ocorrência. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 9, p. 993-1003, 1993.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013.

ARAÚJO, L. G.; FIGUEIREDO, C. C.; DE SOUSA, D. M. G.; SOUZA N. R.; REIN, T. A. Influence of gypsum application on sugarcane yield and soil chemical properties in the brazilian Cerrado. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 11, p. 1557, 2016.

ARAÚJO, G. A.; SOUSA, D. M. G.; FIGUEIREDO, C. C.; REIN, T. A.; NUNES, R. S.; SANTOS, J. D. G. J. The residual effect of gypsum on subsoil conditioning, nutrition and productivity of sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 8, p. 1313-1321, 2018.

ARUNAKUMARA, K. K. I. U.; WALPOLA, B. C.; YOON, M. H. Aluminum toxicity and tolerance mechanism in cereals and legumes—a review. **Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry**, v. 56, n. 1, p. 1-9, 2013.

BARBOSA, L. C.; DE SOUZA, Z. M.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; NETO, J. R.; GARSIDE, A. L.; CARVALHO, J. L. N. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. **Geoderma**, v. 13, p. 15-25, 2018.

BATTIE LACLAU, P. B.; LACLAU, J. P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, v. 114, n. 3, p. 351-360, 2009.

BERCHIELLI, T. T.; SADER, A. P. D. O.; TONANI, F. L.; PAZIANI, S. D. F.; ANDRADE, P. D. Avaliação da determinação da fibra em detergente neutro e da fibra

em detergente ácido pelo sistema ANKOM. **Revista Brasileira de Zootecnia**, p. 1572-1578, 2001.

CARVALHO, M. C. S.; VAN RAIJ, B. Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. **Plant and Soil**, v. 192, n. 1, p. 37-48, 1997.

CLEMENTE, P. R. A.; BEZERRA, B. K. L.; SILVA, V. S. G. D.; SANTOS, J. C. M. D.; ENDRES, L. Root growth and yield of sugarcane as a function of increasing gypsum doses. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 1, p. 110-117, 2017.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Série histórica das safras. Disponível: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras> [acessado 24 Outubro 2018].

COSTA, C. H. M.; CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on tropical no-till soybean–oat–sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, v. 74, p. 119-132, 2016.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Improving nutrient use efficiency of annual crops in Brazilian acid soils for sustainable crop production. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, n. 7-8, p. 1303-1319, 2001.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS. Crops. Disponível: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> [acessado 24 Outubro 2018].

FRANCHINI, J. C.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Organic composition of green manure during growth and its effect on cation mobilization in an acid Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 34, n. 13-14, p. 2045-2058, 2003.

GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v. 36, n. 6, p. 2086-2097, 2008.

HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; SKRUMSAGER, I.; WHITE, P. Functions of macronutrients. In: MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschners's mineral nutrition of higher plants**. Australia: The University of Adelaide: Elsevier, 2012. p.135-188.

HERNANDES, T. A. D.; BUFON, V. B.; SEABRA, J. E. Water footprint of biofuels in Brazil: assessing regional differences. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 8, n. 2, p. 241-252, 2014.

JORGE, L. A. C.; RODRIGUES, A. F. O. Safira: sistema de análise de fibras e raízes. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2008. 21p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, 24).

LACLAU, P. B.; LACLAU, J. P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. **Field Crops Research**, v. 114, n. 3, p. 351-360, 2009.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. A career perspective on soil management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v. 137, p. 1-72, 2016.

MARCANO-MARTINEZ, E.; MCBRIDE, M. B. Calcium and sulfate retention by two Oxisols of the Brazilian Cerrado. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 1, p. 63-69, 1989

MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. **International Review of Cytology**, v.200, p.1-46, 2000.

MATSUOKA, S.; GARCIA, A. A. F. Sugarcane underground organs: going deep for sustainable production. **Tropical Plant Biology**, v. 4, n. 1, p. 22-30, 2011.

MEDA, A. R.; FURLANI, P. R. Tolerance to aluminum toxicity by tropical leguminous plants used as cover crops. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 48, n. 2, p. 309-317, 2005.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap: can it be determined at national level with a simple agrometeorological model? **Crop and Pasture Science**, v. 68, n. 3, p. 272-284, 2017.

NEWMAN, E.I. Resistance to water flow in soil and plant I. Soil resistance in relation to amounts of root: theoretical estimates. **Journal of Applied Ecology**, p. 1-12, 1969.

OTTO, R.; TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C. Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 601-611, 2009.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium, and aluminum following lime or gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 1, p. 33-38, 1984.

REGAZZI, A. J.; SILVA, C. H. O. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não-linear. I. dados no delineamento inteiramente casualizado. **Revista de Matemática e Estatística**, v. 22, n. 3, p. 33-45, 2004.

REIN T. A. **Surface chemical properties and nitrate adsorption of Oxisols from the Brazilian savannas**. 2008. (Tese Doutorado), Cornell University, Ithaca, NY.

RITCHEY, K. D.; SOUZA, D. M.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a brazilian savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, v. 72, n. 1, p. 40-44, 1980.

SASAKI, M.; YAMAMOTO, Y.; MATSUMOTO, H. Lignin deposition induced by aluminum in wheat (*Triticum aestivum*) roots. **Physiologia Plantarum**, v. 96, n. 2, p. 193-198, 1996.

SILVA, F. A. M.; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B. A. **Caracterização Climática do Bioma Cerrado**. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (Eds.). Cerrado: Ecologia e Flora. Embrapa: Planaltina, 2008. 67–88p.

SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3, p. 169-183, 2005.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416p.

TABUCHI, A.; MATSUMOTO, H. Changes in cell-wall properties of wheat (*Triticum aestivum*) roots during aluminum-induced growth inhibition. **Physiologia Plantarum**, v. 112, n. 3, p. 353-358, 2001.

VAN SOEST, P. J. **Nutritional ecology of the ruminant**. 2.ed. Ithaca: Cornell, 1994. 476p.

VASCONCELOS, A.C.M.; CASAGRANDE, A.A. Fisiologia do sistema radicular. In: MIRANDA-DINARDO, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A (Eds.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. p.79-97.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Calcium in plants. **Annals of botany**, v. 92, n. 4, p. 487-511, 2003.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Liming and ionic speciation of an Oxisol under no-till system. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 2, p. 190-203, 2008.

ZOCA, S. M.; PENN, C. An important tool with no instruction manual: A review of gypsum use in agriculture. **Advances in Agronomy**, v. 144, p. 1-44, 2017.

## **CAPÍTULO III**

### **COMO O USO DO GESSO INCREMENTA O ESTOQUE DE CARBONO NO PERFIL DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR?**

## 7 COMO O USO DO GESSO INCREMENTA O ESTOQUE DE CARBONO NO PERFIL DE UM LATOSSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR?

### 7.1 RESUMO

O uso do gesso como condicionador do solo já é bem conhecido, principalmente em regiões com predomínio de solos ácidos. Recentemente o gesso tem se destacado também como uma estratégia para aumentar o acúmulo de carbono (C) no solo, contribuindo assim para uma agricultura de baixa emissão de C. No entanto, ainda restam dúvidas sobre a forma de ação do gesso no acúmulo de C no solo e o papel do sistema radicular nesse processo. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do gesso no acúmulo de C e a sua relação com atributos químicos do solo e o desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar até dois metros de profundidade avaliados em experimento de campo em Latossolo Vermelho. O experimento foi conduzido sob o delineamento de blocos completos casualizados, com quatro repetições, selecionando-se dois tratamentos para o presente estudo: controle (sem gesso) e com gesso (5 t ha<sup>-1</sup>). Aos 87 meses da aplicação do gesso, após o sétimo corte da cultura, efetuou-se a coleta de solo na profundidade de 0-200 cm, em camadas de 20 em 20 cm para a avaliação da massa seca de raízes (MR) e atributos químicos do solo: sulfato (S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), cálcio (Ca<sup>2+</sup>), saturação por alumínio (saturação Al<sup>3+</sup>), C do ácido fúlvico livre (CAFL), C total (CT) e C particulado (CP). Também foram estimados os estoques de CAFL, CP e CT. A aplicação de 5 t ha<sup>-1</sup> de gesso favoreceu o incremento dos teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e Ca<sup>2+</sup> e promoveu a redução da saturação por Al<sup>3+</sup> no perfil do solo. Associado a estas melhorias nos atributos químicos das camadas subsuperficiais, a MR e os estoques de CT, CP e CAFL foram incrementados. Após 87 meses da aplicação de gesso, os ganhos nos estoques de CT, CP e CAFL foram de 12,3, 2,8 e 2,2 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, na camada de 0-200 cm, com os maiores incrementos obtidos na camada de 40-200 cm. Por meio da análise multivariada foi possível demonstrar que, na camada 40-200 cm deste solo extremamente intemperizado, a ação do gesso promove o aumento dos estoques de CT, de CP e CAFL. Tais incrementos foram proporcionados pela redução da saturação por Al<sup>3+</sup> associado ao incremento de nutrientes como Ca e S, promovendo maior desenvolvimento radicular.

**Palavras-chave:** ácido fúlvico livre, cálcio, raízes, cana-de-açúcar, *Saccharum* spp.

## 7.2 ABSTRACT

Gypsum is already well-known as soil conditioner, especially in regions with predominantly acid soils. Recently, gypsum has also been recognized as a strategy to increase carbon (C) accumulation in the soil, thus contributing to low carbon emission agriculture. However, there are still doubts about how gypsum influences soil C accumulation and about the role of the root system in this process. The objective of this study was to evaluate the influence of gypsum on C accumulation and the relationships of C with soil chemical properties and the development of the sugarcane root system to a depth of 2 m, evaluated in the field, in an Oxisol. The experiment was arranged in a randomized complete block design, with four replications and two treatments: control (without gypsum) and gypsum application (5 t ha<sup>-1</sup>). At 87 months after gypsum application, after the seventh cane cut, soil was sampled down to a depth of 0-200 cm, in 20 cm intervals, for the evaluation of root dry weight (RW) and soil chemical properties (S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), calcium (Ca<sup>2+</sup>), aluminum saturation (Al<sup>3+</sup> saturation), free fulvic acid carbon (FFAC), total C (TC) and particulate C (PC). Stocks of FFAC, PC and TC were also estimated. The application of 5 t ha<sup>-1</sup> gypsum favored the increase of S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and Ca<sup>2+</sup> contents and induced a reduction in Al<sup>3+</sup> saturation in the soil profile. Associated with these improvements in the chemical properties of the subsurface layers, RW and the TC, PC and FFAC stocks were increased. After 87 months of gypsum application, the TC, PC and FFAC stocks had increased by 12.3, 2.8 and 2.2 t ha<sup>-1</sup>, respectively, in the 0-200 cm layer, with highest gains in the 40-200 cm layer. The multivariate analysis showed that, in the 40-200 cm layer of this extremely weathered soil, the effect of gypsum to increase TC as well as PC and FFAC stocks is a result of the reduced Al<sup>3+</sup> saturation associated with the increase in nutrients such as Ca and S, stimulating greater root development.

**Keywords:** free fulvic acid, calcium, roots, sugarcane, *Saccharum* spp.

### 7.3 INTRODUÇÃO

O solo é um importante compartimento para o armazenamento de C (Lal 2018), principalmente quando consideradas as camadas de subsuperfície, pois aproximadamente 37% do C orgânico armazenado nos solos tropicais está na camada de 100-200 cm (Batjes 2014). No Brasil, estima-se que a mudança no uso da terra e a agricultura são responsáveis por 55% do CO<sub>2</sub> emitido para a atmosfera (MCTI 2018), devido a interferência dessas atividades no armazenamento do C no solo (Groppo et al. 2015). Por outro lado, a fixação de C atmosférico pela agricultura pode ser alcançada aumentando a deposição de biomassa de plantas, tanto de parte aérea como por meio das raízes das culturas (Lal 2018).

A cana-de-açúcar possui grande importância no setor agrícola brasileiro, alcançando 8,7 milhões de hectares cultivados na safra 2017/18 (Conab, 2018). Os principais produtos obtidos a partir da cana-de-açúcar são o etanol e o açúcar, além da energia elétrica, considerada como produto secundário (Pippo e Luengo 2013). Por se tratar de uma planta C4 e com alta eficiência na transformação de radiação solar em biomassa, a cana-de-açúcar apresenta grande potencial para a fixação do carbono atmosférico. Estima-se que em um período de cinco anos a cana-de-açúcar pode acumular de 3,7 a 4 t C ha<sup>-1</sup> no solo (Silva-Olaya et al. 2017).

O aporte de biomassa vegetal e a ausência de perturbação do solo promovem a fixação de C (Sá et al. 2014; Inagaki et al. 2016). Assim, tanto a produção de biomassa aérea como a radicular favorece o acúmulo de C no solo. Em torno de 13 % da biomassa aérea de cana-de-açúcar depositada sobre o solo é transformada em C orgânico do solo (Robertson e Thorburn 2007). No caso das raízes, esse número tende a ser maior, como ocorre com outras gramíneas (Bolinder et al. 1999). Além disso, para a cana-de-açúcar, entre 55% e 65% das raízes morrem durante cada ciclo de cultivo (Otto et al. 2014), favorecendo assim a deposição de C no solo (Silva-Olaya et al. 2017). Entretanto, para a determinação da contribuição das raízes de cana-de-açúcar no armazenamento de C no solo é necessário avaliar as camadas de subsuperfície, pois apesar da maior parte das raízes se concentrarem até 40 cm de profundidade, trabalhos relatam crescimento radicular até dois metros ou ainda abaixo (Ball-Coelho et al. 1992; Smith et al. 2005).

A importante contribuição do crescimento das raízes para o armazenamento de C no perfil do solo pode ser limitada pela acidez (Briedis et al. 2012), que está relacionada

à deficiência de cálcio e a toxidez por alumínio. Essas características estão entre os principais fatores associados a redução da entrada de C em solos extremamente intemperizados (Carmeis Filho et al. 2017; Ferreira et al. 2017). Os solos ácidos ocupam em torno de 30% dos solos agricultáveis do mundo (Von Uexküll and Mutert, 1995). No caso do Cerrado, região brasileira de grande importância para a agricultura mundial, em condições naturais, predominam os solos com acidez tanto nas camadas superficiais quanto nas subsuperficiais (Lopes e Guilherme 2016).

Para os solos ácidos do Cerrado a correção da acidez das camadas superficiais é realizada principalmente com a aplicação de calcário e para as camadas subsuperficiais utiliza-se o gesso (Goedert 1983; Sousa e Lobato 2004). As pesquisas para o uso do gesso no Cerrado foram iniciadas no final dos anos 1970, principalmente com o objetivo de reduzir a saturação por  $Al^{3+}$  e fornecer cálcio para as camadas mais profundas do solo, favorecendo o maior crescimento radicular e maior produtividade dos cultivos agrícolas (Ritchey et al. 1980). Dessa forma, diversos trabalhos têm verificado o aumento dos teores de cálcio e redução dos componentes da acidez nas camadas subsuperficiais do solo (Caires et al. 2011; Dalla Nora et al. 2014) favorecendo maior crescimento radicular (Farina e Channon 1988; Caires et al. 2016) e o incremento em produtividade das culturas agrícolas.

Apesar dos reconhecidos benefícios do gesso sobre a fertilidade, ainda são escassas as informações acerca da sua influência no armazenamento de C no solo (Araújo et al. 2017; Inagaki et al. 2016). Além disso, embora o teor de C nas camadas de subsuperfície seja inferior ao encontrado na camada superficial do solo (Rumpel and Kögel-Knabner, 2011), o volume ocupado no perfil é maior. Assim, o C armazenado no subsolo pode contribuir consideravelmente para o estoque de C do solo (Angst et al. 2018). Também, ainda é necessário entender a forma como o gesso incrementa C no solo e o papel das raízes nesse processo. Portanto, o objetivo desse trabalho foi avaliar a influência do gesso no desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar e a sua relação com o acúmulo de C no solo até 2 metros de profundidade.

## 7.4 MATERIAL E MÉTODOS

### 7.4.1 Descrição e manejo da área experimental

O experimento foi conduzido em área experimental localizada na Embrapa Cerrados, em Planaltina - DF (latitude 15° 36' S, longitude de 47° 42' W e altitude de

1014 m). O clima é do tipo Cwa segundo a classificação de Köppen (Alvares et al. 2013), com precipitação média anual de 1.500 mm e temperatura média anual de 21,3 °C. A vegetação original era Cerrado sentido restrito e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho (Embrapa, 2013), contendo 660 g kg<sup>-1</sup> de argila (clayey red Latosol - fine, mixed, isohyperthermic Rhodic Haplustox). A composição mineralógica da fração argila do horizonte diagnóstico do solo estudado consistiu de: caulinita (634 g kg<sup>-1</sup>); gibbsita (195 g kg<sup>-1</sup>); hematita (108 g kg<sup>-1</sup>); e goethita (61 g kg<sup>-1</sup>) (Rein, 2008).

A área experimental foi mantida sob vegetação espontânea com predominância de gramíneas (*Brachiaria decumbens* e *Andropogon gayanus*) e ausência de animais em pastejo por 35 anos. Em outubro de 2008 amostras de solo foram coletadas na área nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm para a determinação dos atributos químicos do solo que são apresentados na Tabela 7-1.

**Tabela 7-1:** Características químicas do solo antes da correção e da adubação da área experimental<sup>(1)</sup>.

Camada cm	pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	CTC <sup>c</sup>	m <sup>a</sup>	V	MO <sup>b</sup>	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	P <sup>d</sup>
		-----		cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	-----		---- %	----	g kg <sup>-1</sup>	--- mg dm <sup>-3</sup>	---
0 a 20	4,9	1,16	0,19	0,06	0,09	8,6	77	4	24	4,4	0,8
20 a 40	5,0	0,93	0,27	0,02	0,05	6,9	73	5	18	3,4	0,6
40 a 60	5,0	0,61	0,16	0,01	0,03	5,5	75	4	14	2,8	0,5

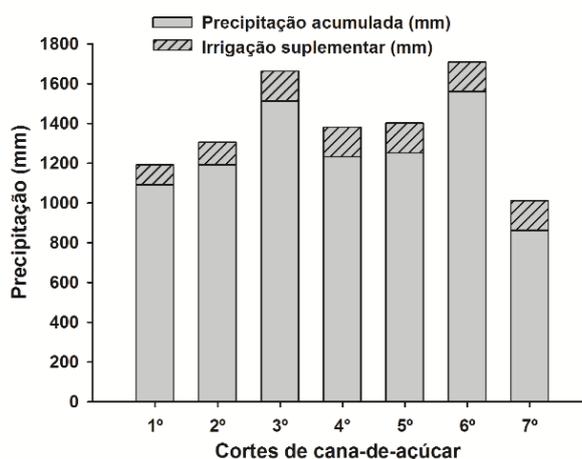
<sup>(1)</sup> Segundo os métodos descritos em Embrapa (1997), valores médios,  $n = 4$ ; <sup>a</sup>Saturação por alumínio; <sup>b</sup>Matéria orgânica do solo (Walkley-Black); <sup>c</sup> Capacidade de troca de cátions a pH 7; <sup>d</sup> extrator Mehlich-1.

Em fevereiro de 2009 as doses de corretivos e fertilizantes foram definidas conforme Sousa e Lobato (2004), descritas a seguir. O calcário dolomítico (CaO 36% e MgO 17%) foi aplicado manualmente na dose de 7,08 t ha<sup>-1</sup> (PRNT de 100%), requerida para elevar a 50% a saturação por bases do solo na camada de 0-40 cm, incorporado com grade aradora na profundidade de aproximadamente 20 cm, seguida de aração com arado de aivecas na profundidade de aproximadamente 40 cm. Após estes procedimentos, para a adubação corretiva foram aplicados a lanço o termofosfato magnésiano fundido (240 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 93 kg ha<sup>-1</sup> de Mg), cloreto de potássio (120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O) e, como fonte de micronutrientes, 100 kg ha<sup>-1</sup> de FTE BR-10 em pó (produto comercial contendo todos os micronutrientes na forma de oxi-sulfatos e outras), sendo então incorporados ao solo com grade aradora na profundidade de 20 cm.

Em março de 2009 a área do experimento foi semeada com *Crotalaria juncea* (20 sementes por metro e espaçamento de 45 cm entrelinhas), prática largamente adotada na região Centro-Sul brasileira por ocasião da renovação de canaviais. O adubo verde foi cortado com roçadeira picadora na fase de florescimento.

A cana-de-açúcar, variedade RB867515, foi plantada em julho de 2009, na estação seca. A área foi sulcada na profundidade de aproximadamente 40 cm e adubada no sulco com ureia e superfosfato triplo, conforme apresentado na Tabela 7-2. Em seguida, foram plantados três colmos de cana-de-açúcar paralelos no sistema “pé com ponta”, para garantir a brotação de pelo menos 12 gemas por metro linear.

O gesso agrícola ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , com 21,3% de  $\text{Ca}^{2+}$  e 17,2% de  $\text{S-SO}_4^{2-}$ ) foi aplicado a lanço na superfície do solo após o plantio da cana-de-açúcar. A dose do gesso foi calculada conforme a expressão  $[Y=75X]$ , em que Y é a dose de gesso (base 15% de enxofre) expressa em  $\text{kg ha}^{-1}$ , e X é o teor de argila (%) na camada de 40-60 cm conforme recomendação oficial para cultivos perenes na região do Cerrado, prescrita por Sousa e Lobato (2004). Portanto, os tratamentos com gesso foram:  $0 \text{ t ha}^{-1}$ , tratamento controle e  $5 \text{ t ha}^{-1}$ , dose recomendada. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, com 4 repetições. As parcelas experimentais, com  $60 \text{ m}^2$ , consistiram de 5 linhas de 8 m de comprimento, espaçadas em 1,5 m. A área útil de cada parcela consistiu das 3 linhas centrais da parcela de 5 m de comprimento, após exclusão de 1,5 m em cada extremidade da parcela, totalizando  $22,5 \text{ m}^2$ .



**Figura 7-1:** Precipitações pluviométricas acumuladas e irrigações suplementares realizadas na cana-de-açúcar do primeiro ao sétimo corte.

Realizaram-se quatro irrigações por aspersão (irrigação suplementar), prática comum na região para cana-de-açúcar plantada durante a estação seca, cada uma de 25 mm para proporcionar a brotação das gemas após o plantio (Figura 7-1). Em novembro de 2009 foi realizada a adubação de cobertura (Tabela 7-2). A colheita da cana planta (primeiro corte) foi efetuada manualmente, sem despalha à fogo, em agosto de 2010.

A colheita do segundo ao sétimo corte foi sempre efetuada no mês de agosto com posterior fragmentação da palha de cana-de-açúcar depositada no solo, com utilização de roçadeira do tipo trituradora. Essa operação foi realizada com o propósito de fragmentar a palha da cana, simulando o que ocorreria na colheita mecanizada comercial. Após sete a dez dias de finalizada a colheita foram efetuadas em todos os anos irrigações suplementares para propiciar a rebrota na estação seca (Figura 7-1). A adubação anual de manutenção da cana-soca foi realizada no mês de novembro, conforme apresentado na Tabela 7-2.

**Tabela 7-2:** Fontes e doses de nutrientes (N, K<sub>2</sub>O e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) utilizados para a adubação do primeiro ao sétimo corte de cana-de-açúcar.

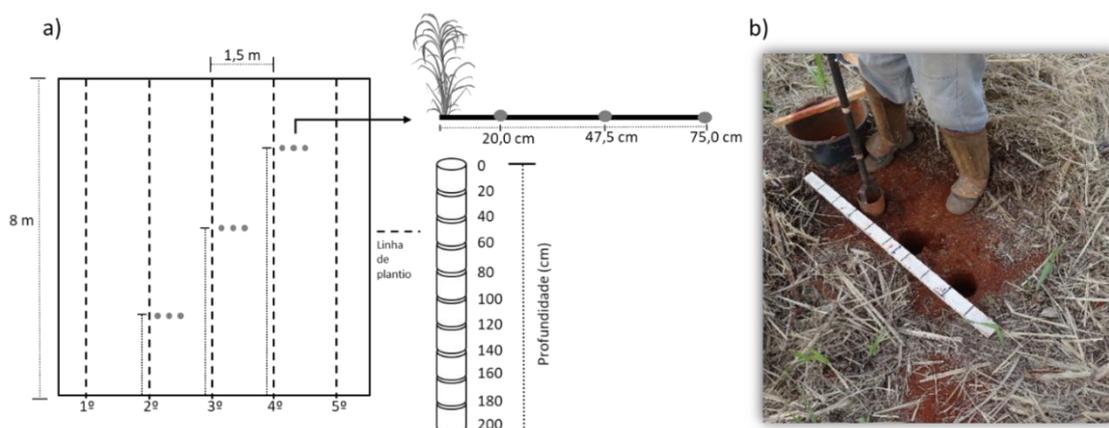
Corte cana-de-açúcar	Fonte	Dose <sup>(1)</sup> – kg ha <sup>-1</sup> (N, K <sub>2</sub> O e P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
	Ureia <sup>a</sup>	102
1°	Cloreto de potássio	150
	Superfosfato triplo <sup>b</sup>	183
	<hr/>	
2°	Nitrato de amônio	120
	Cloreto de potássio	150
	<hr/>	
3°, 4° e 5°	Nitrato de amônio	120
	Cloreto de potássio	150
	Fosfato monoamônico	50
	<hr/>	
6°	Nitrato de amônio	150
	Cloreto de potássio	200
	Fosfato monoamônico	50
<hr/>		
7°	Nitrato de amônio	225
	Cloreto de potássio	400
	Fosfato monoamônico	50

<sup>(1)</sup> Conforme Sousa e Lobato (2004); <sup>a</sup>A quantidade total aplicada representa a soma de adubação de base no sulco de plantio (42 kg ha<sup>-1</sup> N) e adubação de cobertura (60 kg ha<sup>-1</sup> N); <sup>b</sup>Aplicação total realizada na base.

#### 7.4.2 Amostragem e determinação da massa seca de raízes

A amostragem para a determinação da massa seca de raízes (MR) foi efetuada em setembro de 2016, um mês após a colheita do sétimo corte da cana-de-açúcar, em dez

camadas de 20 cm, até 200 cm de profundidade, utilizando-se o trado tipo caneco com 10 cm de diâmetro (volume de 1571 cm<sup>3</sup>). As avaliações foram efetuadas em nove sub-amostras, retiradas nas seguintes posições: a 20, 47,5 e 75 cm de distância da segunda, terceira e quarta linha de plantio, conforme apresentado no esquema de amostragem das raízes na Figura 7-2.



**Figura 7-2:** Representação esquemática dos nove pontos de coleta, em uma parcela experimental, para a determinação da massa seca de raízes da cana-de-açúcar (a) e ilustração de três pontos de coleta com a utilização do trado tipo caneco (b).

Durante a amostragem em campo realizou-se a pré-lavagem das raízes para a separação do solo, utilizando-se peneira de malha de 0,5 mm. Após essa etapa, as raízes foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em geladeira (4°C) para posterior limpeza em bandeja com água para a retirada de impurezas por catação manual. Ao término da limpeza das raízes as amostras foram levadas para a secagem em estufa a 65°C e posterior determinação da MR.

#### 7.4.3 Determinação dos atributos químicos do solo

As amostras de solo utilizadas para a determinação dos atributos químicos e teores de C na forma de ácido fúlvico livre (CAFL), C particulado (CP) e C total (CT) do solo foram obtidas a partir das amostras de solo retiradas para a determinação da massa seca de raízes, (aproximadamente 150 g de solo) (Figura 7-2). Portanto, foram utilizadas nove sub-amostras para compor uma amostra composta de cada profundidade da parcela experimental.

Os teores de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) e alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) foram extraídos com solução de cloreto de potássio  $1 \text{ mol L}^{-1}$  (relação solo:solução 1:10), sendo o  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  quantificado por espectrometria de absorção atômica (Shimadzu AA-6300) e o  $\text{Al}^{3+}$  por titulação com solução de  $\text{NaOH}$   $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ . O potássio ( $\text{K}^+$ ) foi extraído com a solução extatora Mehlich-1 ( $\text{H}_2\text{SO}_4$   $0,0125 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{HCl}$   $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ ), na relação solo:solução 1:10, e quantificado por fotometria de chama. O enxofre ( $\text{S-SO}_4^{2-}$ ) foi extraído com solução de  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$  de fosfato de cálcio monobásico monohidratado (relação solo:solução 1:5) e quantificado por espectrometria de emissão atômica com plasma de argônio indutivamente acoplado (Thermo Scientific iCAP 6000). Para o cálculo da saturação por alumínio foi utilizada a seguinte expressão: saturação  $\text{Al}^{3+}$ , % =  $[\text{Al}^{3+} / (\text{Al}^{3+} + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+)] * 100$ , todas as variáveis expressas em  $\text{cmol}_c/\text{dm}^{-3}$  de solo.

#### 7.4.4 Determinação do estoque de carbono na forma de ácido fúlvico livre, carbono total e particulado

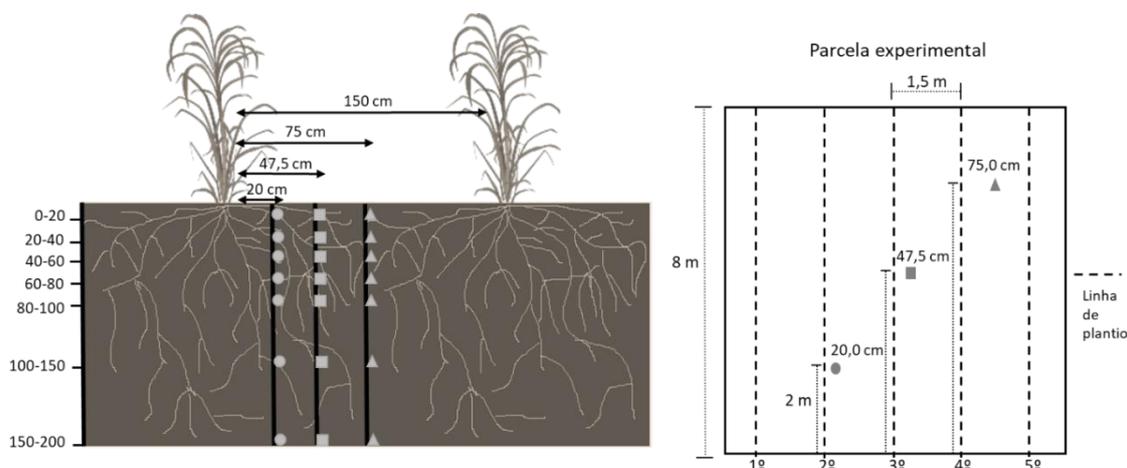
Para a obtenção do CAFL foi utilizada a técnica de solubilidade diferencial (Swift, 1996), com adaptações realizadas por Schiavo et al. (2009). As amostras de solo secas ao ar foram submetidas ao tratamento com solução  $2 \text{ mol L}^{-1}$  de ácido fosfórico para solubilização do ácido fúlvico livre. No extrato obtido de CAFL foi determinado o teor de C por dicromatometria.

Aproximadamente  $100 \text{ mg}$  de amostra de solo passada em peneira de  $0,149 \text{ mm}$  foram utilizados para a determinação do CT por combustão via seca em analisador elementar (Vario MACRO cube, Elementar).

O CP foi determinado a partir do fracionamento físico granulométrico segundo Cambardella & Elliot (1992), utilizando-se como dispersante solução de hexametáfosfato de sódio ( $5 \text{ g L}^{-1}$ ). Após a obtenção da fração particulada ( $> 50 \text{ }\mu\text{m}$ ), a mesma foi moída e peneirada ( $< 0,149 \text{ mm}$ ) para a determinação do C por combustão via seca em analisador elementar.

Os estoques de CAFL, CT e CP foram estimados pelo método da camada equivalente (Ellert & Bettany, 1995). Para isso foram coletadas amostras não deformadas, num total de três por parcela experimental, nas seguintes camadas: 0-20, 20-40, 40-60, 60-80, 80-100, 100-150 e 150-200 cm, sendo utilizado anéis de  $5 \text{ cm}$  de altura na posição central das cinco primeiras camadas e nas duas últimas camadas na posição final de cada

camada (145-150 e 195-200 cm) (Apêndice B – Tabela 1), conforme apresentado no esquema de amostragem para densidade do solo apresentado na Figura 7-3.



**Figura 7-3:** Representação esquemática da amostragem para determinação da densidade do solo composta de 3 sub-amostras, na segunda, terceira e quarta linha de plantio à 20, 47,5 e 75 cm de distância da linha, respectivamente.

#### 7.4.5 Análises estatísticas

Na análise estatística foram considerados dois fatores: dose de gesso e profundidade do solo. O fator “dose de gesso” é composto pelos tratamentos com gesso e sem gesso que estão alocados às parcelas. O fator “profundidade do solo” é composto por 10 camadas que estão alocadas às sub-subparcelas. Para a análise de variância (ANOVA) dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{S-SO}_4^{2-}$ , saturação por  $\text{Al}^{3+}$ , MR, estoques de CAFL, CP e CT e densidade nas camadas de solo foi utilizado o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ijm} = \mu + B_i + T_j + \text{erro1}_{(ij)} + C_m + \text{TC}_{jm} + \text{erro2}_{(ijm)}$$

Onde  $Y_{ijm}$  = valor observado da variável resposta no tratamento  $j$ , bloco  $i$ , camada  $m$ ;  $\mu$  = média geral dos dados;  $B$  = efeito de bloco ( $i = 1,2,3,4$ );  $T$  = efeito de doses de gesso ( $j = 1,2$ );  $C$  = efeito de profundidade do solo ( $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ );  $\text{erro1}_{(ij)}$  = erro experimental associado ao tratamento  $j$ , no bloco  $i$ ;  $\text{erro2}_{(ijm)}$  = erro experimental associado ao tratamento  $j$ , no bloco  $i$ , na camada  $m$ .

A ANOVA foi realizada com o PROC MIXED do software SAS 9.1 (Statistical Analysis System) e quando esta apresentou significância o teste  $t$  ( $p < 0,05$ ) foi utilizado para distinção das médias.

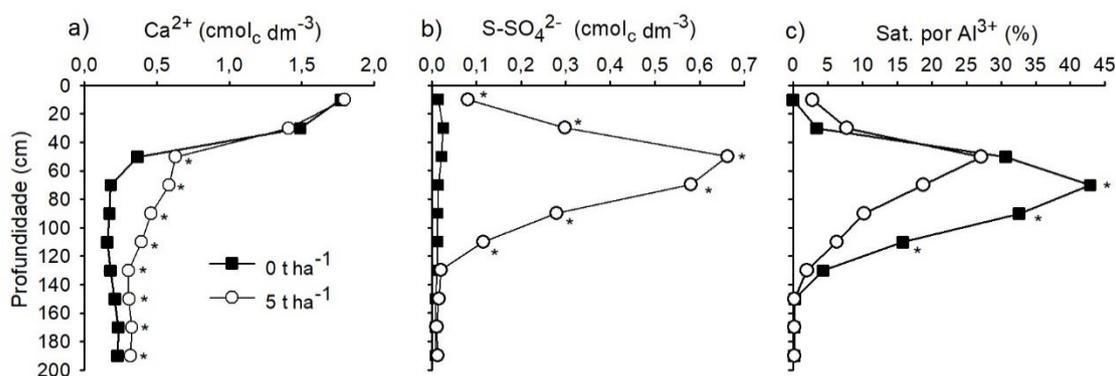
Utilizando os pacotes “FactoMineR” e “factoextra” presentes no software estatístico R (versão 3.4.0), realizou-se a análise de componentes principais (ACP), para

identificar, entre as variáveis analisadas (teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{S-SO}_4^{2-}$  e saturação por  $\text{Al}^{3+}$ , MR e estoques de CAFL, CP e CT) aquelas que contribuíram com maior peso na combinação linear dos dois primeiros componentes principais. Nessa análise foram consideradas as variáveis cujos valores de comunalidade foram iguais ou superiores a 0,6 (Figueiredo Filho e Silva Júnior 2010).

## 7.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.5.1 Propriedades químicas do solo, massa seca de raízes e estoque de carbono do ácido fúlvico livre

A aplicação de  $5 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso na ocasião do plantio da cana apresentou efeito residual com relação ao incremento dos teores de cálcio trocável ( $\text{Ca}^{2+}$ ) na camada de 40-200 cm de solo, observado após sete cortes da cana, em relação ao tratamento controle sem gesso ( $p < 0,05$ ). O maior incremento no teor de  $\text{Ca}^{2+}$  foi observado na camada de 40-100 cm, seguido pela camada de 100-200 cm (Figura 7-4a). O incremento nos teores de sulfato ( $\text{S-SO}_4^{2-}$ ) no perfil do solo, no entanto, foi observado apenas na camada de 0-120 cm (Figura 7-4b). Associado ao incremento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$ , ocorreu a redução da saturação por  $\text{Al}^{3+}$  na camada de 60-120 cm com aplicação de  $5 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso (Figura 7-4c).

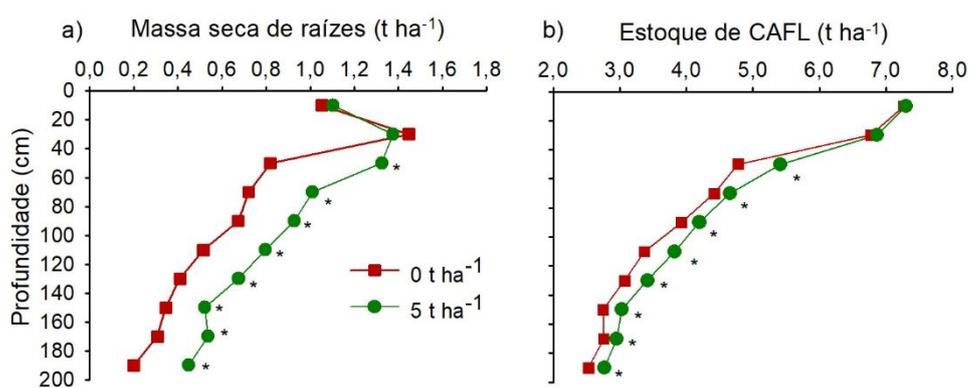


**Figura 7-4:** Teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  (a),  $\text{Ca}^{2+}$  trocável (b) e saturação por alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) (c) em amostras de solo 87 meses após a aplicação do gesso no plantio da cana-de-açúcar. \* Significativo pelo teste de  $t \leq 0,05$ .

O gesso possui em torno de 19% de cálcio e 15% de enxofre (Sousa e Lobato 2004), promovendo o incremento desses nutrientes após sua aplicação ao solo (Figuras

7-4a e 7-4b). Devido à alta solubilidade do gesso e baixa reatividade (adsorção) do sulfato nas camadas superficiais, principalmente nos solos agrícolas com acidez corrigida, sua aplicação promove a translocação e incremento nos teores de sulfato e bases trocáveis no perfil do solo (Pavan et al. 1984; Zoca e Penn 2017). Assim, muitos trabalhos têm verificado o incremento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  e a redução da saturação por  $\text{Al}^{3+}$  em camadas de subsuperfície devido ao uso de gesso (Caires et al. 2011; Dalla Nora et al. 2014). O longo efeito residual do gesso observado se deve à alta capacidade de adsorção de sulfato nas camadas subsuperficiais dos Latossolos e solos ácidos de carga variável em geral, associada ao desenvolvimento concomitante de carga negativa propiciando a retenção de bases nestas camadas (Marcano-Martinez e McBride, 1989; Bolan et al. 1991).

Semelhante ao observado para o  $\text{Ca}^{2+}$ , na camada de 0-40 cm de solo não foi verificada diferença na MR entre os tratamentos com e sem gesso ( $p < 0,05$ ). No entanto, em todas as camadas de solo avaliadas abaixo de 40 cm até 200 cm de profundidade, a aplicação de gesso promoveu o incremento da MR em relação à não aplicação desse corretivo (Figura 7-5a). Os ganhos médios percentuais de MR nas camadas de solo de 40-100 e 100-200 cm foram de 46 e 67%, respectivamente. Considerando todo o perfil do solo avaliado (0-200 cm) a MR obtida foi de 6,2 e 8,3  $\text{t ha}^{-1}$  sem e com a aplicação de gesso, respectivamente.



**Figura 7-5:** Massa seca de raízes (a) e estoque de carbono do ácido fúlvico (CAFL) (b) em amostras de solo 87 meses após a aplicação do gesso no plantio da cana-de-açúcar. \* Significativo pelo teste de teste de  $t \leq 0,05$ .

A disponibilidade de  $\text{Ca}^{2+}$  nas camadas subsuperficiais do solo influencia positivamente a produtividade da cana-de-açúcar (Landell et al. 2003). Isso está

relacionado à sua importante função no crescimento celular (Hawkesford et al. 2012) de modo que o adequado teor de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo favorece o maior crescimento das raízes (Ritchey et al. 1982). Conforme relatado por Sousa et al. (1992), valores de  $\text{Ca}^{2+}$  iguais ou maiores que  $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  são necessários para o bom desenvolvimento das raízes. Portanto a maior disponibilidade de  $\text{Ca}^{2+}$  e menor saturação por  $\text{Al}^{3+}$  nas camadas mais profundas do solo (40-200 cm) promoveu o incremento radicular da cana-de-açúcar (Figura 7-5a). Alguns trabalhos têm relatado o maior crescimento radicular de culturas agrícolas em profundidade, devido ao efeito do gesso de proporcionar maiores teores de Ca e redução da toxidez por alumínio (Ritchey et al. 1980; Farina e Channon 1988; Caires et al. 2016). Além disso, a maior produção de biomassa da parte aérea e subterrânea devido a aplicação do gesso, também está relacionado ao seu efeito como fonte de enxofre.

Ânions inorgânicos e orgânicos, com exceção do  $\text{SO}_4^{2-}$  (Figura 7-4b) podem ter favorecido o incremento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  nas camadas de solo abaixo de 100 cm de profundidade (Figura 7-4a), uma vez que nestas camadas os aumentos nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  não são proporcionais aos teores de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Nitrato e cloreto provenientes dos fertilizantes (ureia, nitrato de amônio e cloreto de potássio) e ácidos orgânicos de baixa e alta massa molecular que compõem a matéria orgânica solúvel são capazes de promover a movimentação de cátions para as camadas mais profundas do solo (Ritchey et al. 1980; Franchini et al. 2001; Pavinato e Rosolem 2008). A presença de altos teores de sulfato nas camadas acima de 100 cm no tratamento com gesso inibe a adsorção de nitrato e cloreto (Donn et al. 2004), favorecendo sua movimentação e dos cátions acompanhantes ( $\text{Ca}^{2+}$ ) para camadas mais profundas, o que poderia explicar em parte o maior acúmulo de  $\text{Ca}^{2+}$  nestas camadas (Figura 7-4a).

O uso do gesso favoreceu o incremento do estoque de CAFL nas camadas de solo abaixo de 40 cm de profundidade, semelhante ao observado para o  $\text{Ca}^{2+}$  e MR (Figura 7-5b). A distribuição dos incrementos percentuais do estoque de CAFL nas camadas de 0-40, 40-100 e 100-200 devido ao gesso foi de 5, 41 e 54%, respectivamente, evidenciando que os maiores ganhos do estoque ocorreram nas camadas abaixo de 40 cm de profundidade. Dessa forma, o aumento do estoque de CAFL com aplicação de gesso (Figura 7-5b) pode ter favorecido a maior movimentação do  $\text{Ca}^{2+}$ , em especial na camada de 100-200 cm, onde o efeito do  $\text{SO}_4^{2-}$  foi pouco expressivo, pois o CAFL apresenta mobilidade no solo, portanto, sujeito à movimentação para camadas mais profundas (Dabin 1981; Souza et al. 2016).

É destacada a contribuição das raízes de cana para o incremento de C no solo, especialmente em camadas mais profundas do solo (Silva-Olaya et al. 2017), sendo esse efeito crescente ao longo do tempo. Em torno de 55 a 65% do sistema radicular da cana morre após a colheita (Otto et al. 2014), ocorrendo o surgimento de novas raízes por ocasião do crescimento dos novos colmos. Assim, o C oriundo deste tecido radicular morto contribui para o armazenamento de C no solo (Pausch e Kuzyakov 2017). Além dessa contribuição, as raízes vivas são uma importante fonte de C solúvel, podendo favorecer o maior aprofundamento do mesmo, em relação ao sistema radicular (Ota et al. 2013).

#### 7.5.2 Estoques de carbono particulado e total do solo

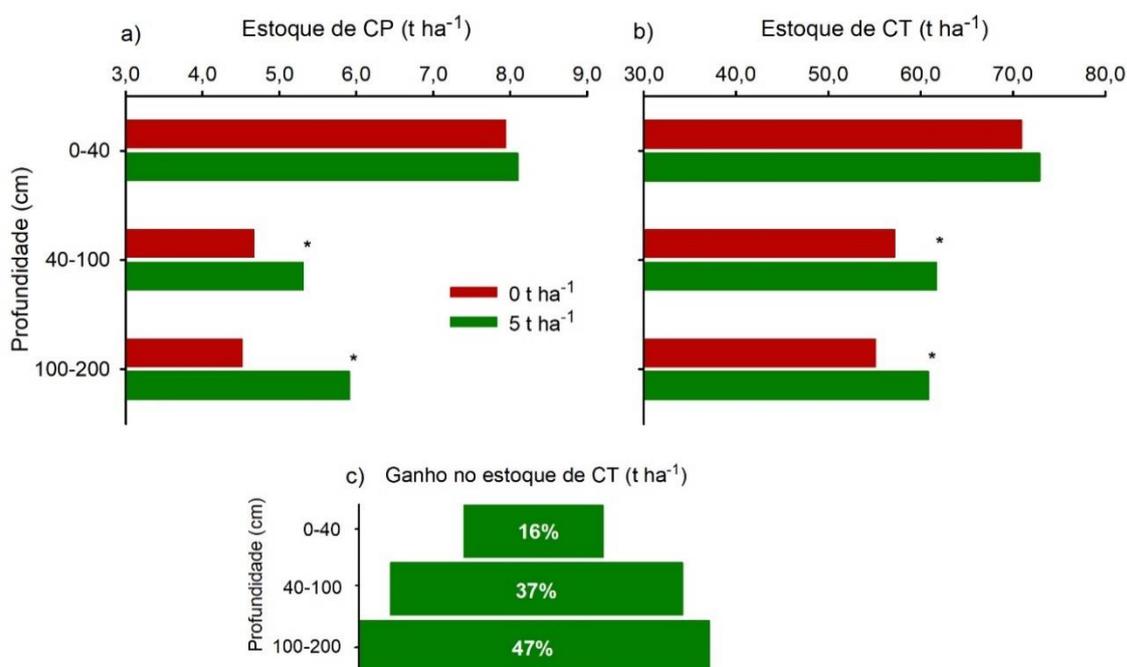
O estoque de C particulado (CP) obtido no tratamento sem gesso na camada de 0-200 cm foi de 17,1 t ha<sup>-1</sup> e, com aplicação de gesso, foi de 19,3 t ha<sup>-1</sup>. Nesse sentido, o uso do gesso promoveu o ganho de 2,2 t ha<sup>-1</sup> de CP (Figura 7-6a), do qual 7, 29 e 64% ocorreram nas camadas de 0-40, 40-100 e 100-200 cm, respectivamente. Os incrementos obtidos no estoque de CP apresentaram comportamento similar aos ganhos observados para a MR (Figura 7-5a) e estoque de CAFL (Figura 7-5b). Dessa forma o aumento do estoque de CP está principalmente relacionado ao incremento radicular favorecido pelo uso do gesso. Conforme demonstrado por Ontl et al. (2015) ocorre uma alta relação entre a quantidade de raízes e o CP do solo. Carneis Filho et al. (2017) também verificaram efeito positivo do uso do gesso combinado com o calcário nos teores de CP, pois observaram o aumento da relação CP/CT nas camadas de 0-10 e 20-40 cm devido a utilização de 2,1 t ha<sup>-1</sup> de gesso em culturas anuais.

A mesma tendência observada para os estoques de CAFL e CP foi obtida no estoque de C associado aos minerais (CM) (Apêndice B - Tabela 1). A aplicação do gesso promoveu o incremento de 10,1 t ha<sup>-1</sup> de CM no perfil do solo avaliado (0-200 cm), com os maiores incrementos observados nas camadas abaixo de 40 cm de profundidade (81,2 %). Esses resultados demonstram que o gesso incrementa C com diferentes graus de estabilidade, reforçando a estratégia do seu uso para o acúmulo de C no solo.

As raízes são ricas em lignina que apresenta lenta mineralização e, portanto, possui importante contribuição na formação das substâncias húmicas do solo (Zech et al. 1997). Outra importante contribuição do gesso para o armazenamento de C no solo é o fornecimento de Ca<sup>2+</sup>, pois esse nutriente pode atuar na estabilização do C orgânico por favorecer a maior agregação do solo, promovendo a proteção física do C (Rowley et al.

2018). Além disso, o  $\text{Ca}^{2+}$  atua na formação de ponte catiônica entre a matéria orgânica e a fração argila, reduzindo a mineralização do C pelos microrganismos do solo (Tisdall e Oades 1982; Briedis et al. 2011).

Os estoques de C total (CT) obtidos nos tratamentos sem e com gesso foram de 183 e 195  $\text{t ha}^{-1}$ , respectivamente, na camada de 0-200 cm. Portanto, o incremento do estoque de CT devido ao uso do gesso foi de 12,3  $\text{t ha}^{-1}$ , com os maiores ganhos observados nas camadas de 40-100 e 100-200 cm de profundidade, que representaram, respectivamente, 37 e 47% do incremento total observado (Figuras 7-6b e 7-6c). Esse incremento de CT representou uma taxa média de acúmulo de 1,76  $\text{t ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  na camada 0-200 cm, devido ao uso do gesso. Portanto, o uso do gesso na cultura da cana de açúcar atende ao objetivo proposto pelo Plano ABC – Agricultura de Baixa Emissão de Carbono, que visa aumentar a fixação de  $\text{CO}_2$  na vegetação e no solo das áreas agrícolas (MCTI 2016).



**Figura 7-6:** Estoque de carbono particulado (CP) (a) e estoque de carbono total (CT) (b) em amostras de solo 87 meses após a aplicação do gesso no plantio da cana-de-açúcar. Ganho relativo obtido devido ao uso do gesso nos estoques de CP e CT nas camadas de 0-40; 40-100 e 100-200cm (c). \* Significativo pelo teste de  $t \leq 0,05$ .

Araújo et al. (2016) obtiveram resultados semelhantes para o estoque de CT devido ao uso do gesso, cujo incremento foi de 5,4  $\text{t ha}^{-1}$  na camada de 0-100 cm após

quatro anos de cultivos da cana-de-açúcar neste mesmo experimento. No Sul do Brasil, também foi verificado ganho do estoque de CT devido a aplicação combinada de gesso e calcário, entretanto avaliado apenas na camada de 0-60 cm de profundidade, em sistema de plantio direto com culturas anuais (Inagaki et al. 2016).

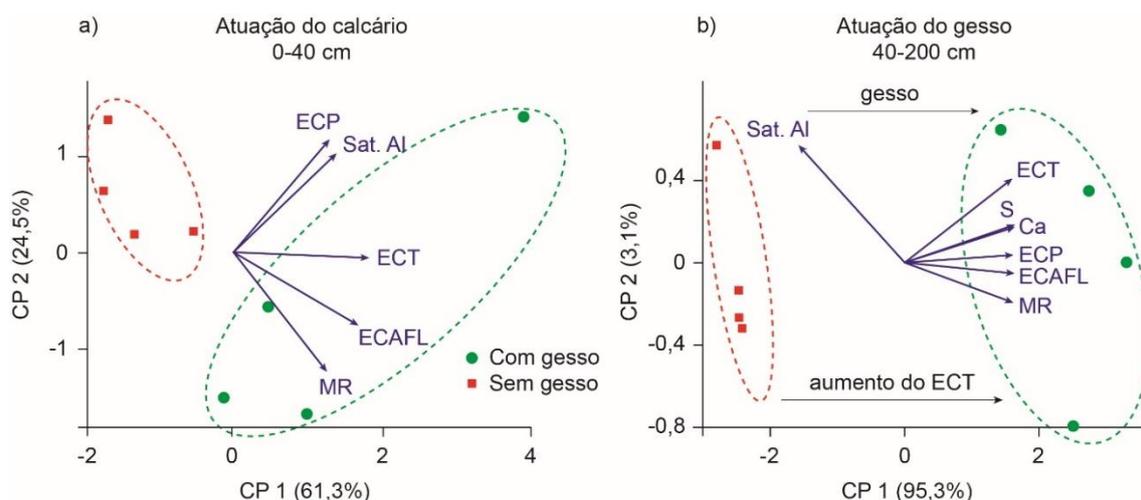
As camadas mais profundas do solo possuem grande potencial de sequestro de C, pois apresentam baixos teores de C e, desse modo, não estão saturadas (Rumpel e Kögel-Knabner 2011), além de ocupar maior volume de solo em relação à camada superficial (Angst et al. 2018). Além disso, o aumento dos teores de C em camadas mais profundas do solo, que apresentam menor fluxo de oxigênio, pode representar uma importante estratégia para o acúmulo de C por longos períodos de tempo (Lal 2018). Assim, no presente estudo, considerando que os ganhos obtidos no estoque de CT foram maiores na camada de 40-200 cm, o gesso representa uma importante tecnologia para ser usada numa perspectiva de agricultura de baixa emissão de carbono.

### 7.5.3 Análise multivariada envolvendo o uso do gesso

A análise de componentes principais (ACP) foi conduzida para determinar o comportamento dos tratamentos com e sem a aplicação de gesso nas camadas de atuação do calcário (0-40 cm) e gesso (40-200 cm), considerando as seguintes propriedades analisadas:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , saturação por  $\text{Al}^{3+}$ , MR e estoques de CAFL, CP e CT (Figura 7-7).

No PC1 e PC2 na camada de 0-40 cm os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  apresentaram baixa contribuição no valor de comunalidade, que foram inferiores a 0,6 (Figura 7-7a). Isso se justifica devido ser essa a camada de atuação do calcário. O  $\text{SO}_4^{2-}$  e cátions acompanhantes do gesso são deslocado para camadas mais profundas do solo devido ao aumento do pH com aplicação do calcário, maior matéria orgânica e competição com o ânion fosfato.

Na camada de 40-200 cm o PC1 correspondeu a maior parte da variação total dos parâmetros em estudo, ou seja, 95,3% (Figura 7-7b). O agrupamento das variáveis na ACP deixa claro que na camada de ação do gesso (40-200 cm) a forma pela qual esse insumo promove acúmulo de C no solo é resultado da melhoria dos atributos químicos, como os maiores teores de Ca e redução da saturação por  $\text{Al}^{3+}$ , resultando em maior desenvolvimento do sistema radicular e maior acúmulo de frações do C, principalmente CP e CAFL. O resultado desse ambiente é o maior estoque de CT na subsuperfície do solo, propiciado pelo maior crescimento radicular.



**Figura 7-7:** Diagramas de ordenação da análise de componentes principais (ACP) envolvendo atributos químicos do solo, raízes de cana-de-açúcar e estoques de carbono do solo. Sat. Al: saturação por alumínio do solo;  $\text{Ca}^{2+}$ : teores de cálcio;  $\text{S-SO}_4^{2-}$ : teores de sulfato; MR: massa seca de raízes; ECP: estoque de carbono particulado; ECAFL: estoque de carbono do ácido fúlvico livre; ECT: estoque de carbono total.

## 7.6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho ajudam a explicar a forma de ação do gesso no aumento da fixação de C no solo. A ação do gesso se dá primeiramente pela melhoria das propriedades químicas nas camadas de subsuperfície do solo (40-200 cm), com incremento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  e redução da saturação por  $\text{Al}^{3+}$ . O melhor ambiente químico promovido pelo gesso favorece o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. A boa relação obtida entre massa seca de raízes e estoques de C permite concluir que as raízes são a principal fornecedora de C em solos ácidos que receberam gesso. Por meio da análise multivariada confirmou-se que na camada de subsuperfície o incremento do estoque de CT foi favorecido pelo uso do gesso. Conclui-se, portanto, que as características condicionadoras do solo promovidas pelo gesso representam uma importante estratégia para o seu uso numa perspectiva de agricultura de baixa emissão de carbono.

## 7.7 REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANGST, G., MESSINGER, J., GREINER, M., HÄUSLER, W., HERTEL, D., KIRFEL, K., KÖGEL-KNABNER, I.; CHRISTOPH, L.; RETHEMEYER, J.; MUELLER, C. W. Soil organic carbon stocks in topsoil and subsoil controlled by parent material, carbon input in the rhizosphere, and microbial-derived compounds. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 122, p. 19-30, 2018.

ARAÚJO, L. G.; FIGUEIREDO, C. C.; SOUSA, D. M. G. Gypsum application increases the carbon stock in soil under sugar cane in the Cerrado region of Brazil. **Soil Research**, v. 55, n. 1, p. 38-46, 2017.

BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E. V. S. B.; TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B. Root dynamics in plant and ratoon crops of sugar cane. **Plant and Soil**, v. 142, n. 2, p. 297-305, 1992.

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, v. 65, n. 1, p. 10-21, 2014.

BOLAN, N. S.; SYERS, J. K.; SUMNER, M. E. Calcium-induced sulfate adsorption by soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, n. 3, p. 691-696, 1993.

BOLINDER, M. A.; ANGERS, D. A.; GIROUX, M.; LAVERDIERE, M. R. Estimating C inputs retained as soil organic matter from corn (*Zea Mays* L.). **Plant and Soil**, v. 215, n. 1, p. 85-91, 1999.

BRIEDIS, C., MORAES SÁ, J. C., CAIRES, E. F., FÁTIMA N. J., INAGAKI, T. M., BOER, A., NETO, C. Q.; FERREIRA, A. O.; CANALLI, L. B.; SANTOS, J. B. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. **Geoderma**, v. 170, p. 80-88, 2012.

CAIRES, E. F.; JORIS, H. A. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 45-53, 2011.

CAIRES, E. F.; ZARDO FILHO, R.; BARTH, G.; JORIS, H. A. Optimizing nitrogen use efficiency for no-till corn production by improving root growth and capturing NO<sub>3</sub>-N in Subsoil. **Pedosphere**, v. 26, n. 4, p. 474-485, 2016.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777-783, 1992.

CARMEIS FILHO, A. C.; PENN, C. J.; CRUSCIOL, C. A.; CALONEGO, J. C. Lime and phosphogypsum impacts on soil organic matter pools in a tropical Oxisol under long-term no-till conditions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 241, p. 11-23, 2017.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Perfil do setor do açúcar e do etanol no Brasil**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>> Acesso em: 31 maio 2018.

DABIN, B. Les matières organiques dans les sols tropicaux normalement drainés. **Cahiers de L'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Série Pédologie**, v. 16, p. 197-215, 1981.

DALLA NORA, D.; AMADO, T. J. C.; BORTOLOTTI, R. P.; FERREIRA, A. O.; REICHARDT, K. Subsoil chemical amelioration and crop yields under continuous long-term no-till in a subtropical Oxisol. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 45, p. 3338-3349, 2014.

DONN, M. J.; MENZIES, N. W.; RASIAH, V. Chemical characterisation of deep profile Ferrosols under sugarcane in wet tropical northern Queensland. **Soil Research**, v. 42, n. 1, p. 69-77, 2004.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 4, p. 529-538, 1995.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa Sistema de Informação: Brasília, 2013.

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P. Acid-subsoil amelioration: II. Gypsum effects on growth and subsoil chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, n. 1, p. 175-180, 1988.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. D. Visão além do alcance: uma introdução à análise fatorial. **Opinião Pública**, v. 16, n. 1, p. 160-185, 2010.

FRANCHINI, J. C.; GONZÁLEZ-VILA, F. J.; CABRERA, F.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Rapid transformations of plant water-soluble organic compounds in relation to cation mobilization in an acid Oxisol. **Plant and Soil**, v. 231, n. 1, p. 55-63, 2001.

GOEDERT, W. J. Management of the Cerrado soils of Brazil: a review. **Journal of Soil Science**, v. 34, n. 3, p. 405-428, 1983.

GROPPO, J. D.; LINS, S. R. M.; CAMARGO, P. B.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; MARTINS, S. C.; SALGADO, P. R.; EVANGELISTA, B.; VASCONCELLOS, E.; SANO, E. E.; PAVÃO, E.; LUNA, R.; MARTINELLI, L. A. Changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus due to land-use changes in Brazil. **Biogeosciences**, v. 12, p. 4765–4780, 2015.

HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; SKRUMSAGER, I.; WHITE, P. Functions of macronutrients. In: MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschners's mineral nutrition of higher plants**. Australia: The University of Adelaide: Elsevier, 2012. p.135-188

INAGAKI, T. M.; MORAES SÁ, J. C.; CAIRES, E. F.; GONÇALVES, D. R. P. Lime and gypsum application increases biological activity, carbon pools, and agronomic productivity in highly weathered soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 231, p. 156-165, 2016.

LAL, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology**, 2018.

LANDELL, M. G. A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A. C. M.; PERENCIN, D.; ROSSETO, R.; BIDOIA, M. A. P.; SILVA, M. A.; XAVIER, M. A. Oxisol subsurface

chemical attributes related to sugarcane productivity. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 4, p. 741-745, 2003.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. G. A. career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil. **Advances in Agronomy**, v. 137, p. 1-72, 2016.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E.; SILVA, J. E. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008.

MARCANO-MARTINEZ, E.; MCBRIDE, M. B. Calcium and sulfate retention by two Oxisols of the Brazilian Cerrado. **Soil Science Society of America Journal**, v. 53, n. 1, p. 63-69, 1989.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **3ª Comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima**. Disponível em: <[http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/1706739/Volume+2\\_final.pdf/bd5e3bf3-37f4-45b8-9e76-1398fbe5b3d3](http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/1706739/Volume+2_final.pdf/bd5e3bf3-37f4-45b8-9e76-1398fbe5b3d3)> Acesso em: 07 Junho 2018.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Disponível em: <<http://sirene.mcti.gov.br/infografico>> Acesso em: 29 Maio 2018.

OLIVEIRA FERREIRA, A.; AMADO, T. J. C.; RICE, C. W.; DIAZ, D. A. R.; BRIEDIS, C.; INAGAKI, T. M.; GONÇALVES, D. R. P. Driving factors of soil carbon accumulation in Oxisols in long-term no-till systems of South Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 622, p. 735-742, 2017.

ONTL, T. A.; CAMBARDELLA, C. A.; SCHULTE, L. A.; KOLKA, R. K. Factors influencing soil aggregation and particulate organic matter responses to bioenergy crops across a topographic gradient. **Geoderma**, v. 255, p. 1-11, 2015.

OTA, M.; NAGAI, H.; KOARASHI, J. Root and dissolved organic carbon controls on subsurface soil carbon dynamics: A model approach. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 118, p. 1646-1659, 2013.

OTTO, R.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; DE OLIVEIRA, E. C. A.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. The role of nitrogen fertilizers in sugarcane root biomass under field conditions. **Agricultural Sciences**, v. 5, n. 14, p. 1527-1538, 2014.

PAUSCH, J.; KUZYAKOV, Y. Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. **Global Change Biology**, v. 24, n. 1, p. 1-12, 201.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium, and aluminum following lime or gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, p. 33-38, 1984.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo-decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 911-920, 2008.

PIPPO, W. A.; LUENGO, C. A. Sugarcane energy use: accounting of feedstock energy considering current agro-industrial trends and their feasibility. **International Journal of Energy and Environmental Engineering**, v. 4, n. 1, p. 10, 2013

REIN, T. A. Surface chemical properties and nitrate adsorption of Oxisols from the Brazilian savannas. 2008. 509 p. (Tese doutorado), Cornell University, New York.

RITCHEY, K. D.; SILVA, J. E.; COSTA, U. F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savanna oxisols. **Soil Science**, v. 133, n. 6, p. 378-382, 1982.

RITCHEY, K. D.; SOUZA, D. M.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian Savannah Oxisol. **Agronomy Journal**, v. 72, n. 1, p. 40-44, 1980.

ROBERTSON, F. A.; THORBURN, P. J. Management of sugarcane harvest residues: consequences for soil carbon and nitrogen. **Soil Research**, v. 45, n. 1, p. 13-23, 2007.

ROWLEY, M. C.; GRAND, S.; VERRECCHIA, É. P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. **Biogeochemistry**, v. 137, n. 1-2, p. 27-49, 2018.

RUMPEL, C.; KÖGEL-KNABNER, I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. **Plant and Soil**, v. 338, n. 1-2, p. 143-158, 2011.

SA, J. C. M.; TIVET, F.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; HARTMAN, D. C.; SANTOS, J. Z.; SANTOS, J. B. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 136, p. 38-50, 2014.

SCHIAVO, J. A.; BUSATO, J. G.; MARTINS, M. A.; CANELLAS, L. P. Recovery of degraded areas revegetated with *Acacia Mangium* and *Eucalyptus* with special reference to organic matter humification. **Scientia Agrícola**, v. 66, n. 3, p. 353-360, 2009.

SILVA-OLAYA, A. M.; DAVIES, C. A.; CERRI, C. E. P.; ALLEN, D. J.; MELLO, F. F. C.; CERRI, C. C. Quantifying above and belowground biomass carbon inputs for sugar-cane production in Brazil. **Soil Research**, v. 55, n. 7, p. 640-648, 2017.

SMITH, D. M.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3, p. 169-183, 2005.

SOUSA, D. M. G.; REIN, T. R.; LOBATO, E.; RITCHEY, K. D. Sugestões para a diagnose e recomendação de gesso em solos de Cerrado. In: **Anais Seminário sobre o uso do gesso na agricultura**, Uberaba, Brasil, 1992, p. 139-158.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004.

SOUZA, G. P. D.; FIGUEIREDO, C. C. D.; SOUSA, D. M. G. D. Soil organic matter as affected by management systems, phosphate fertilization, and cover crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1668-1676, 2016.

TISDALL, J. M.; OADES, J. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141-163, 1982.

VON UEXKÜLL, H. R.; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant and Soil**, v. 171, n. 1, p. 1-15, 1995.

ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T. M.; MILTNER, A.; SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, v. 79, n. 1-4, p. 117-161, 1997.

ZOCA, S. M.; PENN, C. An important tool with no instruction manual: a review of gypsum use in agriculture. **Advances in Agronomy** v. 144, p. 1-44, 2017.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do gesso promoveu a melhoria das propriedades químicas das camadas subsuperficiais do solo, relacionado principalmente ao aumento dos teores de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{S-SO}_4^{2-}$  e redução da toxidez por  $\text{Al}^{3+}$ . Essa melhoria foi observada aos 13 meses e se estendeu até 87 meses da aplicação do gesso. Devido a essas melhorias, o uso do gesso favoreceu o maior crescimento radicular, o aumento do comprimento e a redução do diâmetro das raízes no perfil do solo e ao longo da entrelinha de plantio.

A maior capacidade de absorção de água e nutrientes do sistema radicular da cana-de-açúcar devido ao uso do gesso, promoveu melhor nutrição e, conseqüentemente, incrementou a produtividade da cana-de-açúcar nos sete cortes avaliados. Portanto, o presente trabalho contribui para melhorar a compreensão acerca da dinâmica do gesso no perfil do solo, na nutrição e produtividade da cana-de-açúcar e no crescimento das raízes.

O maior crescimento de raízes nos tratamentos com aplicação de gesso favoreceu o incremento no estoque de carbono na camada de maior atuação desse corretivo (40-200 cm). Considerando a grande área ocupada pela cana-de-açúcar no Brasil, que ultrapassa 8 milhões de hectares a utilização do gesso nesse cultivo pode contribuir, com a maior produção de açúcar e etanol de forma sustentável a partir da maior fixação de C. Dessa forma, o uso do gesso se apresenta como uma alternativa para o sequestro de carbono no solo nas camadas subsuperficiais e representa uma tecnologia importante com enfoque na agricultura de baixo carbono.

## **9 APÊNDICES**

## APÊNDICE A: Capítulo II

**Tabela 1:** Teores de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), sulfato ( $\text{S-SO}_4^{2-}$ ) e alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) do solo, após 87 meses da aplicação do gesso nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente).

Camada cm	$\text{Ca}^{2+}$			$\text{S-SO}_4^{2-}$			$\text{Al}^{3+}$		
	P1	P2	P3	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			P1	P2	P3
----- <i>Sem gesso</i> -----									
0-20	0,40	1,89	2,56	0,06	0,05	0,06	0,68	0,03	0,01
20-40	0,46	1,68	1,92	0,07	0,04	0,03	0,61	0,02	0,02
40-60	0,30	0,34	0,34	0,03	0,03	0,05	0,44	0,28	0,40
60-80	0,15	0,24	0,17	0,06	0,02	0,02	0,39	0,27	0,33
80-100	0,16	0,20	0,12	0,04	0,02	0,01	0,22	0,14	0,18
100-120	0,12	0,18	0,11	0,01	0,01	0,04	0,11	0,06	0,05
120-140	0,16	0,19	0,12	0,01	0,01	0,02	0,04	0,00	0,00
140-160	0,18	0,21	0,12	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
160-180	0,19	0,21	0,14	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00
180-200	0,19	0,19	0,13	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
----- <i>Com gesso</i> -----									
0-20	0,42	2,25	3,03	0,18	0,08	0,05	0,88	0,06	0,01
20-40	0,67	1,89	2,19	0,38	0,34	0,28	0,71	0,14	0,03
40-60	0,41	0,49	0,65	0,71	0,63	0,75	0,66	0,34	0,32
60-80	0,45	0,47	0,49	0,67	0,42	0,73	0,31	0,22	0,24
80-100	0,48	0,40	0,23	0,55	0,15	0,22	0,09	0,13	0,17
100-120	0,45	0,36	0,13	0,22	0,07	0,04	0,04	0,06	0,04
120-140	0,27	0,29	0,15	0,05	0,03	0,02	0,03	0,00	0,00
140-160	0,25	0,32	0,14	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00
160-180	0,28	0,29	0,16	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
180-200	0,27	0,26	0,15	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00

**Tabela 2:** Saturação por  $Al^{3+}$ , capacidade de troca catiônica efetiva ( $CTC_{efetiva}$ ) e pH  $CaCl_2$ , após 87 meses da aplicação do gesso nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente).

Camada cm	Saturação por $Al^{3+}$			$CTC_{efetiva}$			pH $CaCl_2$		
	-----%-----			----- $cmol_c\ dm^{-3}$ -----			P1	P2	P3
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
----- <i>Sem gesso</i> -----									
0-20	34,56	0,96	0,30	1,97	3,50	4,60	4,40	5,04	5,46
20-40	38,76	0,71	0,52	1,57	2,87	3,86	4,42	5,16	5,40
40-60	42,92	25,18	32,56	1,02	1,13	1,21	4,44	4,59	4,52
60-80	54,58	31,74	46,18	0,71	0,85	0,71	4,46	4,53	4,49
80-100	41,61	23,40	40,22	0,53	0,61	0,44	4,52	4,64	4,57
100-120	29,52	13,67	17,68	0,37	0,42	0,30	4,62	4,75	4,71
120-140	13,01	0,79	0,44	0,34	0,37	0,26	4,76	4,90	4,83
140-160	0,41	0,34	0,58	0,37	0,46	0,27	4,94	5,02	4,93
160-180	0,40	0,29	0,46	0,43	0,47	0,31	5,03	5,12	5,05
180-200	0,28	0,34	0,42	0,43	0,46	0,36	5,17	5,21	5,15
----- <i>Com gesso</i> -----									
0-20	42,50	1,56	0,27	2,09	3,79	4,48	4,39	5,03	5,35
20-40	37,20	5,20	0,88	1,90	2,78	3,10	4,51	4,80	5,15
40-60	47,79	27,41	21,20	1,37	1,23	1,54	4,40	4,57	4,66
60-80	30,56	21,12	20,08	1,03	1,07	1,20	4,59	4,66	4,68
80-100	11,06	15,09	23,04	0,86	0,84	0,75	4,85	4,68	4,62
100-120	5,10	8,50	11,49	0,72	0,69	0,38	4,88	4,76	4,71
120-140	6,58	0,42	0,65	0,42	0,48	0,34	4,85	4,87	4,84
140-160	0,45	0,34	0,66	0,38	0,51	0,33	4,93	5,03	4,92
160-180	0,35	0,51	0,40	0,39	0,47	0,35	5,06	5,07	5,01
180-200	0,32	0,41	0,54	0,39	0,43	0,34	5,13	5,11	5,10

**Tabela 3:** Magnésio, potássio e capacidade de troca catiônica à pH 7 (CTC<sub>pH7</sub>), após 87 meses da aplicação do gesso nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente).

Camada cm	Magnésio <sup>+</sup>			Potássio			CTC <sub>pH7</sub>		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
	-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----								
	<i>Sem gesso</i>								
0-20	0,38	1,09	1,69	0,51	0,48	0,34	8,23	8,40	8,56
20-40	0,34	1,09	1,87	0,16	0,08	0,05	6,80	7,08	7,93
40-60	0,21	0,47	0,45	0,07	0,04	0,03	5,36	5,08	5,42
60-80	0,12	0,31	0,20	0,05	0,03	0,02	4,56	4,63	4,53
80-100	0,10	0,24	0,13	0,05	0,03	0,01	3,88	4,02	3,78
100-120	0,11	0,16	0,12	0,03	0,02	0,01	3,29	3,36	3,21
120-140	0,12	0,16	0,13	0,02	0,01	0,01	2,96	2,73	2,89
140-160	0,17	0,23	0,14	0,02	0,01	0,01	2,69	2,75	2,65
160-180	0,22	0,25	0,17	0,02	0,01	0,01	2,50	2,44	2,34
180-200	0,22	0,26	0,22	0,01	0,01	0,01	2,26	2,19	2,20
	----- <i>Com gesso</i> -----								
0-20	0,39	1,06	1,11	0,40	0,42	0,33	8,08	9,06	8,74
20-40	0,36	0,66	0,83	0,16	0,08	0,05	7,15	7,81	7,71
40-60	0,23	0,37	0,53	0,06	0,03	0,03	5,78	5,69	5,98
60-80	0,23	0,35	0,46	0,04	0,02	0,02	4,96	5,04	5,15
80-100	0,25	0,30	0,34	0,03	0,01	0,01	4,29	4,10	4,18
100-120	0,21	0,26	0,19	0,02	0,01	0,01	3,53	3,74	3,36
120-140	0,11	0,18	0,18	0,02	0,01	0,01	2,98	3,04	2,90
140-160	0,12	0,19	0,17	0,01	0,01	0,01	2,56	2,62	2,50
160-180	0,10	0,17	0,18	0,01	0,01	0,01	2,50	2,56	2,47
180-200	0,11	0,16	0,18	0,01	0,01	0,01	2,30	2,24	2,27

**Tabela 4:** Atributos radiculares da sexta soca (sétimo corte), após 87 meses da aplicação do gesso nas posições P1, P2 e P3 (20, 47,5 e 75 cm de distância da linha de plantio, respectivamente).

Camada cm	Comprimento radicular			Diâmetro radicular			Conteúdo de fibras		
	-----cm cm <sup>-3</sup> -----			-----mm-----			-----%-----		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
----- <i>Sem gesso</i> -----									
0-20	2,20	1,01	0,70	0,44	0,40	0,40	68,46	73,33	73,11
20-40	2,42	1,41	1,22	0,44	0,40	0,40	66,18	70,75	71,82
40-60	0,92	1,14	0,93	0,46	0,41	0,41	67,06	70,66	71,42
60-80	1,26	0,98	0,92	0,42	0,41	0,41	69,17	70,95	69,11
80-100	0,99	0,86	0,78	0,41	0,41	0,40	70,03	69,77	69,83
100-120	0,89	0,93	0,47	0,40	0,40	0,41	71,69	69,76	73,03
120-140	0,65	0,82	0,58	0,40	0,39	0,41	74,88	71,09	72,93
140-160	0,44	0,70	0,46	0,39	0,39	0,40	73,58	71,88	73,08
160-180	0,65	0,53	0,33	0,39	0,38	0,40	72,80	72,32	74,84
180-200	0,38	0,49	0,22	0,38	0,38	0,38	74,98	73,62	75,86
----- <i>Com gesso</i> -----									
0-20	2,16	0,87	0,84	0,42	0,41	0,39	62,27	67,39	68,38
20-40	2,49	1,38	1,21	0,41	0,40	0,38	62,87	65,95	69,30
40-60	2,19	1,48	1,37	0,42	0,40	0,39	65,37	65,97	68,47
60-80	1,72	1,49	1,56	0,40	0,39	0,38	67,35	68,14	66,16
80-100	1,84	1,23	1,01	0,38	0,38	0,38	67,98	68,14	67,53
100-120	1,65	1,25	0,94	0,38	0,38	0,38	69,83	68,46	68,22
120-140	1,10	1,33	0,96	0,37	0,37	0,37	70,52	69,94	71,28
140-160	0,81	1,12	0,84	0,37	0,37	0,37	71,98	70,54	71,15
160-180	1,31	1,09	0,69	0,36	0,36	0,35	70,47	71,23	72,28
180-200	0,89	0,80	0,66	0,36	0,35	0,36	72,20	72,94	72,33

## APÊNDICE B: Capítulo III

**Tabela 1:** Densidade e estoque de carbono associado aos minerais (CM) do solo após o cultivo por sete anos com cana-de-açúcar, sem e com aplicação de gesso.

Profundidade	Doses de gesso (t ha <sup>-1</sup> )			
	0		5	
	Densidade		Estoque de CM	
cm	----- g cm <sup>-3</sup> -----		----- t ha <sup>-1</sup> -----	
0-20	1,09 <sup>ns</sup>	1,07 <sup>ns</sup>	34,7	35,3
20-40	1,03 <sup>ns</sup>	1,04 <sup>ns</sup>	28,2	29,5
40-60	1,04 <sup>ns</sup>	1,05 <sup>ns</sup>	21,6	23,1
60-80	1,04 <sup>ns</sup>	1,04 <sup>ns</sup>	16,4	18,3
80-100	1,04 <sup>ns</sup>	1,03 <sup>ns</sup>	14,5	15,0
100-120	1,06 <sup>ns</sup>	1,06 <sup>ns</sup>	12,1	13,3
120-140	1,06 <sup>ns</sup>	1,06 <sup>ns</sup>	10,2	11,6
140-160	1,06 <sup>ns</sup>	1,06 <sup>ns</sup>	9,9	10,8
160-180	1,09 <sup>ns</sup>	1,08 <sup>ns</sup>	9,4	9,8
180-200	1,09 <sup>ns</sup>	1,08 <sup>ns</sup>	9,0	9,4

<sup>ns</sup> Não significativo pelo teste *t* (p<0,05).