



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

THIAGO OMETTO ZORZENONI

**APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO E GESSO NA
QUARTA SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Londrina
2018

THIAGO OMETTO ZORZENONI

**APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO E GESSO NA
QUARTA SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia

Orientador: Prof. Dr. João Tavares Filho

Londrina
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Zorzenoni, Thiago Ometto.

Aplicação superficial de calcário e gesso na quarta soqueira de cana-de-açúcar / Thiago Ometto Zorzenoni. - Londrina, 2018.
89 f. : il.

Orientador: João Tavares Filho.

Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2018.
Inclui bibliografia.

1. Agricultura - Tese. 2. Cana-de-açúcar - Tese. 3. Raízes - Tese. 4. Compactação - Tese. I. Tavares Filho, João . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

THIAGO OMETTO ZORZENONI

**APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO E GESSO NA QUARTA
SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. João Tavares Filho
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Adônis Moreira
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária –
EMBRAPA Soja

Prof. Dr. Gustavo Adolfo de Freitas Fregonezi
Centro Universitário Filadelfia - UNIFIL

Profa. Dra. Carmen Silvia Vieira Janeiro Neves
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Profa. Dra. Marla Alessandra de Araújo
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 27de abril de 2018.

Dedico este trabalho aos meus pais
Airton e Neuza

AGRADECIMENTOS

À Deus pela minha saúde e por toda ajuda concebida em minha caminhada.

À Universidade Estadual de Londrina (UEL) e ao Programa de Pós Graduação em Agronomia pela oportunidade concedida de aperfeiçoamento profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado.

Aos professores Dr. João Tavares Filho e Dr^a Cristiane de Conti Medina pelo acolhimento, confiança e orientações recebidos durante esses anos.

Ao professor Dr. Eduardo Rando Meneghel (*in memoriam*) por possibilitar a execução da tese e pela sua acolhedora recepção e disponibilização dos recursos fornecidos pela Usina Bandeirantes.

Aos acionistas e ao corpo diretivo da Usina Bandeirantes, em especial Armando Meneghel, pelo apoio recebido para a realização da pesquisa.

À divisão agrícola da Usina Bandeirantes, Marcelo Fiorucci Pinheiro, Norma Suely de Melo Prado, Henrique Cesar Andrade, Valdeci Inacio, Márcio Tanaka, José Mário da Silva e, em especial, Antonio Andrade (Juma) pela valiosa colaboração e aprendizado.

Aos colaboradores que atuaram na abertura de trincheiras para a caracterização do solo, na implantação do experimento, no corte da cana-de-açúcar e na preparação das trincheiras para contagem das raízes: Ailton José Alves, Jeferson Soveli, Carlos Roberto Orlando, Claudio Pereira de Souza, Aristides dos Santos, Abel Gomes, Francisco Belchior, Reinaldo Martins Dias, José Alves Faria, Florivaldo Gomes Domiciano, João Soares da Silva, Pedro dos Santos, Alaide de Moraes Filho, Marcelo Aparecido da Costa, José Carlos da Silva, Lauro Henrique Félix de Souza, Devanil Losio, Mário Sabino.

Aos tratoristas da USIBAN e das empresas tercerizadas, Francisco Smania (Chiquito), Daniel Rodrigues, Roberto Matias.

À equipe do laboratório de PCTS da Usina Bandeirantes, pelas análises tecnológicas efetuadas.

Aos técnicos do Laboratório de Solos da Universidade Estadual de

Londrina, Marcio Praxedes e João Machado, pelo aprendizado e apoio para a realização das análises química do solo.

Ao professor Dr. Wesley Machado pelo apoio para a realização das análises físicas.

À Dr^a Graziela Moraes de Cesare Barbosa (IAPAR), pela determinação do Ponto de Murcha Permanente e Capacidade de Campo das amostras indeformadas.

À Divisão de transporte da UEL, Vanessa Correia de Barros Dias e Jonas Villa e aos motoristas, Alex Rubbo de Sá, Arlindo da Silva Barreiros, Daril Romano Pereira, Helio Molina, Joaquim José da Silva, José Airton Ferreira, Nelson Aparecido Goes, Vanderley Soares da Silva, Wilson dos Santos, pela valiosa colaboração e paciência.

À secretária do Programa de Pós Graduação Weda Aparecida Westin, pela valiosa colaboração e dedicação.

Ao professor Eli Oliveira, pela amizade e por todos esclarecimentos e orientações recebidos sobre estatística.

Ao professor Marcelo Augusto de Aguiar e Silva pelas sugestões recebidas na qualificação e pela orientação e esclarecimentos das dúvidas relativas à Agrometeorologia.

À meus pais, João Airton Zorzenoni e Neuza Maria Ometto Zorzenoni por todo apoio e incentivo recebido.

À minha namorada, Dione Mieke Chung pela paciência, incentivo e apoio recebido nessa etapa.

Aos amigos Leandro Higashibara, Rai Rigonatto Bastista, Lucas de Assis Moraes, Aguinaldo Pacheco de Andrade, Jéssica Barbieri Carvalho, Kássio Garcia, Jean Carlo Oliveira, Alex Figueiredo, Thadeu Rodrigues de Melo, Paulo Contador Zaccheo, Solange de Paula Ramos, Ricardo Okumura, Hevandro Colanhese Delalibera, Kawana Bortolato, Letícia Salvi Kohn pela amizade e companheirismo.

Aos demais colegas do Programa de Pós Graduação em Agronomia, pela amizade e convivência durante todos esses anos.

ZORZENONI, Thiago Ometto. **Aplicação superficial de calcário e gesso na quarta soqueira de cana-de-açúcar**. 2018. 89f. Tese de Doutorado em Agronomia – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

RESUMO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura semiperene de forma que, ao longo do seu cultivo, ocorrem alterações significativas na rizosfera que culminam em redução de produtividade e necessidade da reforma do canavial. Os objetivos gerais desse trabalho foram avaliar o efeito das doses de calcário e gesso nos atributos do solo, no sistema radicular, no desenvolvimento vegetativo e nos aspectos produtivos da soqueira de cana-de-açúcar, visando a recuperação da produtividade e aumento da longevidade do canavial. O experimento foi instalado em Andirá-PR, na quarta soqueira da variedade RB855453, em blocos ao acaso, com as doses C0G0, 0 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (C) e 0 Mg ha⁻¹ de gesso (G), C0G2, C0G4, C0G8, as quais constituem 0, ½, 1 e 2NG, em que NG é a necessidade de gesso e C3G0, C6G0, sendo as doses de 1 e 2NC, sendo as doses recomendadas para elevar a saturação por bases à 60% e C3G4, a dose recomendada de calcário e gesso. Após 12 meses do corte da safra anterior e 8 meses da aplicação dos insumos, o experimento foi colhido e a produtividade de colmos, sacarose e análises da qualidade tecnológica foram determinados em cada parcela. As amostras para análises químicas foram coletadas nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80, 0,80-1,00 m, sendo analisados: pH em CaCl₂, carbono orgânico (CO), acidez potencial (H+Al), fósforo disponível (P), alumínio trocável (Al³⁺), cálcio trocável (Ca²⁺), magnésio trocável (Mg²⁺), potássio trocável (K⁺), enxofre (S-SO₄⁻²), soma de bases (SB), saturação por base (V) e saturação por alumínio (m). Amostras indeformadas (2 subamostras por profundidade), foram coletadas para a determinação da densidade do solo, macro, microporosidade e a porosidade total, nas profundidades 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m. Foram realizadas avaliações no sistema radicular através do método do perfil. Após 20 meses da aplicação dos insumos, foram coletadas amostras para as análises químicas e amostras indeformadas, nas mesmas camadas amostradas anteriormente e realizados as avaliações no sistema radicular, para avaliação do efeito residual das aplicações dos insumos. A compactação não permitiu a reação uniforme dos insumos aplicados e não foram observadas redução da saturação de alumínio e aumento da saturação de cálcio na subsuperfície. Dessa forma, não houve alteração do sistema radicular e da produtividade de colmos e sacarose, e portanto, não foi possível postergar a reforma do canavial. Não foram observadas alterações na densidade e porosidade do solo com a aplicação das doses ao longo do período avaliado. Na superfície do solo, as doses de gesso causaram redução dos teores de potássio e magnésio. Durante o primeiro ano de avaliação, a dose associada de calcário e gesso promoveu a maior distribuição de magnésio no perfil do solo, porém na safra seguinte, essa condição não foi verificada.

Palavras-chave: *Saccharum spp.* Raízes. Compactação. Produtividade de colmos e sacarose. Qualidade tecnológica.

ZORZENONI, Thiago Ometto. **Surface application of lime and gypsum in the fourth sugarcane ratoon.** 2018. 89p. Thesis (Doctorate in Agronomy) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2018.

ABSTRACT

Sugarcane (*Saccharum* spp.) is a semi-perennial crop, so that throughout its cultivation, there are significant changes in the rhizosphere that culminate in reduced productivity and the need to replant sugarcane field. The overall aims of this work were to evaluate the effect of lime and gypsum doses on soil attributes, root system, vegetative development and productive aspects of the sugarcane ratoon, aiming at the recovery of productivity and increase longevity of the sugarcane field. The experiment was installed in Andirá-PR, in the fourth ratoon of the variety RB855453, in randomized blocks, with the doses C0G0, 0 Mg ha⁻¹ of dolomitic lime (C) and 0 Mg ha⁻¹ of gypsum (G), C0G2, C0G4, C0G8, which constitute 0, ½, 1, and 2NG, where NG is the requirement for gypsum and C3G0, C6G0, the doses of 1 and 2NC being the recommended doses to raise the base saturation at 60% and C3G4, the recommended dose of lime and gypsum. After 12 months of cutting the previous crop and 8 months of the application of the inputs, the experiment was harvested and the yield of stalks, sucrose and analyzes of the technological quality was determined in each plot. Samples for chemical analyzes were collected for the depths 0.00-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, 0.40-0.60, 0.60-0.80, 0.80-1.00 m, and analyzed: pH in CaCl₂, organic carbon (CO), potential acidity (H+Al), available phosphorus (P), exchangeable aluminum (Al³⁺), exchangeable calcium (Ca²⁺), exchangeable magnesium (Mg²⁺), exchangeable potassium (K⁺), sulphur (S-SO₄²⁻), sum of bases (SB), base saturation (V) and aluminum saturation (m). Undeformed samples (2 subsamples by depth), were collected for the determination of soil density, macro, microporous and total porosity, in the depths 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, 0.40-0.60, 0.60-0.80 and 0.80-1.00 m. Evaluations were performed in the root system using the profile method. After 20 months of the application of the inputs, samples were collected for the chemical analyzes and undeformed samples, in the same layers previously sampled and the evaluations were carried out in the root system, to evaluate the residual effect of the input applications. The compaction did not allow the uniform reaction of the applied materials and it was not observed reduction of the aluminum saturation and no increase of the saturation of calcium in the subsurface. Therefore, there was no change in the root system and productivity of stalks and sucrose, so that replant of sugarcane field could not be postponed. There were not observed changes in soil density and porosity with the application of the doses over the evaluated period. At the soil surface, the doses of gypsum caused a decrease in potassium and magnesium contents. During the first year of evaluation, the associated dose of lime and gypsum promoted a greater distribution of magnesium in the soil profile, but in the next harvest, this condition was not verified.

Key words: *Saccharum* spp. Roots. Compaction. Productivity of stalks and sucrose. Technological quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 -	O sistema radicular inicial da cana-de-açúcar, com as raízes do tolete sendo originados pelo nó e as raízes dos perfilhos emergindo da base dos perfilhos	17
Figura 2.2 -	Sistema radicular de uma touceira estabelecida, com os três tipos funcionais de raízes: superficial, fixação e cordão.....	18
ARTIGO A		
Figura 3.1 -	Balanço hídrico durante o período do experimento (2015-2016).....	40
Figura 3.2 -	Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar (número de raízes 100 cm ⁻²) nas doses C0G0 (a), C0G2 (b), C0G4 (c), C0G8 (d), C3G0 (e), C6G0 (f) e C3G4 (g).....	54
Figura 3.3 -	População de perfilhos m ⁻² (a), altura de plantas (b) e diâmetro de colmos (c) do 5º corte, variedade RB 85-5453 em diferentes doses de calcário e gesso.....	56
ARTIGO B		
Figura 4.1 -	Balanço hídrico durante a condução da soqueira no sexto corte (2016-2017).....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Valores do Poder de Neutralização (PN), soma de óxidos (%CaO + %MgO) e PRNT.....	23
Tabela 2.2 -	Recomendações das doses de gesso para o Estado do Paraná, em função do teor de argila.....	29
ARTIGO A		
Tabela 3.1 -	Atributos químicos determinados antes da implantação do experimento.....	41
Tabela 3.2 -	Atributos químicos do solo, saturação por cálcio, Ca ²⁺ (%), saturação por magnésio, Mg ²⁺ (%), saturação por potássio, K ⁺ (%) e saturação por alumínio m (%) para diferentes profundidades em relação as doses de calcário e gesso aplicadas (C0G0, C0G2, C0G4, C0G8, C3G0, C6G0 e C3G4)	45
Tabela 3.3 -	Doses de calcário e gesso (C0G0, C0G2, C0G4, C0G8, C3G0, C6G0 e C3G4) e teores de S-SO ₄ ²⁻ nas camadas avaliadas.	47
Tabela 3.4 -	Propriedades físicas do solo (densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade e umidade do solo) para diferentes profundidades em relação as doses de calcário e gesso aplicadas (C0G0, C0G2, C0G4, C0G8, C3G0, C6G0 e C3G4)	49
Tabela 3.5 -	Percentual de raízes nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40, 0,40-0,50, 0,50-0,60, 0,60-0,70, 0,70-0,80, 0,80-0,90, 0,90-1,00 m e profundidade efetiva das raízes (PE) de cana-de-açúcar submetida a diferentes doses de calcário (C) e gesso (G).....	51
Tabela 3.6 -	Produtividade de colmos (TCH), Brix, Fibra, Pol da cana (PCC), Açúcares Redutores (AR) Açúcares Redutores Totais (ART) e Produtividade de Sacarose (TSH)	57
Tabela 3.7 -	Relação entre teor de S-SO ₄ ²⁻ nas diversas profundidades entre o pol da cana (PCC) e açúcar	

reductor total (ART)58

ARTIGO B

Tabela 4.1 –	Atributos químicos determinados antes da implantação do experimento	64
Tabela 4.2 –	Atributos químicos do solo para as doses de calcário e gesso nas profundidades selecionadas	67
Tabela 4.3 –	Doses de calcário e gesso e saturação de alumínio (m), saturação por bases (V), saturação por cálcio (Ca^{2+}), saturação por magnésio (Mg^{2+}) e saturação por potássio (K^+) para as profundidades selecionadas	68
Tabela 4.4 –	Atributos físicos do solo (densidade, macroporosidade e porosidade total) nas camadas selecionadas, após 20 meses da aplicação das doses de calcário e gesso	69
Tabela 4.5 –	Doses de calcário e gesso e teores de Mn^{2+} (mg dm^{-3}) nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m	70
Tabela 4.6 –	Percentual de raízes nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40, 0,40-0,50, 0,50-0,60, 0,60-0,70, 0,70-0,80, 0,80-0,90, 0,90-1,00 m e profundidade efetiva das raízes (PE) de cana-de-açúcar submetida a doses de calcário (C) e gesso (G).....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR	Açúcares Redutores
ART	Açúcares Redutores Totais
CV	Coefficiente de Variação
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
m	Saturação por Alumínio
Mg	Megagrama
NC	Necessidade de Calagem
PE	Profundidade Efetiva das Raízes
PRNT	Poder Relativo de Neutralização Total
SS	Superfosfato Simples
ST	Superfosfato Triplo
TCH	Produtividade de Colmos
TSH	Produtividade de Sacarose
V	Saturação por bases
Var	Variedade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	IMPORTÂNCIA DA CANA-DE-AÇÚCAR	15
2.2	O SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR E O SEU DESENVOLVIMENTO	16
2.3	ESTADIOS FENOLÓGICOS DA CANA-DE-AÇÚCAR	19
2.4	CORRETIVOS DE ACIDEZ	21
2.5	CÁLCULO DA NECESSIDADE DE CALAGEM (NC) E RECOMENDAÇÕES PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR	24
2.6	GESSO AGRÍCOLA	25
2.7	CRITÉRIO PARA DIAGNOSE E CÁLCULO DA DOSE DE GESSO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR	29
2.8	EFEITOS DA APLICAÇÃO DE CALCÁRIO E GESSO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR	30
2.9	EFEITOS DA APLICAÇÃO DE CALCÁRIO E GESSO NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO	32
2.10	COMPACTAÇÃO DOS SOLOS CULTIVADOS COM CANA DE AÇÚCAR E AS VARIÁVEIS INDICATIVAS DE SUA OCORRÊNCIA	33
3	ARTIGO A: APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO E GESSO NA QUARTA SOQUEIRA VISANDO A RECUPERAÇÃO DA RIZOSFERA, PRODUTIVIDADE E LONGEVIDADE DO CANAVIAL	36
3.1	RESUMO	36
3.2	ABSTRACT.....	37
3.3	INTRODUÇÃO	38
3.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
3.5.1	Atributos Químicos e Físicos do Solo.....	44
3.5.2	Sistema Radicular	51
3.5.3	Biometria, Produtividade e Qualidade Tecnológica.....	55
3.6	CONCLUSÕES.....	59

4	ARTIGO B: EFEITO RESIDUAL DAS DOSES DE CALCÁRIO E GESSO E SUA INFLUÊNCIA NO CRESCIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR	60
4.1	RESUMO	60
4.2	ABSTRACT.....	61
4.3	INTRODUÇÃO	62
4.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	63
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.6	CONCLUSÕES.....	71
5	CONCLUSÕES GERAIS	72
	REFERÊNCIAS	73
	APÊNDICES	82
	APÊNDICE A – Custo operacional de implantação de 1 hectare de cana-de-açúcar no norte do Paraná para a safra 2015/2016.....	83
	APÊNDICE B – Custo operacional de cultivo de 1 hectare de soqueira de cana-de-açúcar no norte do Paraná para a safra 2015/2016.....	85
	APÊNDICE C – Custo de aplicação da dose recomendada de calcário em 1 hectare de soqueira de cana-de-açúcar no norte do Paraná para a safra 2015/2016	86
	APÊNDICE D – Custo de aplicação da dose recomendada de gesso em 1 hectare de soqueira de cana-de-açúcar no norte do Paraná para a safra 2015/2016	87
	APÊNDICE E – Custo de aplicação das doses recomendadas de calcário e gesso em 1 hectare de soqueira de cana-de-açúcar no norte do Paraná para a safra 2015/2016	88
	APÊNDICE F – Conversão do custo aplicação das doses de calcário e gesso em soqueira de cana-de-açúcar no norte do Paraná para a safra 2015/2016 em ATR e toneladas de cana-de-açúcar	89

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene e ao longo do seu cultivo, ocorrem alterações importantes na rizosfera, como a redução das bases do solo pela remoção das colheitas, levando ao aumento da acidez do solo. Além disso, conforme ocorrem os cultivos das soqueiras, o sistema radicular da cana-de-açúcar em cada safra torna-se mais superficial.

Somado a isso, com a mudança do sistema de colheita, passando do sistema semi-mecanizado com corte manual e despalha à fogo, para a colheita mecanizada, observa-se atualmente, aumento da compactação com consequências na queda da produtividade de colmos e na redução da longevidade do canavial, levando ao replantio (também conhecido como reforma do canavial).

O custo de implantação do canavial é muito superior ao custo de cultivo da soqueira, devido à economia com o custo do preparo de solo, mudas e das demais operações (o impacto desses custos pode ser observado nos apêndices A e B, páginas 80 a 82). Dessa forma, deve-se buscar reverter essa queda de produtividade do canavial, postergando ao máximo possível a reforma.

A hipótese testada para contornar esse problema, foi melhorar o desenvolvimento e o aprofundamento do sistema radicular da soqueira, proporcionando um aumento de produtividade de colmos e sacarose e conseqüentemente, aumento na longevidade do canavial e postergando a necessidade de reforma do mesmo.

Os objetivos gerais desse trabalho foram avaliar o efeito das doses de calcário e gesso nos atributos do solo, no sistema radicular, no desenvolvimento vegetativo e nos aspectos produtivos da soqueira de cana-de-açúcar, visando a recuperação da produtividade e aumento da longevidade do canavial.

Ressalta-se também que, a fim de determinar o incremento em produtividade necessário para empatar o custo da aplicação desses insumos, foram elaborados os custos da aplicação das doses de calcário e gesso (apêndices C, D e E) e sua equivalência em colmos de cana-de-açúcar (apêndice F).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 IMPORTÂNCIA DA CANA-DE-AÇÚCAR

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (FAOSTAT, 2018), constituindo matéria-prima para a produção de etanol, açúcar e energia-elétrica. Com isso, nosso país é o primeiro produtor mundial de açúcar (FAOSTAT, 2018) e o segundo produtor mundial de etanol (RFA, 2018). Em 2016, a matriz energética brasileira utilizou 43,5% de fontes renováveis, a qual a energia da cana-de-açúcar ocupou o primeiro lugar das fontes renováveis, com participação de 17,5% da oferta interna de energia (EPE, 2017), contribuindo para a matriz energética brasileira ser mais renovável que a média mundial e reduzindo a emissão dos gases de efeito estufa, as quais são causadores do aquecimento global. No campo econômico, de acordo com os dados compilados no Sistema Agristat Brasil (MAPA, 2018), as exportações do agronegócio em 2017 foram de US\$ 96,01 bilhões, a qual o setor sucroalcooleiro foi o terceiro maior item da pauta exportação, responsável por US\$ 12,23 bilhões, estando o complexo soja em primeiro lugar, com o aporte de US\$ 31,71 bilhões e em segundo lugar, o setor de carnes com US\$ 15,47 bilhões. Além de favorecer a balança comercial brasileira, o setor sucroalcooleiro é um grande gerador de empregos diretos e indiretos.

Em relação ao futuro, existem perspectivas de crescimento da importância da cana-de-açúcar, visto que de acordo com Leal et al. (2013), cerca de um terço da energia da cana-de-açúcar está contida na palhada e encontra-se subutilizada, podendo ser empregada como matéria-prima para a produção de etanol celulósico ou ser queimada em conjunto com o bagaço no processo de cogeração, produzindo energia elétrica e energia térmica.

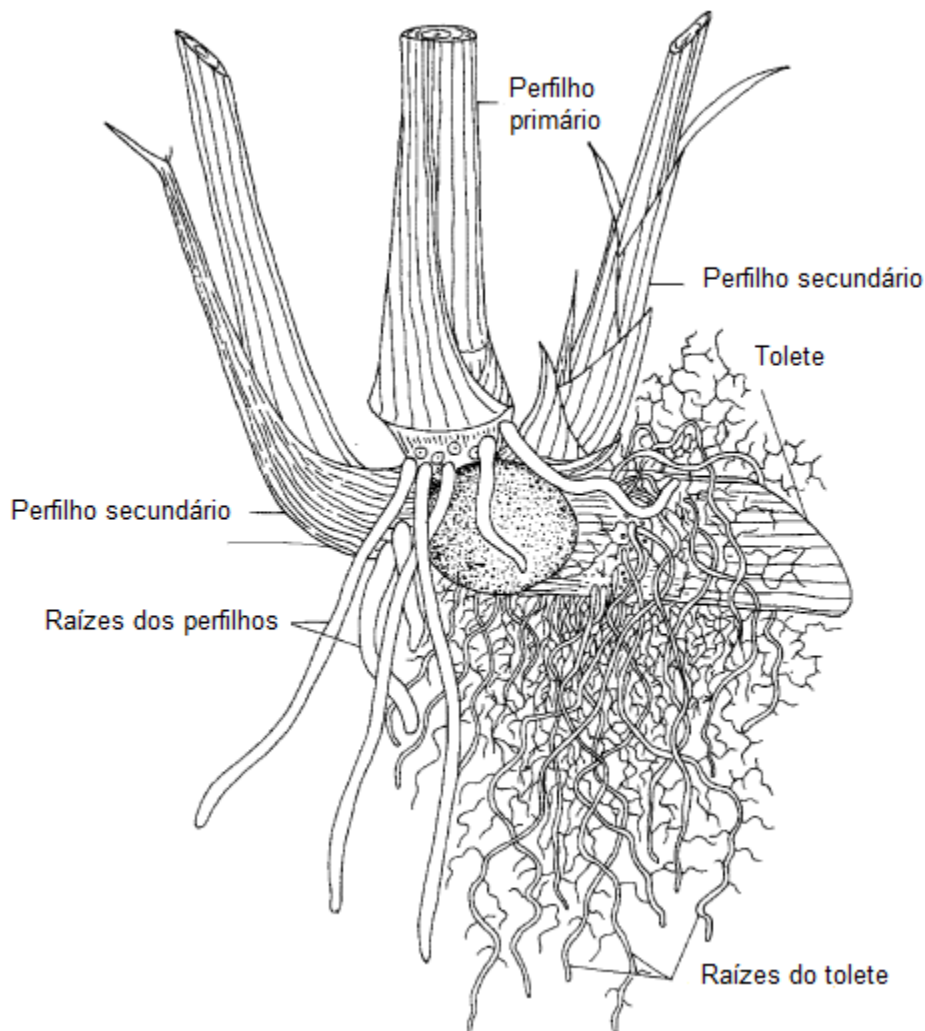
2.2 O SISTEMA RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR E O SEU DESENVOLVIMENTO

O sistema radicular das plantas terrestres possui duas funções principais: aquisição dos recursos provenientes do solo, como a absorção de água e dos íons dissolvidos, e a sua fixação no solo. As outras funções do sistema radicular, como armazenamento, síntese de reguladores de crescimento, propagação e dispersão, podem ser entendidas como secundárias (FITTER, 2002). Em relação as principais funções, qualquer fator que impeça a aquisição de água ou dos nutrientes pelas raízes, poderá afetar a produtividade das culturas (HOLLAND et al., 2018).

As raízes não são apenas um agente passivo que cresce em um ambiente desafiador: as raízes estão envolvidos em várias interações com o solo, alterando os atributos do solo e aumentando o seu componente biótico (CENTENARO et al., 2017). Como exemplos dessas interações, podemos mencionar o desenvolvimento de macroporos, através dos canais radiculares das raízes vivas ou das raízes em decomposição (BEVEN; GERMANN, 1982), o fornecimento de matéria orgânica para a manutenção da fertilidade do solo através da biomassa do sistema radicular, incluindo as raízes mortas e exsudatos associados (SEKIYA et al., 2013). Nesse sentido, segundo levantamento de Cury, De Maria e Bolonhezi (2014) realizado até a profundidade de 1,00 m, a cana-de-açúcar pode contribuir com o fornecimento de 4 toneladas de raízes por hectare. Na literatura também é mencionado por Dexter (1991), que as raízes em conjunto com as hifas fúngicas e os exsudatos das raízes podem induzir a estabilidade dos agregados do solo.

O desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar se inicia com as raízes do tolete, originadas após a operação de plantio à partir da região radicular do tolete (Figura 2.1). Essas raízes são finas, ramificadas e são responsáveis por sustentar o crescimento da planta na primeira semana após a germinação. As raízes do tolete são temporárias e serão substituídas pelas raízes dos perfilhos, as quais assumem o fornecimento de água e nutrientes para os perfilhos (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005).

Figura 2.1 - O sistema radicular inicial da cana-de-açúcar, com as raízes do tolete sendo originadas pelo nó e as raízes dos perfilhos emergindo da base dos perfilhos.

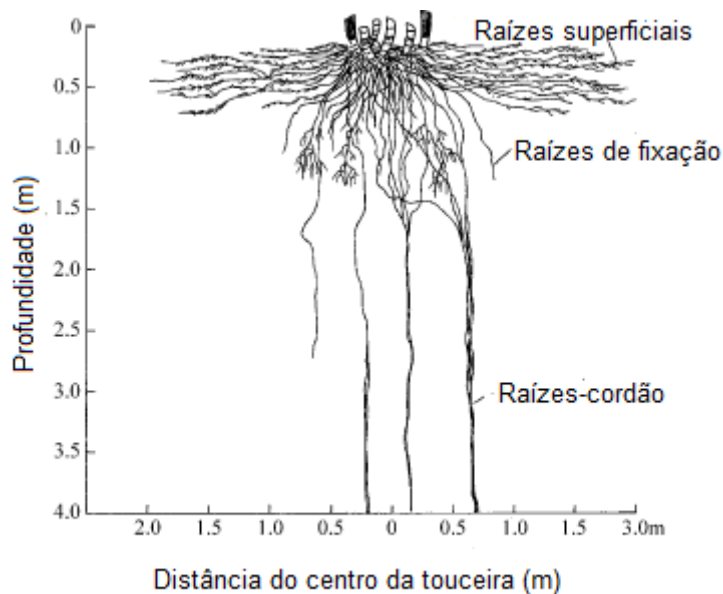


Fonte: (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005)

Segundo Evans (1935), as raízes dos perfilhos podem ser divididas em três classes funcionais: raízes superficiais, raízes de fixação e raízes em cordão (Figura 2.3). As raízes superficiais são aquelas que emergem dos nós, são finas e altamente ramificadas, se estendem lateralmente formando uma densa rede e são responsáveis por absorver água e nutrientes da superfície do solo. As raízes de fixação são aquelas que emergem na base dos perfilhos e crescem em direção ao subsolo, podendo alcançar a profundidade de 1,5 m, sendo responsáveis pela ancoragem da planta. A terceira classe são as raízes-

cordão, formadas por aglomerações de raízes verticais, as quais em alguns casos, alcançam a profundidade de até 6 metros. As raízes de fixação e cordão assumem papel importante no fornecimento de água para a planta durante uma seca, por conseguir acessar as reservas de água no subsolo.

Figura 2.2 – Sistema radicular de uma touceira estabelecida, com os três tipos funcionais de raízes: superficial, fixação e cordão.



Fonte: (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005).

Em relação à distribuição do sistema radicular, de 80 a 90% da biomassa das raízes se concentram nos primeiros 0,60 m e 50% a 65% se concentram nos 0,20 m (AVILAN; GRANADOS; ORTEGA, 1977; BLACKBURN, 1984; OTTO et al., 2009; VASCONCELOS et al., 2003). De um modo geral, a biomassa do sistema radicular da cana-de-açúcar é encontrada próxima da superfície e depois declina de forma exponencial em profundidade (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005).

O crescimento das raízes responde fortemente ao ambiente do solo, criando plasticidade na forma e tamanho do sistema radicular. Portanto, a planta responde ao estresse implicando em alteração das características do sistema radicular consideradas como típicas (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005).

Sobre a profundidade, Inforzato e Alvarez (1957) encontraram

para a variedade Co-290 em solo argiloso, raízes abaixo dos 2,10 m aos seis meses após o plantio e na época de colheita, aos 18 meses, 3,3 m. Laclau e Laclau (2009) constaram para a var. RB72454 cultivada irrigada e em sequeiro, que a irrigação promoveu a alteração da distribuição do sistema radicular até a profundidade de 1 m, no entanto, foi verificado pouco impacto na profundidade alcançada pelas raízes, sendo 4,25 m e 4,70 m para o cultivo irrigado e sequeiro, respectivamente, concluindo que o enraizamento em profundidade é controlado por fatores genéticos.

Nos subsolos altamente compactados, a profundidade do sistema radicular é restrita, impedindo a penetração das raízes nas camadas mais profundas do solo (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005).

A cana-de-açúcar possui raízes de forma sobressalente para o seu máximo crescimento e em condições adversas. Esta capacidade de produzir raízes sobressalentes ajuda a planta contra a perda de raízes ou para superar as condições sub ótimas do ambiente (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005).

O sistema radicular da cana-de-açúcar merece bastante atenção, pois a partir dele que a planta se regenera após a colheita (BALL-COELHO et al., 1992) e as raízes acabam limitando o ciclo da cana-de-açúcar, pois os cultivos sucessivos das soqueiras, o sistema radicular torna-se mais superficial (BACCHI, 1983), levando a planta a ficar mais suscetível a estresses hídricos, pois a umidade retida nas camadas superficiais são a primeira a se esgotarem.

2.3 ESTÁDIOS FENOLÓGICOS DA CANA-DE-AÇÚCAR

Durante o ciclo da cana-de-açúcar, são observados os seguintes estádios fenológicos: brotação, perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação.

A cana-de-açúcar é propagada comercialmente pelo método vegetativo, utilizando seções de colmos imaturos, denominados de tolete (VERMA et al., 2013). Após o plantio da cana-de-açúcar, ocorrendo condições ideais de umidade do solo e temperatura, ocorrem a brotação das gemas

contidas no tolete (CÂMARA, 1993). Esta fase é altamente dependente do teor de água no solo, sendo que o excesso causa condição anaeróbica e a falta irá limitar o desenvolvimento da raiz seminal e absorção de água (INMAN-BAMBER, SMITH, 2005).

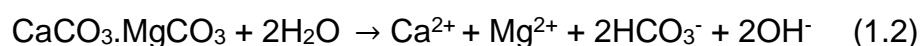
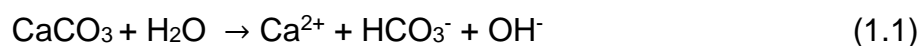
Aos 20 a 30 dias após o plantio, ocorre a emergência do broto, a qual recebe o nome de colmo primário. Com o crescimento do colmo primário, ocorre o desenvolvimento de uma nova brotação, a qual irá receber o nome de colmo secundário, marcando o início do estágio de perfilhamento. Do colmo secundário, também surgem uma nova brotação, denominado de colmo terciário e assim sucessivamente, novos colmos irão surgindo. Quando os colmos mais velhos promovem o sombreamento dos mais novos, causam a mortalidade desses últimos, ocorrendo o término desse estágio. Os colmos que sobreviveram a essa competição irão crescer em altura e diâmetro, iniciando o acúmulo de sacarose nos internódios basais, constituindo o estágio de crescimento de colmos e este crescimento continua até ocorrência de alguma limitação no suprimento de água e ou ocorrência de baixas temperaturas, entrando na fase de maturação, onde o acúmulo de sacarose irá se consolidar e ao seu final, ocorre o corte. De forma resumida, o processo de acúmulo da sacarose, inicia pela sua síntese nas folhas através do processo de fotossíntese, sendo translocada no floema para as células do parênquima do colmo (WANG et al., 2013). No parênquima, a sacarose passa pelos espaços celulares, compartimento metabólico (citossol) e é acumulado no vacúolo (SACHER, 1963).

Para que ocorra a intensificação do acúmulo de sacarose nos internódios dos colmos, é necessário ocorrerem condições ambientais desfavoráveis para ao crescimento e desenvolvimento vegetativo (CÂMARA, 1993). Esse primeiro ciclo da cana-de-açúcar conduzido após o plantio é denominada de cana-planta (CÂMARA, 1993). Após a colheita da cana-planta ocorre a rebrota do canavial, com as gemas subterrâneas sendo liberadas da dominância apical e então emergem, dando início a um novo ciclo, denominado de soqueira, sendo desejado o maior número de cortes possíveis através do cultivo da soqueira (RAMBURAM, 2013).

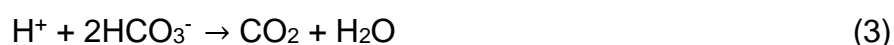
2.4. CORRETIVOS DE ACIDEZ

Os corretivos da acidez do solo mais utilizados no Brasil são as rochas calcárias moídas, chamados simplesmente de “calcários”, classificados de acordo com a concentração de óxido de magnésio (MgO), em calcíticos (menor 5%), magnesianos (5 a 12%) e dolomíticos (acima de 12%) (RAIJ et al., 1996).

A correção do solo se inicia com a dissolução do calcário no solo, produzindo cátions e ânions básicos, de acordo com as reações apresentadas nas equações 1.1 e 1.2, para o calcário calcítico e o dolomítico, respectivamente (PAVAN; OLIVEIRA, 1997):



Após a dissolução do calcário, ocorre a neutralização do íon H^+ da solução do solo pelos ânions básicos (OH^- e HCO_3^-), equações 2 e 3:



A contínua remoção do íon H^+ da solução do solo proporciona aumento do pH, causando a precipitação do Al^{3+} como hidróxido de alumínio $\text{Al}(\text{OH})_3$, equação 4, e substituição na CTC por cátions básicos (Ca^{2+} e/ou Mg^{2+}) (PAVAN; OLIVEIRA, 1997).



A velocidade da reação de solubilização é diretamente proporcional a taxa de remoção dos íons OH^- e HCO_3^- da solução do solo, dessa forma enquanto existir H^+ na solução do solo, esses íons serão consumidos e o

Ca e Mg serão liberados (PAVAN; OLIVEIRA, 1997), dessa forma o calcário, especialmente o calcário dolomítico, pode mitigar a deficiência de Ca e Mg nas culturas (HOLLAND et al. (2018). Devido à baixa solubilidade, o calcário é incorporado com o uso de arado e grade (TIRITAN et al., 2016). Na literatura são relatados que a velocidade de reação do calcário no solo é menor quando o calcário não é incorporado, de forma que o efeito se concentra na superfície, não alcançando o subsolo (PÖTTKER; BEM, 1998; SORATTO, CRUSCIOL, 2008), porém há trabalhos que reportam êxitos com a aplicação superficial de calcário na melhoria da fertilidade e controle da acidez do solo (CAIRES, BANZATTO, FONSECA, 2000; OLIVEIRA; PAVAN, 1996; TIRITAN et al., 2016).

A redução da acidez do subsolo com a aplicação superficial de corretivos depende do transporte de bases dos horizontes superficiais e a reação desses cátions com a acidez nos horizontes subsuperficiais. O transporte depende da quantidade de água e a concentração dos cátions na água lixiviada. A concentração desses cátions depende da concentração dos ânions acompanhantes, como sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-), cloretos (Cl^-) e bicarbonato (HCO_3^-) (LI et al., 2015).

A movimentação do Ca^{2+} no perfil do solo pode ser aumentada com a aplicação de elevadas doses de adubos contendo nitrogênio na forma amoniacal (NH_4^+), ocorrendo a formação de pequenas quantidades de sais de cálcio, que neutralizam o alumínio trocável na subsuperfície do solo, através da movimentação no perfil do solo do Ca^{2+} com a ocorrência da troca de cátions. A reação de nitrificação através da produção de acidez, contribui para a dissolução do calcário que não reagiu na superfície, formando mais Ca^{2+} , que poderá ser lixiviado na forma de sal neutro (REEVE; SUMNER, 1972). Noble e Hurley (2000) analisaram a aplicação de calcário ao longo tempo; em 3 aplicações durante 18 anos com a dose de $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, verificaram a progressão da redução da acidez trocável, acompanhada pelo aumento no subsolo dos níveis Ca^{2+} e Mg^{2+} . O aumento do pH até a profundidade de 1,00 metro é atribuído à formação na superfície do par iônico com NO_3^- , produzindo o nitrato de cálcio, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ e sua lixiviação, onde ocorre mais rápida assimilação do NO_3^- em relação ao Ca^{2+} pelas raízes.

A movimentação do calcário no solo também é possível através dos canais formados pelas raízes mortas e pelos insetos (PAVAN; OLIVEIRA, 1997).

Em relação à legislação, as normas que abordam a especificação dos corretivos de acidez é a Instrução Normativa N.º 35 de 4 de julho de 2006, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, a qual estabelece que os corretivos terão natureza física sólida, apresentando-se em pó, constituído de partículas que deverão passar 100% em peneira de 2 milímetros (ABNT n.º 10), no mínimo 70% em peneira de 0,84 milímetros (ABNT n.º 20) e, no mínimo 50%, em peneira de 0,3 milímetros (ABNT n.º 50) (BRASIL, 2006)

Além dessas características, a norma estabelece os requisitos mínimos de acordo com a natureza do material (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Valores do Poder de Neutralização (PN), soma dos óxidos (%CaO + %MgO) e PRNT.

Material	Poder de neutralização mínimo (%E CaCO ₃)	Soma %CaO + %MgO mínimo	PRNT mínimo
Calcário agrícola	67	38	45
Calcário calcinado agrícola	80	43	54
Cal hidratado agrícola	94	50	90
Cal virgem agrícola	125	68	120
Parâmetros de referência para outros corretivos de acidez	67	38	45

Fonte: BRASIL, 2006.

O poder de neutralização é a capacidade total de bases neutralizantes contidas no corretivo de acidez (carbonatos, hidróxidos, óxidos) expresso em equivalente de carbonato de cálcio puro (% E CaCO₃).

$$PN = CaO\% \times 1,79 + MgO\% \times 2,48 \quad (5)$$

Como a granulometria dos corretivos possui partículas mais grosseiras que não se dissolvem no período de 3 meses, usa-se a expressão que deprecia as partículas menos reativas, sendo o PRNT (RAIJ, 1996), calculado:

$$\text{PRNT} = (\text{PN} \times \text{RE}) / 100 \quad (6)$$

A RE, reatividade das partículas, é calculada segundo os seguintes critérios:

- a) Reatividade zero para a fração retida na peneira ABNT n.º 10;
- b) Reatividade 20% para a fração que passa na peneira ABNT n.º 10 e fica retida na peneira ABNT n.º 20
- c) Reatividade 60% para a fração que passa na peneira ABNT n.º 50 e fica retida na peneira ABNT n.º 50
- d) Reatividade 100% para a fração que passa na peneira ABNT n.º 50.

Dessa forma, pode-se organizar esses critérios na equação abaixo:

$$\text{RE} = 0,2x + 0,6y + z \quad (7)$$

Onde x é a porcentagem do material retido na peneira ABNT n.º 20, y o material retido na peneira ABNT n.º 50 e z, o material que passa na peneira ABNT n.º 50.

2.5 CÁLCULO DA NECESSIDADE DE CALAGEM (NC) E RECOMENDAÇÕES PARA A CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

O método de saturação por bases é o método adotado para determinação da NC dos solos do Estado do Paraná (NEPAR, 2017). O princípio

do método é a correlação positiva entre a porcentagem de saturação por bases (SB) e o pH do solo (CATANI; GALLO, 1955).

A quantidade de calcário a aplicar, para elevar a saturação por bases de um valor atual V_1 , a um valor maior V_2 , é calculada pela seguinte expressão:

$$NC = \frac{CTC (V_2 - V_1)}{PRNT} \quad (8)$$

Na qual NC é a necessidade de calagem, dada em $Mg \text{ ha}^{-1}$ e CTC é a capacidade de troca de cátions do solo, expressa em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, o PRNT, é o Poder Relativo de Neutralização Total, expresso em %.

A escolha dos valores de V_2 a serem atingidos com a calagem depende da cultura. Para a cana-de-açúcar, a recomendação (NEPAR, 2017) é elevar a saturação por bases do solo entre 51-70%. Para os solos com teor de argila inferior a 250 g kg^{-1} ou com baixa CTC ($< 5,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), a necessidade de calcário ($Mg \text{ ha}^{-1}$) pode ser calculada para a profundidade de 0,00-0,20 m, pela fórmula, com teores de cálcio e magnésio expressos em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e o PRNT em decimal:

$$NC = 3 - \frac{(Ca + Mg)}{PRNT} \quad (9)$$

A recomendação estabelece também o monitoramento da acidez do solo das áreas de soqueira a cada dois anos, aplicando calcário quando necessário, antes dos tratamentos culturais. Caso o teor de magnésio trocável seja inferior a $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, deve-se recomendar a aplicação de calcário dolomítico (NEPAR, 2017).

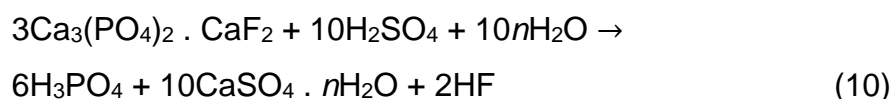
2.6 GESSO AGRÍCOLA

O gesso agrícola ou fosfogesso (sulfato de cálcio) é um sal neutro, solúvel em água, que penetra no subsolo, onde reduz o efeito tóxico que o alumínio causa no desenvolvimento radicular, além de fornecer cálcio em

profundidade. O seu uso para a correção de solos ácidos é uma aplicação inédita mundialmente, pois o gesso é utilizado para a correção de solos sódicos e salinos (RAIJ, 2013).

A descoberta de que o gesso poderia ser utilizado na correção de subsolos ácidos foi observada durante a condução de um experimento desenvolvido no cerrado do Distrito Federal, onde estavam sendo testados o superfosfato simples (SS) e o superfosfato triplo (ST) na cultura do milho durante um veranico. Os tratamentos que receberam superfosfato simples ficaram com as folhas túrgidas; enquanto os tratamentos que receberam ST sentiram o efeito da seca. A partir dessa constatação, verificou-se que nas parcelas onde foram aplicados SS, as camadas mais profundas do solo possuíam menor concentração de alumínio e maior de cálcio, e dessa forma, foi atribuído esse efeito ao gesso contido no SS (RAIJ, 2013).

O principal tipo de gesso disponível no Brasil é o fosfogesso, subproduto da produção de ácido fosfórico. O ácido fosfórico é utilizado para a produção de fertilizantes fosfatados e sua obtenção se dá através da reação da rocha fosfatada com o ácido sulfúrico (RAIJ, 2013). Na equação 10, a rocha fosfatada é representada pela fluorapatita pura ($3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2$):



A forma dos cristais de água dentro do fosfogesso, valor (n), depende do processo de produção de ácido fosfórico, sendo dois para o processo dihidratado, o mais comum entre as fábricas, e $\frac{1}{2}$ para o processo hemidratado, o mais efetivo na produção de ácido fosfórico (LIU; ZHAO; ZHOU, 2016).

Existe um excesso desse material próximo das indústrias onde é produzido, em São Paulo, Minas Gerais e Goiás (RAIJ, 2013), visto que, para a produção de uma tonelada de ácido fosfórico utilizando a tecnologia de alta eficiência, são produzidas cinco toneladas de gesso (LIU; ZHAO; ZHOU, 2016).

Além do fosfogesso, existe o gesso de mineração, a gipsita, cuja exploração se concentra no estado de Pernambuco, na região do Polo Gesseiro

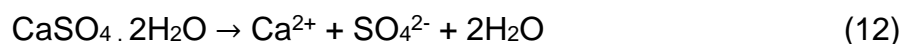
de Araripe, onde são produzidos 2,6 milhões de megagramas (Mg) de gesso por ano, a qual representam 95% da produção do gesso de mineração, porém o seu uso na agricultura é restrito a menos de 1% (SALDANHA et al., 2007), devido a questões logísticas.

O gesso também é obtido, através da dessulfurização de gases das termoelétricas à carvão, quando o carvão é queimado para a geração de energia e o SO₂ produzido durante a queima é removido através do uso de *scrubber* (lavador de gases) para atender as regulamentações ambientais (WANG; YANG, 2018). Nesse sistema, pastas de cal ou calcário reagem com o SO₂ nos *scrubbers* para formar o sulfato de cálcio, que pode ser removido com os outros materiais particulados, de acordo com a reação indicada abaixo (HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2014):

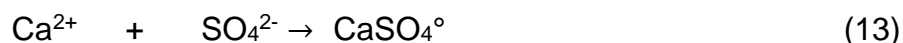


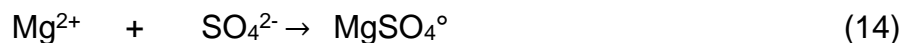
Além de fornecer cálcio, o gesso é uma fonte de enxofre e constitui uma solução de baixo custo para fornecer esse nutriente nos solos que sofrem deficiência (ANIKWE; EZE; IBUDIALO, 2016).

Em relação às propriedades físicas, a solubilidade do gesso em água é de, aproximadamente, 2,5 g L⁻¹ (CHEN; KOST; DICK, 2008, ZOCA; PENN, 2007), enquanto do calcário é de 0,015 g L⁻¹ (BENNETT et al., 2014), sendo dessa forma o gesso 167 vezes mais solúvel que o calcário (2,5 g L⁻¹ / 0,015 g L⁻¹). A sua dissociação é representada por:



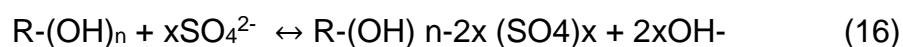
Na solução do solo, o íon SO₄²⁻ pode permanecer como ânion livre ou se associar com os metais (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) formando complexo solúveis, móveis no perfil do solo, contribuindo para o aumento de cátions básicos na subsuperfície (PAVAN; VOLKWEISS, 1986), representados nas equações 13, 14 e 15:





Dessa forma o sulfato é lixiviado, não permanecendo na camada superficial, tendendo a se acumular no subsolo, principalmente nos solos mais argilosos (VITTI et al., 2008).

A adsorção dos sulfatos aos óxidos e argilas retarda o movimento dos cátions (equação 16).



Além da movimentação dos cátions básicos no solo, o gesso promove a redução do nível de toxicidade do alumínio pela indução da polimerização de Al^{3+} com os grupos OH, que foram trocados pelo SO_4^{2-} das superfícies dos óxidos (equação 17) e a formação da associação iônica AlSO_4^+ (equação 18), a qual não é absorvida pelas raízes (PAVAN; VOLKWEISS, 1986):



A aplicação de gesso no solo pode também provocar lixiviação de magnésio e potássio para horizontes inferiores, fora do alcance das raízes, causando impactos negativos na produtividade (PAVAN; VOLKWEISS, 1986).

Outro ponto que merece atenção com a aplicação de gesso, é que em alguns solos, as reações de troca podem provocar o aparecimento ou acentuar a toxicidade de manganês, pelo menos de uma forma temporária após a aplicação (PAVAN; VOLKWEISS, 1986).

Em relação à legislação, a Instrução Normativa N.º 35 considera o gesso como corretivo de sodicidade e condicionador de solo, não considerando as funções do gesso em solos ácidos (RAIJ, 2013). Em relação à natureza física, a norma estabelece que o gesso deve ter a natureza física sólida, apresentando-se em pó, e o produto deve passar 100% em peneira de dois milímetros (ABNT

n.º 10), no mínimo 70% em peneira de 0,84 mm (ABNT n.º 20) e no mínimo 50% em peneira de 0,3 milímetros (ABNT n.º 50). Em relação à parte química, o artigo 5º estabelece que as garantias mínimas exigidas são de 16% de Ca, 22% CaO e 13% de S (BRASIL, 2006).

Sobre os fatores que restringem o maior uso do gesso na agricultura, segundo o levantamento realizado por Rajj (2013) são: (1) o custo de transporte, onerando a aplicação nos locais que estão distantes das fontes produtoras; (2) falta de informações sobre as respostas das culturas frente à aplicação do gesso, que permitam análise econômica e (3) teor de água contido no fosfogesso, onerando o seu transporte e dificultando a sua aplicação. Para exemplificar o primeiro fator, a planta de produção de ácido fosfórico mais próxima do norte do Paraná é em Cajati-SP (FOSBRASIL). A cotação da tonelada do gesso em dezembro de 2015 era de R\$ 60,50 t⁻¹ e o frete para entrega em Bandeirantes-PR, de R\$ 83,00 t⁻¹.

2.7 CRITÉRIOS PARA DIAGNOSE E CÁLCULO DA DOSE DE GESSO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Os critérios para diagnose da aplicação de gesso para o Estado do Paraná são quando na camada de 0,20-0,40 m a saturação por bases (V%) for inferior a 35% ou a saturação por alumínio (m%) for superior a 20% e/ou o nível de cálcio for inferior a 0,5 cmol_c dm⁻³ (NEPAR, 2017). As doses recomendadas são baseadas no teor de argila (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 Recomendações das doses de gesso para o Estado do Paraná, em função do teor de argila.

Teor de argila (g kg ⁻¹)	Doses de gesso à aplicar (kg ha ⁻¹)
≤ 200	700
200 a 400	1200
400 a 600	2200
≥ 600	3200

Fonte: NEPAR, 2017

2.8. EFEITOS DA APLICAÇÃO DE CALCÁRIO E GESSO NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar apresenta uma certa tolerância à toxidez do alumínio, porém, deve-se levar em consideração que a cultura permanece longo período em produção, recebendo seis cortes ou mais, e dessa forma, pode ocorrer redução das bases (RAIJ, 2013), sendo necessário restituí-las, visto que, de acordo com Tasso Junior et al. (2007), a extração de nutrientes em cinco variedades precoces, em cana-planta variaram de 0,14 a 0,30 kg t⁻¹ para Ca²⁺ e de 0,17 a 0,27 kg t⁻¹ para Mg²⁺.

Gavioli et al. (1992), avaliando os efeitos da aplicação de calcário e gesso após o 1º corte da variedade IAC52-150 em um Latossolo Vermelho distroférico, com teor de Ca²⁺ de 1,76 cmol_c dm⁻³, Mg²⁺ de 0,54 cmol_c dm⁻³, saturação por bases de 29% e pH(CaCl₂) de 4,3 (camada 0,00 a 0,25 m), não obtiveram efeitos significativos entre os tratamentos para a produtividade de colmos e nas qualidades tecnológicas no 2º, 3º e 4º corte. Os autores atribuem a falta de resposta da cultura devido aos teores de Ca+Mg no solo, de 2,3 cmol_c dm⁻³, estarem em níveis suficientes à cultura.

Medina et al. (2000) não observaram diferença na produtividade de colmos com aplicação das doses de calcário e gesso na terceira soqueira do cultivar IAC 58-480, em um Nitossolo distrófico, possivelmente, devido à elevada fertilidade química do solo da área experimental. Os teores de Ca²⁺, Mg²⁺, saturação por bases e pH(CaCl₂) eram 2,9 cmol_c dm⁻³, 1,6 cmol_c dm⁻³, 61% e 5,3, respectivamente.

Diferentemente ao encontrado por esses autores, Morelli et al. (1992), avaliando o efeito da aplicação incorporada de calcário e gesso em plantio da variedade SP70-1143, em um Latossolo Vermelho álico de textura arenosa, verificaram que, ao longo de quatro cortes, a melhor combinação foi 4 Mg ha⁻¹ de calcário com 2 Mg ha⁻¹ de gesso, promovendo acréscimo na produtividade de 18 Mg ha⁻¹. Na camada de 0,00-0,25 m, os teores de Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, saturação por bases e pH(H₂O) eram de respectivamente, 0,59 cmol_c dm⁻³; 0,34 cmol_c dm⁻³; 0,14 cmol_c dm⁻³, 15% e 4,9 e na camada 0,25-0,50 m esses teores eram de 0,65 cmol_c dm⁻³; 0,12 cmol_c dm⁻³; 0,05 cmol_c dm⁻³; 9% e 4,9.

Lorenzetti et al. (1992) verificaram que a associação de calcário

e gesso possibilitou o incremento médio de 9% sobre a produtividade de colmos da soqueiras de 2º, 3º e 5º cortes da variedade NA 56-79, quando comparada somente com a aplicação de calcário. Com a aplicação de calcário, o fornecimento de Ca e Mg ficou restrito nas camadas superficiais, enquanto somente a aplicação de gesso possibilitou o aumento das bases em profundidade, apesar de ter removido parcialmente o Mg.

Noble e Hurley (2000) acompanhando por 18 anos o efeito de calagens efetuadas durante a reforma do canavial, a qual dentro desse período, foram realizadas três aplicações, com cada aplicação constando a dose de 5,0 Mg ha⁻¹, verificaram a progressão da redução da acidez trocável acompanhada pelo aumento no subsolo de Ca²⁺ e Mg²⁺. O aumento do pH até a profundidade de 1,00 metro é atribuído à formação na superfície do par iônico com NO₃⁻ e sua lixiviação, em que ocorre uma mais rápida assimilação do NO₃⁻ em relação ao Ca²⁺ pelas raízes. As repetidas aplicações de calcário resultaram ao longo do período de avaliação, no aumento de 65 Mg ha⁻¹ de matéria seca em comparação à testemunha. Essa resposta na produção de matéria seca ocorreu possivelmente devido à severa deficiência de Ca²⁺ que esse tratamento estava predisposto, visto que após 17 anos de contínua produção, o teor desse elemento era de 0,07 cmol_c kg⁻¹ e de acordo com Kingston (2014), o limite crítico desse elemento na Austrália é de 0,55 cmol_c dm⁻³.

Devido à tolerância que a cana-de-açúcar possui aos efeitos da acidez do solo, as respostas à calagem e à gessagem são obtidas em solos com baixos teores de cálcio e magnésio. Especificamente, as respostas do aumento de produtividade com a aplicação de gesso, provavelmente podem ser creditadas ao efeito do fornecimento de enxofre, especialmente nos canaviais que adotavam a colheita semi-mecanizada, com corte manual e despalha a fogo. Nesses canaviais, o enxofre contido nas folhas e ponteiros era perdido por volatilização. Segundo Vitti et al. (1992), esse macronutriente secundário é exigido em maior quantidade do que o P, um macronutriente primário. De acordo com Spironello et al. (1996) o teor de enxofre presente nos colmos industrializáveis é 0,3 kg t⁻¹, enquanto para o fósforo é de 0,2 kg t⁻¹ (SPIRONELLO et al., 1996). Com a mudança do sistema de colheita para o sistema mecanizado, sem queima, a perda desse elemento por volatilização não

mais ocorre e com a decomposição da palhada acumulada sob o solo, ocorre a liberação lenta e gradual do enxofre para a cultura, possivelmente contribuindo para a não ocorrência da deficiência desse elemento.

2.9 EFEITOS DA APLICAÇÃO DE CALCÁRIO E GESSO NOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

Radcliffe, Clark e Sumner (1986) observaram no sudoeste do Estados Unidos em um *Ultisol* (argissolo) com barreira química e física para o desenvolvimento radicular no subsolo, que após 3 anos da aplicação de 10 Mg ha⁻¹ em experimentos com alfafa, pêssego e pousio, houve redução do índice do cone (calculado através da razão entre a resistência do solo à penetração pela área da base do cone) nas parcelas aplicadas com alfafa e pêssego. No tratamento onde o solo ficou em pousio e recebeu gesso não foi verificada essa redução. Os autores atribuem esse efeito à ação do gesso no aumento da atividade radicular no subsolo, que, por sua vez, reduz a resistência à penetração no subsolo.

Chan; Conyers; Scott (2007) relataram que a aplicação de calcário em um solo ácido adensado proporcionou a redução da densidade do solo após 4 anos de aplicação, devido ao efeito combinado da redução da dispersão das argilas e o aumento do carbono lábil.

A redução da densidade do solo com o uso do calcário também foi observada por Hati et al. (2008) em *Alfisol* (Luviosolos) na Índia, em experimento de longa duração (29 safras). O calcário foi aplicado e incorporado à 10 cm com a enxada rotativa. Ainda esses autores relatam que calagem promoveu o aumento da capacidade de retenção de água, explicado pelo efeito da melhoria na estrutura do solo e aumento da porosidade.

A aplicação combinada de 5000 kg ha⁻¹ de calcário e 2500 kg ha⁻¹ gesso reduziram a densidade do solo em 17% em um *Ultisol* degradado na Nigéria (ANIKWE; EZE; IBUDIALO, 2016) aos 90 dias após a aplicação. Os autores atribuem esse efeito à floculação das partículas causadas pelo gesso e calcário, criando porosidade nas camadas do solo.

Diferentemente do que o encontrado pelos autores acima, Barbieri et al. (2015) observaram que a aplicação de calcário em plantio direto

não alterou a densidade e a resistência à penetração em um *Mollisol* (Chernossolos) na Argentina, porém foi alterada a estabilidade da estrutura do solo com a calagem. As aplicações de calcário ocorreram em 2006, 2007, 2009 para elevar a saturação de bases à 80% da CTC e em 2010, foram realizadas as avaliações. A melhoria da estabilidade da estrutura do solo é atribuída ao cálcio sendo agente cimentante entre as frações minerais e orgânicas.

Stenberg, Stenberg e Rydberg, (2000) verificaram efeito pequeno do calcário na melhoria da estrutura do solo, após 4 anos de aplicação, em um experimento testando duas modalidades de preparos primários (arado de aiveca e cultivador) em conjunto com a aplicação de calcário. As parcelas que receberam calcário, apresentaram menor resistência à penetração, em comparação àquelas que foram submetidas somente ao preparo de solo com arado de aiveca.

Os efeitos da aplicação de cálcio nas alterações da resistência a penetração, densidade e porosidade do solo podem ser verificados à longo prazo, visto que em seis trabalhos analisados, apenas um apresentou algum desses efeitos dentro de um ano de aplicação.

2.10 COMPACTAÇÃO DOS SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR E AS VARIÁVEIS INDICATIVAS DE SUA OCORRÊNCIA

Os solos dedicados à cana-de-açúcar são, geralmente, compactados durante o processo de colheita (PÉREZ; MILLÁN; GONZÁLEZ-POSADA, 2010), onde cada linha de cana-de-açúcar é colhida por vez, com o conjunto trator transbordo acompanhando o deslocamento da colhedora, coletando a cana cortada e levando para o carregamento fora do campo. O tráfego em cada colheita é intenso, sendo que cada entrelinha de cana-de-açúcar é trafegada no mínimo 4 vezes, sendo 2 vezes pela colhedora e 2 vezes pelo conjunto trator transbordo. As colhedoras possuem massa de até 20 Mg, e os conjuntos trator transbordo carregados pode alcançar até 30 Mg e nem sempre o tráfego é realizado nas condições ideais de umidade, existindo um grande potencial para a compactação do solo (BRAUNACK; ARVIDSSON; HÅKANSSON, 2006).

Os efeitos da compactação são a redução da infiltração e da

drenagem da camada compactada, ocasionando problemas com a disponibilidade de água e ar para as plantas e os microrganismos (KULLI; GYSI; FLÜHLER, 2003). A compactação afeta diretamente a cultura, reduzindo o crescimento radicular (HARTEMINK, 1998). A redução do tamanho do sistema radicular causa declínio na condutância estomática e a transpiração declina, protegendo a planta contra a perda excessiva de água; porém, ocasionando uma redução na assimilação de carbono (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005). Com a redução da transpiração, ocorre também a redução da absorção de nutrientes. A redução da assimilação de carbono reduz a fotossíntese e em conjunto com a redução da absorção de nutrientes implicam na redução da produtividade agrícola e o acúmulo em sacarose. Além disso, são relatados por Humbert (1959), que a compactação causa redução dos entrenos e redução da população de perfilhos.

Hartemink (1998) relata as implicações dos efeitos da compactação nas entrelinhas em canaviais da Nova Guiné devido ao tráfego durante a colheita e de outras operações de campo, com redução da infiltração e ausência das raízes. As ausências das raízes foram verificadas nas densidades de $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$ para o *Fluviols* e $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ para os *Vertissolos* (HARTEMINK, 1998). Os teores de argila na profundidade de 0,00-0,15 m foram para o *Fluviols* e *Vertissolos*, respectivamente de 300 g kg^{-1} e 550 g kg^{-1} . Nas linhas de cana-de-açúcar, não foram constatadas diferenças na densidade e na infiltração entre a linha em comparação com as áreas de vegetação nativa.

Nas condições brasileiras, Otto et al. (2011) verificaram, para Latossolo Vermelho distrófico com teor de argila na camada arável de aproximadamente 300 g kg^{-1} , que a restrição das raízes estava na densidade de $1,78 \text{ Mg m}^{-3}$.

Por meio da comparação dos resultados da aplicação do método do Perfil Cultural com a densidade do solo e a porosidade total, Neves et al. (2003) verificaram em um grande conjunto de amostras de Latossolo Vermelho distroférico com teor médio de argila de 700 g kg^{-1} , que os solos estão compactados e entrando em processo de compactação quando apresentam valores de densidade de $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ e $1,33 \text{ m}^{-3}$, respectivamente. Em relação à

porosidade total, os solos estão compactados e entrando em processo de compactação com valores de $0,49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,52 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente.

Outro indicativo importante sobre a porosidade foi determinado por Xu, Nieber e Gupta, (1992), os quais verificaram que na porosidade de 10%, a difusão de gases foi próxima do zero. Para a manutenção da vida aeróbica no solo, há necessidade de constante troca do ar do solo com a atmosfera, de modo que o oxigênio consumido necessita ser repostado e o CO_2 produzido, ventilado (HILLEL, 1998). Com a difusão próxima do zero, ocorrem prejuízos na manutenção da vida aeróbica na rizosfera.

3. ARTIGO A: APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO E GESSO NA QUARTA SOQUEIRA VISANDO A RECUPERAÇÃO DA RIZOSFERA, PRODUTIVIDADE E LONGEVIDADE DO CANAVIAL

3.1. RESUMO

O cultivo da soqueira possui importante aspecto na produção da cana-de-açúcar devido ao seu custo ser inferior ao do plantio, sendo assim é desejável a produção de soqueira no maior número de vezes possível. O objetivo deste trabalho foi determinar os efeitos da correção da acidez do solo, da produtividade de colmos e sacarose com a aplicação de doses calcário e gesso em soqueira, em Latossolo Vermelho distroférico, visando a recuperação da rizosfera, produtividade e aumento da longevidade do canavial. Para isso, foi instalado um experimento em Andirá-PR, com a variedade RB855453 na quarta soqueira, em blocos ao acaso, com as doses C0G0, 0 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (C) e 0 Mg ha⁻¹ de gesso (G), C0G2, C0G4, C0G8, C3G0, C6G0 e C3G4. Após 12 meses do corte da safra anterior, o experimento foi colhido e a produtividade de colmos, sacarose e análises da qualidade tecnológica foram determinados em cada parcela. Além disso, foram abertas trincheiras em cada parcela para a coleta de solo e para a avaliação do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. As amostras para análises químicas foram coletadas nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80, 0,80-1,00 m, sendo analisados: pH em CaCl₂, carbono orgânico (CO), acidez potencial (H+Al), fósforo disponível (P), alumínio trocável (Al³⁺), cálcio trocável (Ca²⁺), magnésio trocável (Mg²⁺), potássio trocável (K⁺), enxofre (S-SO₄²⁻), soma de bases (SB), saturação por base (V) e saturação por alumínio (m). Amostras indeformadas, foram coletadas para a determinação da densidade do solo, macro, microporosidade e a porosidade total, nas profundidades 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m. Os resultados obtidos indicaram que o gesso não foi efetivo em reduzir a saturação de alumínio como o calcário na superfície. Em relação às doses de gesso (C0G2, C0G4, C0G8) na profundidade 0,00-0,05 m, todas reagiram da mesma maneira, evidenciados pela saturação Ca²⁺ e Al e atribuídos à reduzida porosidade do solo, a qual limitou a infiltração da água com os íons. A associação calcário e gesso promoveu maior saturação de cálcio nas profundidades 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m e uma melhor distribuição do magnésio no perfil do solo. As doses não propiciaram o maior enraizamento, o aumento da população de perfilhos e produtividade de colmos e sacarose, não conseguindo postergar a reforma do canavial, que teve produtividade média de 61,5 Mg ha⁻¹. A aplicação de calcário e gesso proporcionaram aumento nos teores de S-SO₄²⁻ no solo. Em relação à qualidade tecnológica, foi verificada associação entre o S-SO₄²⁻ e a redução na concentração de açúcares, tanto na forma de sacarose, como na forma de açúcares redutores totais, dessa forma, a aplicação isolada de gesso em soqueiras em solo com níveis baixos de K⁺ e médios de Mg²⁺ deve ser evitada.

Palavras-chave: *Saccharum spp.* Raízes. Calcário. Gesso agrícola. Produtividade de colmos e sacarose.

3.2 ABSTRACT

SURFACE APPLICATION OF LIME AND GYPSUM IN THE FOURTH RATOON AIMING THE RECOVERY THE RHIZOSPHERE, YIELD AND LONGEVITY OF THE SUGARCANE FIELD

The ratoon crop has an important aspect of sugarcane production due to the low production costs compared to plant crop, therefore it is desirable the production of ratoon in the great number of time as possible. The study aimed to determine of effects of correction of soil acidity, stalk and sucrose yield with the application of lime and gypsum in sugarcane ratoon, in Oxisol, aiming at the recovery at the rhizosphere, yield, and increase of longevity of sugarcane field. To do so, an experiment was installed in Andirá-PR, with variety RB855453 in fourth ratoon, in randomized block design, with the dose C0G0, 0 Mg ha⁻¹ of lime (C) and 0 Mg ha⁻¹ of gypsum (G), C0G2, C0G4, C0G8, C3G0, C6G0 and C3G4. After 12 months of cutting the previous harvest, the experiment was harvested and yield of stalks, sucrose and analyzes of technological quality were determined in each plot. Furthermore, trenches were opened in each treatment for soil collection and for the evaluation of the root development of sugarcane. Samples for chemical analyzes were collected at depths 0.00-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, 0.40-0.60, 0.60-0.80, 0.80-1.00 m, and it was analyzed: pH in CaCl₂, organic carbon (CO), potential acidity (H+Al), available phosphorus (P), exchangeable aluminum (Al³⁺), exchangeable calcium (Ca²⁺), exchangeable magnesium (Mg²⁺), exchangeable potassium (K⁺), Sulphur (S-SO₄²⁻), sum of the bases (SB), base saturation (V) and aluminum saturation (m). Underformed samples were collected for soil density, macro, microporosity and total porosity determination at depths 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, 0.40-0.60, 0.60-0.80 e 0.80-1.00 m. The obtained results indicated that gypsum was not effective in reducing the aluminum saturation as lime on the surface. In relation to the gypsum doses (C0G2, C0G4, C0G8) in the depth 0.00-0.05 m, all of them reacted the same way, demonstrated by Ca²⁺ and Al saturation and attributed to the reduced porosity of the soil, which limited the infiltration of water with the ions. The lime and gypsum association promoted higher calcium saturation at depths of 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m and a better distribution of magnesium in the soil profile. The doses tested did not lead to greater rooting, increase of tiller population and yield of stalks and sucrose, not being able to postpone the replanting of cane fields, which had an average yield of 61.5 Mg ha⁻¹. The application of lime and gypsum provided an increase in the levels of S-SO₄²⁻ in the soil. Regarding technological quality, it was verified the association between S-SO₄²⁻ and the reduction in the concentration of sugars, both in the form of sucrose, as in the form of total reducing sugars, therefore the isolates application of gypsum in sugarcane ratoon in soil both low levels of K⁺ and medium Mg²⁺ should be avoided.

Key words: *Saccharum spp.* Roots. Lime. Agricultural gypsum. Stalk and sucrose yield.

3.3 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) é propagada comercialmente pelo método vegetativo, com o uso de seções do colmo (VERMA, et al., 2013), sendo denominado esse primeiro cultivo de cana-planta. Após a colheita da cana-planta, ocorre a rebrota do canavial, com a liberação da brotação das gemas subterrâneas, controladas pela dominância apical, para produzir uma outra safra, a qual é denominada de soqueira (RAMBURAN et al., 2013). O cultivo da soqueira possui um importante aspecto na produção da cana-de-açúcar, devido o seu custo ser inferior ao do plantio, pois há economia com o preparo de solo, mudas e as operações de plantio (SHUKLA et al., 2009). Dessa forma o cultivo da soqueira é desejado no maior número de vezes possível (RAMBURAN et al., 2013).

Ao longo dos cultivos da soqueira, ocorre o declínio da produtividade (RAMBURAN et al., 2013) e a decisão de replantar o canavial é geralmente baseada quando se atinge a produtividade crítica (BALL-COELHO et al., 1992). A intensidade desse declínio é função das características genéticas de cada variedade, além do nível da fertilidade do solo e de outros fatores de produção que necessitam ser mantidos (ROSSETTO et al., 2014). Nos canaviais colhidos mecanicamente, a queda de produtividade é mais pronunciada, devido aos danos físicos causados nas touceiras e os efeitos na compactação no solo (RAMBURAN et al., 2013). Além dessas alterações edáficas causarem um enfraquecimento do sistema radicular, de acordo com Bacchi (1983), as raízes da soqueira torna-se mais superficial à cada corte, demonstrando a importância da rizosfera na produtividade do canavial.

A remoção das bases do solo são acompanhadas pelo aumento da acidez do solo, e dessa forma, o calcário é o principal insumo para a correção da acidez através dos ânions básicos OH^- e HCO_3^- e o fornecimento de Ca^{2+} e Mg^{2+} . A contínua remoção dos íons H^+ do solo causa uma precipitação do alumínio da solução do solo formando hidróxidos insolúveis (PAVAN; OLIVEIRA, 1997). A aplicação superficial do calcário tem um limitado efeito na acidez subsuperficial devido à baixa solubilidade e mobilidade do calcário em chegar na subsuperfície (SHAINBERG et al., 1989).

A correção da acidez subsuperficial através da aplicação superficial de corretivos depende do transporte dos cátions básicos da superfície e a reações desses cátions com a acidez subsuperficial. O transporte depende da quantidade de água e a concentração de cátions na água. A concentração desses cátions depende das concentrações dos ânions que acompanham, tais como o sulfato (SO_4^{2-}), nitrato (NO_3^-), cloretos (Cl^-) e o bicarbonato (HCO_3^-) (LI et al., 2015).

O gesso é utilizado para a correção da saturação por alumínio no subsolo, sendo mais solúvel que o calcário, possibilitando o movimento do Ca^{2+} com o SO_4^{2-} em grande quantidade e em maior velocidade, quando comparado ao calcário (SHAINBERG et al., 1989), porém o aumento do teor de Ca^{2+} trocável nos solos com a aplicação do gesso causa severa perda do Mg^{2+} trocável (REEVE; SUMNER, 1972). Esse problema é contornado com a aplicação associada de calcário dolomítico com gesso.

O aumento da quantidade aplicada de gesso permite o aumento dos teores de cálcio em maior profundidade. Esse aumento do Ca^{2+} em maior profundidade, associado com a diminuição da saturação de alumínio, pode promover o aprofundamento do sistema radicular, possibilitando a recuperação da produtividade e a vida útil do canavial. Nossa hipótese de estudo vislumbra que a aplicação de calcário e gesso propiciaria o desenvolvimento e o aprofundamento do sistema radicular da soqueira, proporcionando um aumento de produtividade de colmos e sacarose e conseqüentemente, aumento na longevidade do canavial.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi determinar os efeitos da correção da acidez do solo, da produtividade de colmos e açúcar com a aplicação de doses calcário e gesso em uma soqueira de cana-de-açúcar, em Latossolo Vermelho distroférico.

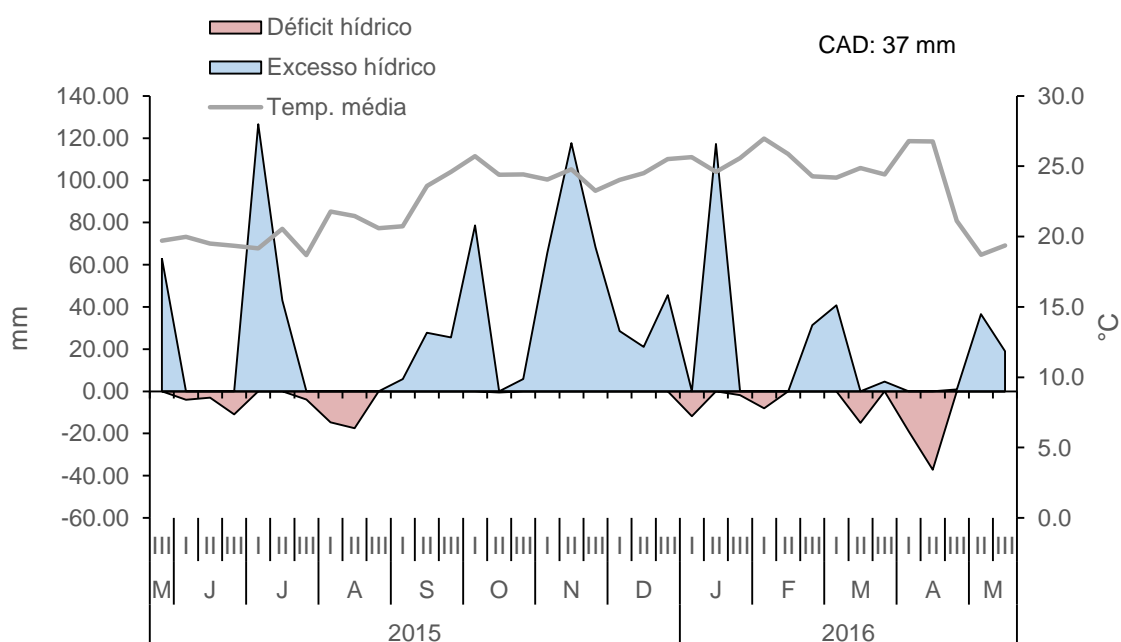
3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento, instalado em setembro de 2015, foi conduzido em área de cultivo comercial, no município de Andirá - PR, latitude $23^{\circ}03'02''\text{S}$, longitude $50^{\circ}13'44''\text{W}$ e altitude 470 m.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical (CAVIGLIONE et al., 2000). O balanço hídrico (Figura 3.1) foi confeccionado utilizando os dados obtidos em estação meteorológica do IAPAR localizada, aproximadamente, a 6 km do experimento e utilizando a metodologia de Thornthwaite; Mather, (1955). Para a determinação da capacidade de água disponível (CAD), foram coletadas amostras indeformadas nas profundidades de 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m com 4 repetições, a qual a média obtida das três profundidades foi de 37 mm.

A temperatura média do ar (Figura 3.1) durante o período do experimento foi acima da temperatura mínima de 15 °C requerida para o crescimento da cana-de-açúcar (EBRAHIM et al., 1998). Em relação à disponibilidade hídrica, houve déficit hídrico na fase de brotação, no mês de junho de 2015 e retornando no último decênio de julho e continuando no primeiro e segundo decêndios de agosto, reduzindo a velocidade de estabelecimento da soqueira. Em 2016, os déficits hídricos ocorridos no primeiro e terceiro decêndio de janeiro e no primeiro decêndio de fevereiro não causaram grandes impactos na condução do experimento e os ocorridos nos meses de março e abril foram benéficos para a cana-de-açúcar entrar em repouso vegetativo, favorecendo o acúmulo de sacarose.

Figura 3.1 Balanço hídrico durante o período do experimento (2015-2016).



O experimento foi instalado em Latossolo Vermelho distroférrico (Tabela 3.1), o qual representa aproximadamente 10% dos solos do Estado do Paraná (BHERING; SANTOS, 2008), em um delineamento experimental de blocos ao acaso, com sete tratamentos e quatro repetições. Os teores de argila nas camadas de 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, foram respectivamente de 664, 670 e 728 g kg⁻¹. Cada parcela foi constituída de oito linhas de uma soqueira de quinto corte de cana-de-açúcar em fase de rebrota, variedade RB855453, plantada no espaçamento de 1,5 m e com 10 metros de comprimento. A parcela útil considerada foi composta de quatro fileira centrais, com 8 metros de comprimento, e área de 48 m².

Tabela 3.1 Atributos químicos determinados antes da implantação do experimento.

Prof. (m)	P (mg dm ⁻³)	C.O. (g dm ⁻³)	pH CaCl ₂	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Mg ²⁺	K ⁺	SB	T	V %
0,00 – 0,20	2,6	16,1	3,9	2,4	8,57	1,00	0,60	0,10	1,70	10,27	16,6
0,20 – 0,40	1,4	13,4	4,1	1,3	6,09	1,70	0,70	0,03	2,43	8,52	28,5
0,40 – 0,60	0,9	10,7	4,2	0,8	5,82	1,40	0,60	0,02	2,02	7,84	25,7

A produtividade média da safra anterior a implantação do experimento, colhida mecanicamente, foi de 77 Mg ha⁻¹ e a quantidade de palhada remanescente foi determinada utilizando um quadro de 0,25 m², disposto aleatoriamente na área experimental, realizando 6 repetições. A palhada coletada foi levada à estufa de ventilação forçada à temperatura de 65 °C até peso constante e pesada. A média de palhada na área foi de 7,3 Mg ha⁻¹ de matéria seca.

Os tratamentos foram constituídos de sete doses: C0G0 (0 Mg ha⁻¹ de calcário e 0 Mg ha⁻¹ de gesso), C0G2, C0G4, C0G8, as quais constituem 0, 1/2, 1, 2NG, em que NG é a necessidade de gesso recomendada por Spironello et al. (1996), calculada como seis vezes o teor de argila, em g kg⁻¹ na profundidade entre 0,20-0,40 m; C3G0, C6G0, sendo as doses de 1 e 2NC, em que NC é a necessidade de calcário recomendado para elevar a saturação de bases à 60% para a profundidade entre 0,20-0,40 m (SPIRONELLO et al., 1996) e, por fim, a dose recomendada de calcário e gesso, C3G4.

O calcário dolomítico utilizado possuía PRNT de 85% e a composição do gesso agrícola é de 20,40% de CaO, 15,48% de S e 25,42% de umidade. As aplicações foram realizadas de forma manual em setembro de 2015, a lanço, após a brotação da touceira.

Nas parcelas, após a aplicação de calcário e gesso, a cada 60 dias, foram determinados o número de colmos, a altura de colmos (medida da superfície do solo até a folha +1); e o diâmetro médio de colmos, em 2 metros lineares por parcela, na área útil da parcela.

Em relação aos tratamentos culturais, foram realizadas a aplicação de 500 kg ha⁻¹ da fórmula NPK 20-05-20, com o cultivador quebra lombo com adubadeiras em 11/06/2015. Para o controle das formigas foram realizadas duas aplicações de Regent 800 WG (fipronil), sendo a primeira em 20/07/2015, com dose de 0,90 kg ha⁻¹, e a segunda, em 23/07/2015, com dose de 0,50 kg ha⁻¹. Para o controle de plantas daninhas, foi utilizado o herbicida Confidence (diuron + hexazinona) em aplicação costal, com dose de 2,5 kg ha⁻¹, aplicados em 25/09/2015.

Após 12 meses do corte da safra anterior e 8 meses da aplicação dos insumos, o experimento foi colhido e foram abertas uma trincheira em cada parcela, perpendicular à linha de plantio, para a coleta de solo e para a avaliação do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. O método utilizado para a avaliação do sistema radicular foi o método da trincheira (BÖHM, 1979). As trincheiras possuíam distância de 0,05 m da touceira e as dimensões foram de 1,0 de profundidade por 1,5 m de largura, a partir do centro da touceira. As raízes foram expostas com a utilização de um rolo escarificador e uma tela com malha de 0,02 x 0,02 m foi fixada na parede do perfil, onde foram quantificadas e calculada a porcentagem de raízes por profundidade. Determinou-se também a profundidade efetiva das raízes, a qual é a profundidade onde se encontra os 80% das raízes avaliadas.

A produtividade de colmos foi determinada nas quatro linhas centrais (parcela útil), utilizando balança dinamométrica, após os colmos serem manualmente cortados na base do solo com e removidos os ponteiros e as folhas. Nas parcelas centrais, foram retirados 10 colmos para as análises da qualidade tecnológica: Brix, Fibra, Pol da cana (PCC%), Açúcares redutores (AR)

e Açúcares Redutores Totais (ART) de acordo com a metodologia proposta pela Consecana-PR e descritos por Canziani; Guimarães (2012). Multiplicando-se a produtividade de colmos pela Pol da cana, obteve-se a produtividade de sacarose em cada parcela.

As amostras para análises químicas do solo foram coletadas nas entrelinhas e nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80, 0,80-1,00 m. Todas as amostras foram secas ao ar livre, peneiradas em malha de 2 mm e estocada para posterior análise.

O pH foi determinado em suspensão do solo (solo:solução 1:2,5) utilizando solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ após 15 minutos de agitação (PAVAN et al., 1992); Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} trocável foram extraídos pelo KCl $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ (solo:extrator 1:10) após 15 minutos de agitação. O Al^{3+} trocável foi determinado através de titulação com a solução de NaOH $0,010 \text{ mol L}^{-1}$ usando o azul de bromotimol. Para o Ca^{2+} e Mg^{2+} , foram retirados 0,1 ml do extrato, adicionado 4,9 mL de lantânio 0,1% e determinados por espectrofotômetro de absorção atômico (PAVAN et al., 1992). P e o K^+ trocável foram extraídos por Mehlich-1 (solo: extrator 1:10) sendo o K medido pelo fotômetro de chama e o P foi determinado pelo espectrofotômetro a 630 nm (PAVAN et al., 1992). O carbono orgânico foi determinado pelo método de Walkey-Back (PAVAN et al., 1992). A acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}^{3+}$) foi estimada pelo balanço pH do solo com solução SMP ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2$, trietanolamina, p-nitrofenol), tamponada a pH 7,5 (PAVAN et al., 1992). O S- SO_4^{2-} foi extraído pela solução de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$ com teor de P de 500 mg L^{-1} dissolvido em ácido acético 2 mol L^{-1} , (solo: solução 1:2,5) e quantificado o S por medição, em espectrofotômetro a 420 nm, da turbidez formada pela precipitação de sulfato de cálcio pelo cloreto de bário (EMBRAPA, 2009). Com os resultados das bases trocáveis e da acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$), foram calculadas a soma de bases (SB) e saturação por base (V) (EMBRAPA, 2009). Com a SB e Al^{3+} foi calculada a saturação por alumínio (m) (EMBRAPA, 2009).

A densidade do solo, macro, microporosidade e a porosidade total foram determinadas utilizando anéis de 50,00 mm de diâmetro e 50,00 mm de altura, de acordo com Embrapa (2011). As amostras indeformadas (2 subamostras por profundidade) foram coletadas nas entrelinhas e nas

profundidades 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m.

Os dados mensurados foram testados quanto à sua normalidade (Shapiro Wilk) e homogeneidade das variâncias (Hartley) e submetidos à análise de variância. Os dados que não atenderam a normalidade e a homogeneidade, foram transformados. No caso de significância no Teste F, as médias foram comparadas ao teste Tukey a 5% de probabilidade.

A correlação linear (Pearson, $p < 0,05$) entre o teor de S-SO₄²⁻ e pol da cana (PCC) e açúcar redutor total (ART) foram determinadas.

Para avaliar o impacto econômico da aplicação dos insumos, os custos de aplicação das doses recomendadas de calcário (C3G0), gesso (C0G4) e a associação calcário e gesso (C3G4) foram levantados e convertidos em quantidade de massa de colmos por área (Mg ha⁻¹).

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Atributos Químicos e Físicos do Solo

A aplicação das doses de calcário e gesso apresentaram efeito significativo na saturação por cálcio nas profundidades 0,00-0,05 e 0,10-0,20 m (Tabela 3.2) com aumento da concentração em comparação com a testemunha.

O gesso não foi tão efetivo como o calcário em diminuir os teores de alumínio na superfície (Tabela 3.2), como também constatado por Reeve; Sumner (1972), a qual incubaram um Oxisol com as doses de calcário e gesso dentro de tubos de plástico por 10 semanas, à 30 °C, com umidade na capacidade de campo e submetido à ciclos de umedecimento e lixiviação. De acordo com esses autores, a redução do teor de alumínio pela troca de cátions ou pelo mecanismo de auto-calagem (a qual consiste na liberação de OH⁻ pelo SO₄²⁻, pela troca de ligantes polimerizando o Al), pelo gesso não foram altamente eficientes.

Tabela 3.2 Atributos químicos do solo, saturação por cálcio, Ca^{2+} (%), saturação por magnésio, Mg^{2+} (%), saturação por potássio, K^+ (%) e saturação por alumínio m (%) para diferentes profundidades em relação as doses de calcário e gesso aplicadas (C0G0, C0G2, C0G4, C0G8, C3G0, C6G0 e C3G4).

Prof. (m)	Doses						
	C0G0	C0G2	C0G4	C0G8	C3G0	C6G0	C3G4
Ca^{2+} (%)							
0,00 – 0,05	8,33 b ⁽¹⁾	19,86 ab	17,30 ab	20,99 ab	36,37a	34,37 ab	33,25 ab
0,05 – 0,10	9,55 ns ⁽²⁾	14,07	14,80	17,47	25,93	30,02	26,66
0,10 – 0,20	7,78 b	19,16 a	16,60 ab	17,51 ab	18,30 ab	17,62 ab	18,87 a
0,20 – 0,40	12,24 ns	20,39	24,81	19,78	26,22	23,14	17,66
0,40 – 0,60	22,42 ns	26,69	26,00	24,15	27,51	24,79	25,52
0,60 – 0,80	15,94 ns	24,82	20,75	19,73	24,45	25,61	23,87
0,80 – 1,00	14,56 ns	20,96	18,71	19,10	19,11	17,06	25,45
Mg^{2+} (%)							
0,00 – 0,05	3,57 ab ⁽³⁾	4,01 ab	2,41 b	4,48 ab	13,18 a	12,68 a	11,12 a
0,05 – 0,10	2,21 ns	3,13	2,23	4,74	8,70	7,19	7,88
0,10 – 0,20	2,22 ns	4,05	3,71	5,85	4,56	4,80	4,38
0,20 – 0,40	3,82 ns	4,84	4,56	6,53	7,77	6,12	5,17
0,40 – 0,60	5,29 ns	5,20	4,55	5,97	5,46	7,82	6,84
0,60 – 0,80	3,95 ab	3,73 ab	3,25 b	5,50 ab	3,98 ab	5,62 ab	7,94 a
0,80 – 1,00	3,75 ab	3,45 ab	2,80 b	5,00 ab	3,04 ab	5,05 ab	7,92 a
K^+ (%)							
0,00 – 0,05	1,92 ns	2,38	1,76	2,87	3,60	2,85	3,36
0,05 – 0,10	1,04 ns	1,00	1,06	1,27	2,78	1,51	1,88
0,10 – 0,20	0,95 ab	0,63 b	0,63 b	0,99 ab	1,99 a	0,99 ab	1,18 ab
0,20 – 0,40	0,75 ns	0,48	0,77	0,75	0,94	0,77	1,02
0,40 – 0,60	0,63 ns	0,34	0,53	0,38	0,67	0,60	0,70
0,60 – 0,80	0,57 ns	0,26	0,32	0,31	0,48	0,34	0,52
0,80 – 1,00	0,41 ns	0,25	0,31	0,25	2,10	0,27	0,37
m (%)							
0,00 – 0,05	58,60 a	34,79 ab	42,85 ab	29,17 ab	11,34 b	10,62 b	16,55 b
0,05 – 0,10	63,72 ns	48,49	49,31	37,83	22,23	27,70	30,16
0,10 – 0,20	67,06 a	40,06 ab	38,34 ab	38,08 ab	37,77 b	38,68 ab	34,56 b
0,20 – 0,40	53,21 ns	37,66	30,24	35,92	24,29	28,51	33,99
0,40 – 0,60	34,56 ns	27,88	29,21	32,10	26,97	27,33	23,35
0,60 – 0,80	47,62 ns	33,28	36,80	37,81	34,47	29,58	24,52
0,80 – 1,00	49,56 ns	39,20	45,84	39,51	40,55	40,95	22,82

⁽¹⁾Presença de letras diferentes na horizontal indicam diferença entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. ⁽²⁾Dados transformados: $\log x$. ⁽³⁾Dados transformados: $\sqrt{x} + 0,01$.

O tratamento com a dose recomendada de calcário (C3G0), propiciou maior saturação de Ca^{2+} e Mg^{2+} na profundidade entre 0,00-0,05 m. A redução da saturação de alumínio (m) e o aumento da saturação de cálcio e magnésio é devido a reação dos ânions bicarbonato (HCO_3^-) e hidroxilas OH^- liberados pela dissociação do calcário com a acidez presente na superfície do solo, não havendo ânions acompanhantes para o transporte de Ca^{2+} e Mg^{2+} , sendo adsorvidos no complexo de troca.

Em relação às doses de gesso (C0G2, C0G4, C0G8) na profundidade entre 0,00-0,05 m, todas reagiram de maneira semelhante, evidenciadas pela ausência de diferença estatística para as variáveis saturações por Ca^{2+} e alumínio. Esse resultado pode ser atribuído à reduzida porosidade do solo (Tabela 3.4), a qual limitou a infiltração e a distribuição da solução do solo uma vez que a precipitação ocorrida entre o período da aplicação e da amostragem foi de 1560 mm. Segundo Zoca e Penn (2017), a solubilidade teórica do gesso é de $2,5 \text{ g L}^{-1}$, portanto a precipitação ocorrida permitiu a dissolução de todas as doses de gesso aplicadas, porém esperava-se aumento da saturação por Ca^{2+} com o aumento das doses de gesso. A associação do calcário com gesso (C3G4) apresentou maior saturação de cálcio na profundidade de 0,10-0,20 m, devido à presença de duas fontes de Ca^{2+} com mobilidades distintas. O calcário promove a correção da acidez e a liberação do Ca^{2+} enquanto o gesso movimentava-se dentro do perfil do solo na forma de CaSO_4^0 , ocorrendo posteriormente a sua dissociação em Ca^{2+} e SO_4^{2-} . Esse tratamento aumentou também a distribuição do magnésio no perfil do solo, sendo esse efeito observado também por Morelli et al. (1992). A aplicação conjunta com calcário compensa a perda de Mg^{2+} pelo gesso (REEVE; SUMNER, 1972), ocorrida com a dose C0G4.

Foi verificado que a aplicação de gesso promoveu a perda de Mg^{2+} e K^+ como reportado por Oliveira e Pavan (1996) e Syed-Omar e Sumner, (1991). As doses de gesso C0G2 e C0G4 causaram redução da saturação de K^+ na profundidade 0,10-0,20 m e a dose C0G4 promoveu a redução da saturação de Mg^{2+} nas camadas 0,00-0,05; 0,60-0,80 e 0,80 a 1,00 m. A redução da saturação de K^+ e Mg^{2+} ocorre pelo fato desses cátions serem retidos com baixa energia, sendo substituídos no complexo de troca pelo cálcio que foi carregado

pelos íons sulfato.

A calagem também disponibilizou enxofre, apresentando, na camada de 0,00-0,05 m, os mesmos teores das doses de gesso C0G2, C0G4 e C0G8 (Tabela 3.3). Na próxima camada, 0,05-0,10 m, as doses de calcário apresentaram teores intermediários entre as três doses de gesso e a testemunha. De acordo com Bolan et al. (2003), a maior disponibilidade de enxofre ocorre pelo aumento de pH proporcionado pela calagem, ocorrendo a mineralização do SO_4^{2-} contido na matéria orgânica e pela liberação do SO_4^{2-} dos sulfatos de ferro e alumínio. A matéria orgânica é responsável pelo armazenamento do enxofre no solo, sendo que de acordo com Kertesz e Mirleau, (2004) mais de 95% desse elemento está ligada a compostos orgânicos, não diretamente disponíveis as plantas. O enxofre é o terceiro maior nutriente extraído pela cana-de-açúcar, tanto para os colmos como para as folhas (TASSO JUNIOR et al., 2007), sendo que a quantidade extraída pelas folhas retorna ao solo através da palhada deixada no campo, de forma que a matéria orgânica possui uma proporção considerável desse elemento, a qual é disponibilizada pela mineralização do SO_4^{2-} .

Tabela 3.3 Doses de calcário e gesso (C0G0, C0G2, C0G4, C0G8, C3G0 e C6G0 e C3G4) e teores de S- SO_4^{2-} nas camadas avaliadas.

Doses	S- SO_4^{2-} (mg dm ⁻³)						
	0,00-0,05	0,05-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60	0,60-0,80	0,80-1,00
C0G0	1,54 b ⁽¹⁾	0,66 b ⁽²⁾	0,69 c ⁽²⁾	0,47 b	0,99	2,10 b	1,43
C0G2	3,73 ab	9,64 a	8,12 ab	7,69 ab	6,69	5,89 ab	5,12
C0G4	10,72 ab	9,36 a	13,33 a	12,72 ab	10,50	9,70 a	6,63
C0G8	6,65 ab	11,43 a	9,53 a	6,12 ab	3,52	4,44 ab	5,25
C3G0	2,70 ab	1,28 ab	1,28 bc	4,37 ab	7,74	6,59 ab	3,66
C6G0	1,76 ab	4,11 ab	4,74 abc	4,14 ab	3,48	1,69 b	1,42
C3G4	13,72 a	9,94 ab	11,73 a	17,28 a	7,91	3,56b	4,37

⁽¹⁾Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. ⁽²⁾Dados transformados: $\sqrt{x} + 0,01$.

Com a aplicação associada de calcário e gesso (C3G4), a perda do Mg^{2+} causada pelo gesso foi contornada através do fornecimento desse elemento pelo calcário dolomítico, mesmo com essa dose apresentando maior teor de sulfato (camada 0,00-0,05 m) devido ao efeito aditivo entre o calcário e

o gesso em disponibilizar o sulfato nessa camada (Tabela 3.3).

Em relação às propriedades físicas do solo (Tabela 3.4), foram observadas em algumas profundidades a redução da eficiência na reação das doses de calcário e gesso. Na profundidade 0,00-0,10 m, detectou-se, na entrelinha, valores de densidade de $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$ e porosidade total de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, enquanto para a profundidade entre 0,20-0,40 m, os valores encontrados de densidade e porosidade total foram de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$, $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente. Segundo Neves et al. (2003), trabalhando em um Latossolo Vermelho distroférico com teor de argila entre 65 a 79%, valor de densidade igual $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ e porosidade total de $0,52 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ são indicativos de solo em processo de compactação, enquanto valor de densidade de $1,42 \text{ Mg m}^{-3}$ e porosidade total $0,49 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, são indicativos de solo compactado. Confrontando essa afirmação com os resultados encontrados, verifica-se que o solo deste trabalho está, para a profundidade entre 0,00-0,10 m, em processo de compactação e, para a profundidade entre 0,20-0,40 m, compactado.

A macroporosidade média determinada na profundidade entre 0,00-0,10 m e entre 0,20-0,40 m foram respectivamente, 0,11 e $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Tabela 3.4), o que nessas condições dificultou a infiltração e o transporte da solução do solo, de forma a não permitir que as reações dos insumos aplicados ocorresse uniformemente entre as repetições, sobretudo a partir da profundidade de 0,20 m, onde não foi possível verificar diferença significativa para a saturação por Ca^{2+} entre as doses aplicadas (Tabela 3.2), visto que o ânion sulfato contido no gesso é relativamente móvel, sendo normalmente esperado o transporte do Ca^{2+} para o subsolo, ocorrendo um aumento desse cátion como constado por Crusciol et al. (2014). Com a compactação do solo, a fração dos poros mais afetada são os macroporos e os mesoporos, as quais são vitalmente importantes para a ventilação e o transporte da água (KIM et al., 2010), a qual transporta também os químicos (fertilizantes e defensivos). De acordo com Heitman et al. (2007), a compactação causa problema na distribuição de químicos para as plantas, pelo transporte não uniforme no perfil do solo, em que a água é relativamente estagnada e os químicos se movem apenas por difusão. Além disso, a compactação pode limitar a proliferação de raízes.

Tabela 3.4 Propriedades físicas do solo (densidade, macroporosidade, microporosidade, porosidade total e umidade do solo) para diferentes profundidades em relação as doses de calcário e gesso aplicadas (C0G0, C0G2, C0G4, C0G8, C3G0, C6G0 e C3G4).

Doses	0,00 – 0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,40-0,60	0,60-0,80	0,80-1,00
Densidade (Mg m ⁻³)						
C0G0	1,29 ns	1,33 ns	1,46 ns	1,35 ns	1,25 ns	1,28 ns
C0G2	1,32	1,41	1,42	1,35	1,31	1,25
C0G4	1,34	1,38	1,47	1,36	1,28	1,24
C0G8	1,33	1,35	1,48	1,40	1,31	1,27
C3G0	1,33	1,37	1,45	1,33	1,29	1,25
C6G0	1,36	1,35	1,47	1,34	1,33	1,27
C3G4	1,31	1,32	1,43	1,39	1,37	1,32
Média	1,32	1,36	1,45	1,36	1,30	1,27
C.V. (%)	7,11	6,59	4,97	4,87	4,26	4,78
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)						
C0G0	0,12 ns	0,11 ns	0,05 ns	0,06 ns	0,07 ns	0,07 ns
C0G2	0,11	0,08	0,05	0,07	0,08	0,09
C0G4	0,09	0,08	0,04	0,04	0,08	0,07
C0G8	0,11	0,12	0,06	0,07	0,09	0,08
C3G0	0,12	0,09	0,06	0,08	0,07	0,08
C6G0	0,10	0,07	0,05	0,06	0,05	0,07
C3G4	0,11	0,11	0,06	0,04	0,05	0,08
Média	0,11	0,09	0,05	0,06	0,07	0,07
C.V. (%)	38,56	43,25	43,03	43,16	40,54	33,86
Microporosidade (m ³ m ⁻³)						
C0G0	0,40 ns	0,40 ns	0,43 ⁽¹⁾ ns	0,43 ns	0,46 ns	0,43 ns
C0G2	0,39	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43
C0G4	0,40	0,40	0,43	0,43	0,41	0,40
C0G8	0,40	0,40	0,45	0,44	0,43	0,43
C3G0	0,39	0,40	0,43	0,43	0,43	0,43
C6G0	0,39	0,42	0,43	0,43	0,43	0,42
C3G4	0,40	0,41	0,42	0,43	0,44	0,43
Média	0,40	0,40	0,43	0,43	0,43	0,42
C.V. (%)	6,37	5,03	4,22	3,27	6,00	3,15
Porosidade Total (m ³ m ⁻³)						
C0G0	0,52 ns	0,52 ns	0,48 ns	0,49 ns	0,53 ⁽¹⁾ ns	0,50 ns
C0G2	0,50	0,49	0,47	0,49	0,51	0,52
C0G4	0,49	0,48	0,47	0,47	0,48	0,48
C0G8	0,51	0,51	0,51	0,50	0,51	0,52
C3G0	0,51	0,49	0,48	0,50	0,50	0,50
C6G0	0,49	0,49	0,47	0,49	0,48	0,50
C3G4	0,52	0,51	0,48	0,47	0,48	0,50
Média	0,50	0,50	0,48	0,48	0,50	0,50
C.V. (%)	4,85	5,61	5,52	4,89	5,61	4,09
Umidade (kg kg ⁻¹)						
C0G0	0,25 ns	0,28 ⁽¹⁾ ns	0,27 ns	0,27 ⁽¹⁾ ns	0,28 ns	0,29 ns
C0G2	0,24	0,26	0,27	0,29	0,28	0,29
C0G4	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,28
C0G8	0,27	0,26	0,27	0,29	0,29	0,33
C3G0	0,26	0,25	0,26	0,29	0,30	0,29
C6G0	0,24	0,26	0,27	0,29	0,29	0,29
C3G4	0,27	0,27	0,28	0,30	0,29	0,29
Média	0,26	0,26	0,27	0,29	0,29	0,30
C.V. (%)	14,50	10,23	6,88	5,33	6,66	8,15

ns = diferença não significativa, na coluna, pelo teste Tukey a 5 % de probabilidade. ⁽¹⁾Dados transformados: x¹.

Dessa forma a compactação pode exercer grande influência na reação dos insumos aplicados (calcário e gesso) e no desenvolvimento radicular da soqueira.

A compactação na superfície e na subsuperfície do solo pode ser atribuída ao tráfego de máquinas durante a colheita e outras operações de campo ao longo dos anos. Durante o processo de colheita, cada linha de cana-de-açúcar é colhida por vez, com o conjunto trator transbordo acompanhando o deslocamento da colhedora, coletando a cana cortada para o transporte fora do campo. Assim, o tráfego em cada colheita é intenso, pois cada entrelinha de cana-de-açúcar é trafegada no mínimo quatro vezes, sendo duas vezes pela colhedora e duas vezes pelo conjunto trator transbordo. As colhedoras possuem massa de até 20 Mg e os conjuntos trator transbordo carregado têm até 30 Mg e nem sempre o tráfego é realizado nas condições ideais de umidade, existindo um grande potencial para a compactação do solo (BRAUNACK; ARVIDSSON; HÅKANSSON, 2006). A compactação na subsuperfície também é agravada pela profundidade de trabalho dos implementos utilizados no preparo do solo, no caso a grade pesada, e no cultivo da soqueira com o cultivador, com profundidades de trabalho de, aproximadamente 0,25 m.

O tráfego de máquinas e a pressão dos implementos utilizados refletiram também na profundidade entre 0,40-0,60 m, onde a densidade ($1,36 \text{ Mg m}^{-3}$) e a porosidade total ($0,48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) indicam “em processo de compactação” (NEVES et al., 2003), e está em acordo com Tavares Filho et al. (2001), as quais afirmam que o fenômeno da compactação não está confinado à superfície, podendo ser observado em muitos casos a 0,50 m de profundidade.

A perda de funcionalidade da subsuperfície implica de forma direta na redução da produtividade, com uma redução do desenvolvimento radicular e a permeabilidade do solo e indireta, com aumento da erosão do solo por problemas de drenagem (CHAMEN et al., 2003). Possivelmente devido à má drenagem, uma quantidade considerável dos insumos aplicados pode ter sido perdida por escoamento superficial.

Em relação à umidade do solo (Tabela 3.4), dentro do período avaliado, não foi possível observar diferença significativa entre as doses em todas as profundidades. De acordo com o trabalho de Ritchey et al., (1980), o

gesso contido no superfostato proporcionou redução na saturação de alumínio, proporcionando maior aprofundamento do sistema radicular e uma maior absorção de água no subsolo. No entanto, esse fato não ocorreu no presente trabalho pois se verifica-se, através da umidade do solo, que há evidências da baixa atuação do gesso devido à compactação do solo.

3.5.2 Sistema Radicular

As doses de calcário e gesso não influenciaram o percentual de raízes de cana-de-açúcar nas profundidades avaliadas (Tabela 3.5). A menor saturação de alumínio obtida com as doses C3G0 e C3G4 na superfície do solo também não afetou a distribuição de raízes. A maior concentração de Mg^{2+} nas profundidades de 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m fornecidas pela dose C3G4 igualmente não afetaram o percentual de raízes nessas camadas do solo.

Tabela 3.5 Percentual de raízes nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40, 0,40-0,50, 0,50-0,60, 0,60-0,70, 0,70-0,80, 0,80-0,90, 0,90-1,00 m e profundidade efetiva das raízes (PE) de cana-de-açúcar submetida a diferentes doses de calcário (C) e gesso (G).

Prof. (m)	Doses							C.V. (%)
	C0G0	C0G2	C0G4	C0G8	C3G0	C6G0	C3G4	
	% de raízes							
0,00 – 0,10	17,27 ns	17,75	25,34	18,27	18,24	19,26	14,22	36,81
0,10 – 0,20	11,92 ns	12,76	13,94	11,30	14,44	12,88	9,54	31,61
0,20 – 0,30	8,33 ns	10,61	7,06	7,76	9,08	10,30	7,35	31,47
0,30 – 0,40	10,53 ns	11,44	7,78	9,34	8,85	9,87	7,85	36,45
0,40 – 0,50	11,18 ns	10,94	9,47	10,13	10,48	10,40	10,64	23,53
0,50 – 0,60	9,48 ns	10,05	11,38	10,99	11,01	10,58	11,32	27,09
0,60 – 0,70	9,64 ns	8,05	8,53	10,63	8,72	9,52	9,86	24,48
0,70 – 0,80	8,32 ns	6,97	6,55	8,50	7,33	6,48	10,68	26,34
0,80 – 0,90	7,51 ns	5,74	5,14	8,39	7,43	5,67	8,39	49,78
0,90 – 1,00	5,82 ns	5,69	4,81	4,69	4,42	5,04	10,15	51,67
P. E. (m)	0,72 ns	0,67	0,65	0,71	0,67	0,67	0,77	10,58

ns = diferença não significativa, na linha, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Na subsuperfície, como não houve o aumento da saturação de cálcio e redução da saturação de alumínio com as doses de gesso (C2G0, C4G0 e C8G0) e a associada com o calcário (C3G4) devido aos problemas de compactação, conforme já relatado, não ocorreu o efeito desejado do aprofundamento do sistema radicular. O maior aprofundamento do sistema radicular com a redução do teor de alumínio é relatado por Clemente et al. (2017) a qual constaram o aumento do número de raízes de 12% para 23% na profundidade de 0,40-0,60 m com a aplicação de 5 Mg ha⁻¹ de gesso no fundo do sulco de plantio das variedades RB011941, RB92579 e RB991536 em um Neossolo Flúvico. Nessa profundidade o teor de alumínio e a saturação de bases da testemunha foram respectivamente, de 0,60 cmol_c dm⁻³ e 27%.

Constatou-se que as raízes se concentraram em torno do eixo central da planta (evidenciados pelas cores verde, amarelo e laranja na Figura 3.3), como constado por Otto et al., (2011). A dose C3G0 proporcionou maior desenvolvimento radicular na linha e entre-linha (Figura 3.2 a), provavelmente pelo aumento da saturação por K⁺ na profundidade de 0,10-0,20 m (Tabela 3.2). Isso é suportado pela comparação com a dose C3G4, a qual possui a mesma saturação de alumínio e porosidade (Tabelas 3.2 e 3.4, respectivamente), diferenciando apenas na maior saturação por K⁺ (Tabela 3.2).

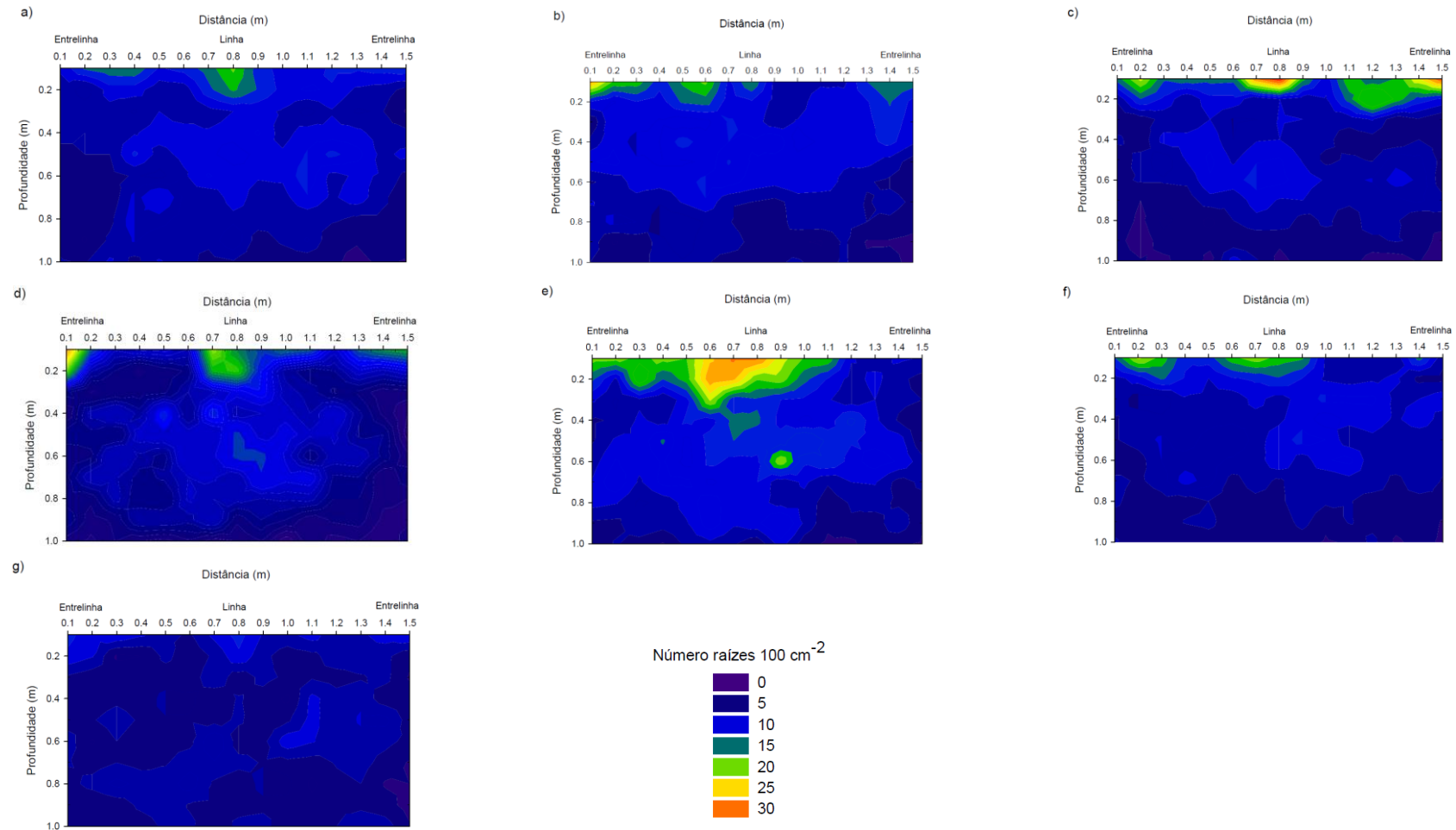
Em relação ao efeito da compactação do solo sobre o desenvolvimento das raízes, observa-se redução do enraizamento em profundidade (em tons de azul na Figura 3.2), à partir da profundidade 0,10-0,20 m, indo até 0,30-0,40 m (Figura 3.2 e Tabela 3.5), provavelmente causada pelas operações de preparo de solo. Também é observada redução do número de raízes nas entrelinhas, ocasionada pela distância da soqueira e em virtude do tráfego de máquinas ocorrer nessa superfície. A densidade do solo nas entrelinhas nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m foram respectivamente, 1,36 Mg m⁻³ e 1,45 Mg m⁻³ (Tabela 3.4). O efeito da compactação no desenvolvimento no sistema radicular da cana-de-açúcar também foram relatados por Hartemink (1998), que observou ausência de raízes de cana nas entrelinhas nas densidades de 1,2 Mg m⁻³ a 1,3 Mg m⁻³ para a Vertissolos e *Fluviosols* na Nova Guiné.

A macroporosidade determinada nas camadas de 0,00-0,10 m e 0,20-0,40 m, foram $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente (Tabela 3.4), trazendo implicações no desenvolvimento das raízes, como restrição à troca de gases. De acordo com Xu, Nieber e Gupta (1992) quando a porosidade está próxima a 10%, a troca de gases é nula. Boone et al. (1987) demonstraram que em solos com reduzida difusão de oxigênio, a restrição ao crescimento das plantas dependeu da distribuição pluviométrica, ou seja das condições de umidade do solo. Ainda, esses autores verificaram que a planta contorna essa redução no teor de oxigênio promovendo o enraizamento na superfície. Essas informações, permitem supor que, com o maior enraizamento superficial a planta fica vulnerável ao déficit hídrico, pois a umidade retida na superfície é a primeira a ser esgotada.

Verificou-se que mesmo com densidade igual a $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ na camada de 0,20-0,40 m (Tabela 3.4), algumas raízes conseguiam transpor a barreira dessa camada “compactada”, crescendo nas fissuras existentes entre os agregados, causados pelos ciclos de umedecimento e secamento, voltando a ramificar, porém em menor número.

A profundidade efetiva das raízes (PE) não foi alterada com a compactação do solo (Tabela 3.5) e os valores encontrados nas diferentes doses apresentam-se próximos da distribuição típica de 0,60 m relatados por Avilan; Granados; Ortega (1977); Blackburn (1984); Otto et al. (2009); Vasconcelos et al. (2003).

Figura 3.2. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar (número de raízes 100 cm^{-2}) nas doses C0G0 (a), C0G2 (b), C0G4 (c), C0G8 (d), C3G0 (e), C6G0 (f) e C3G4 (g). A posição da planta está no centro de cada gráfico, indicado na “linha”.



3.5.3 Biometria, Produtividade e Qualidade Tecnológica

As doses de calcário e gesso não apresentaram efeito significativo na população de perfilhos, altura de plantas e diâmetro de colmos (Figura 3.3). A média da população de perfilhos avaliada na época de colheita (240 dias após a aplicação), foi de 8,34 perfilhos m^{-2} , valor dentro da faixa de 8 a 10 perfilhos m^{-2} , considerada crítica por Bell; Garside (2005) para assegurar uma produtividade adequada.

Como reflexo da ausência do efeito das doses de calcário e gesso nos índices biométricos, não foi possível observar diferenças na produtividade de colmos (Tabela 3.6). A ausência dos efeitos das doses sobre os índices biométricos e a produtividade de colmos podem ser atribuídos à ausência de estiagem no período de crescimento (Figura 3.1) e pela cana-de-açúcar apresentar certa tolerância à acidez (RAIJ, 2013). Para Clemente et al. (2017) a ocorrência de altas precipitações diminuem o efeito benéfico do gesso, pois a aplicação de doses gesso em cana-planta nas variedades RB011941, RB92579 e RB 991536 não afetaram a produtividade de colmos e sacarose, mesmo com a ocorrência de uma melhor distribuição radicular ao longo do perfil do solo. Rossetto et al. (2004), em seis experimentos com calagem em diversas regiões produtoras do Estado de São Paulo, verificaram que em apenas dois experimentos apresentaram efeito significativo com a calagem, com acréscimos de produtividade de cana-de-açúcar de 8 a 13 $Mg\ ha^{-1}$, o que confirma a adaptação das cultivares plantadas em solos ácidos e de baixa fertilidade.

A alta concentração de alumínio e a baixa concentração de cálcio no subsolo são os responsáveis por limitar a produtividade das culturas em solos ácidos (Adams, 1984) mas, em relação ao alumínio, a cana-de-açúcar apresenta “certa tolerância”. Os mecanismos de tolerância da cana-de-açúcar ao alumínio são atribuídos a genes que codificam enzimas que combatem o stress oxidativo ou a infestação por patógenos, proteínas responsáveis pela exudação de ácidos orgânicos e pela transdução de sinais (DRUMMOND et al., 2001).

Tabela 3.6 Produtividade de colmos (TCH), Brix, Fibra, Pol da cana (PCC), Açúcares Redutores (AR), Açúcares Redutores Totais (ART) e Produtividade de Sacarose (TSH).

Doses	TCH (Mg ha ⁻¹)	Qualidade Tecnológica					TSH (Mg ha ⁻¹)
		Brix (%)	Fibra	PCC	AR	ART	
C0G0	62,18 ns	21,58 ns	12,51 ns	16,17 a ⁽¹⁾	0,48 ns	17,51 a	10,06 ns
C0G2	55,11	20,93	12,69	15,66 ab	0,48	16,96 ab	8,61
C0G4	66,82	19,75	13,28	14,61 b	0,48	15,86 b	9,55
C0G8	59,78	20,18	13,07	15,20 ab	0,44	16,44 ab	9,04
C3G0	66,88	20,75	12,14	15,65 ab	0,49	16,96 ab	10,45
C6G0	59,80	20,85	13,22	15,69 ab	0,44	16,96 ab	9,39
C3G4	60,24	20,18	12,49	15,09 ab	0,49	16,38 ab	9,17
Média	61,54	20,60	12,77	15,44	0,47	16,72	9,46
CV(%)	13,38	4,05	5,60	3,56	7,18	3,48	14,38

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. ns = diferença não significativa.

As doses de calcário e gesso não propiciaram o aumento da população de perfilhos e produtividade de colmos, não conseguindo postergar a reforma do canavial, visto que a produtividade média alcançada (61,5 Mg ha⁻¹), ficou abaixo da produtividade crítica considerada para reforma na região norte do Paraná (70 Mg ha⁻¹).

Com relação à qualidade tecnológica (Tabela 3.6), as doses de calcário e gesso não atrasaram a maturação da cana-de-açúcar, visto que em todas as parcelas os teores de açúcares redutores foram menores que 0,5%. A testemunha apresentou maior concentração de açúcares, tanto em sacarose (maior PCC), como em açúcares redutores totais (ART). A menor concentração de açúcar com a dose C0G4 é devido a ação do sulfato em lixiviar o K⁺ e principalmente o Mg⁺². O teor de S-SO₄⁻² foi significativo e negativamente correlacionado com o acúmulo de açúcar (PCC e ART) nas profundidades de 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m (Tabela 3.7). Com o aumento do sulfato provavelmente aumentou a lixiviação de magnésio e potássio, reduzindo a disponibilidade desses dois nutrientes para planta e de acordo com Engels (2012), o transporte de sacarose para os vacúolos, dependem do magnésio e é estimulado pelo K⁺. Na cana-de-açúcar, a sacarose é exportada das folhas pelo floema, passando pelos espaços celulares e pelo compartimento metabólico (citossol) para ser acumulado no vacúolo das células do colmo (SACHER et al., 1963). A redução da disponibilidade do magnésio e potássio pode ter reduzido o transporte de sacarose, resultando em um menor acúmulo de açúcar.

Tabela 3.7 Relação entre teor de S-SO₄²⁻ nas diversas profundidades entre o pol da cana (PCC) e açúcar redutor total (ART).

Profundidade (m)	PCC		ART	
	R	<i>p</i>	R	<i>p</i>
0,00-0,05	-0,52	0,0043	-0,51	0,0056
0,05-0,10	-0,55	0,0022	-0,55	0,0023
0,10-0,20	-0,66	0,0001	-0,67	<0,0001
0,20-0,40	-0,50	0,0062	-0,49	0,0075

As doses isoladas de calcário (C3G0, C6G0) e a associação com gesso (C3G4) apresentaram diminuição da concentração de açúcares. Com a aplicação de calcário houve maior disponibilidade de sulfato (Tabela 3.3), culminando na redução da concentração de açúcares. Os efeitos da nutrição do cálcio ou o balanço de cálcio com outros nutrientes é o responsável pela redução da concentração de açúcar promovido pela calagem (KINGSTON; HURLEY; AITKEN, 1996). A dose C3G4 proporcionou a maior concentração de Mg²⁺ nas profundidades de 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m (Tabela 3.2), mas provavelmente devido ao desbalanço nutricional, o acúmulo de açúcar foi menor que a testemunha. Embora a aplicação de calcário e gesso diminuiu a concentração de açúcar, não houve diferença na produção de sacarose por área.

Os custos com as aplicações das doses recomendadas de calcário (C3G0), gesso (C0G4) e a associação calcário e gesso (C3G4) apresentaram, respectivamente, valores equivalentes a 5,50, 10,77 e 16,25 t ha⁻¹ de colmos de cana-de-açúcar (apêndice F) e o aumento da produtividade de colmos por hectare (TCH) ou a produtividade de sacarose por hectare (TSH) não foram alcançados para superar o custo adicional com as aplicações.

As respostas observadas da influência dos teores no solo de K⁺ e Mg²⁺ no acúmulo de açúcar, sugerem que maior atenção deve ser dada as relações entre Ca²⁺: Mg²⁺: K⁺ no solo, a fim de proporcionar maior produtividade de sacarose e que talvez essas relações devem ser levadas em consideração em conjunto com a acidez e saturação de alumínio.

3.6 CONCLUSÕES

A aplicação de calcário e gesso na quarta soqueira de cana-de-açúcar em solo muito argiloso, com alta acidez e saturação por alumínio, tem a sua eficiência reduzida pela limitada porosidade, causada pelo tráfego de máquinas ao longo das safras. A ausência do efeito das doses na população de perfilhos, produtividade de colmos e na quantidade produzida de sacarose por área da var. RB855453, somada à baixa eficiência na reação com o solo, não postergou a necessidade de reforma do canavial, sugerindo que a aplicação desses insumos deve ser realizada no momento de renovação do canavial, na qual o solo estará descompactado. Diante das condições físicas do solo, não foi possível observar a redução da saturação por alumínio e o aumento da saturação por cálcio abaixo da profundidade de 0,20 m, condições esperadas pela aplicação de gesso. O uso isolado do gesso agrícola em soqueiras com solo com níveis baixo de K^+ e médio de Mg^{2+} deve ser evitado, devido à lixiviação de bases, principalmente do Mg^{2+} , o que causa redução no acúmulo de açúcar pela planta. A melhor distribuição de magnésio no perfil do solo, fornecida pela dose associada de calcário e gesso não implicou em maior enraizamento e produtividade de colmo e de sacarose.

4. ARTIGO B: EFEITOS RESIDUAIS DAS DOSES DE CALCÁRIO E GESSO E SUA INFLUÊNCIA NO CRESCIMENTO RADICULAR DA CANA-DE-AÇÚCAR

4.1 RESUMO

A acidez do solo é um dos fatores que mais limitam a produtividade das culturas. Com o objetivo de determinar os efeitos residuais da aplicação de doses calcário e gesso e sua influência no sistema radicular da soqueira de cana-de-açúcar, em Latossolo Vermelho distroférico, foi instalado um experimento em Andará-PR, na soqueira de quinto corte com a variedade RB855453, em blocos ao acaso, com as doses C0G0, 0 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (C) e 0 Mg ha⁻¹ de gesso (G), C0G2, C0G4, C0G8, as quais constituem 0, ½, 1 e 2NG, em que NG é a necessidade de gesso e C3G0, C6G0, sendo as doses de 1 e 2NC, sendo as doses recomendadas para elevar a saturação por bases à 60% e C3G4, a dose recomendada de calcário e gesso. Após 20 meses da aplicação, foram abertas trincheiras em cada parcela para a coleta de solo e para a avaliação do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar da soqueira do sexto corte. As amostras para análises químicas foram coletadas nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80, 0,80-1,00 m, sendo analisados: pH em CaCl₂, carbono orgânico (CO), acidez potencial (H+Al), fósforo disponível (P), alumínio trocável (Al³⁺), cálcio trocável (Ca²⁺), magnésio trocável (Mg²⁺), potássio trocável (K⁺), soma de bases (SB), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m). A aplicação de calcário (C3G0) proporcionou maiores teores de Ca²⁺, Mg²⁺ e saturação de base na camada superficial. Após 20 meses de aplicação, a condição de melhor distribuição de magnésio no perfil do solo com a aplicação da dose de calcário e gesso, que havia sido observada aos 8 meses não foi mantida. Com as doses de calcário (C3G0) e gesso (C0G4) ocorreram as maiores disponibilidades de Mn²⁺ no solo. A compactação impediu o desenvolvimento radicular na superfície, mesmo com a correção da camada superficial. Devido a não ocorrência da redução da saturação de alumínio e aumento da saturação de cálcio em profundidade, a profundidade efetiva das raízes não foi alterada.

Palavras-chave: *Saccharum spp.* Raízes. Calagem. Fosfogesso. Soqueira.

4.2 ABSTRACT

RESIDUAL EFFECTS OF LIME AND GYPSUM RATES AND THEIR INFLUENCE ON ROOT GROWTH OF SUGARCANE

Soil acidity is one of the most limiting factor of the crop yield. The objective of this study was to determine the residual effects of the application of lime and gypsum doses and their influence on the root system of the sugarcane ratoon, in Oxisol, an experiment was installed in Andirá-PR, in fifth ratoon with the variety RB855453, in randomized blocks, with the doses C0G0, 0 Mg ha⁻¹ of dolomitic lime (C) and 0 Mg ha⁻¹ of gypsum (G), C0G2, C0G4, C0G8, which constitute 0, ½, 1, and 2NG, where NG is the requirement for gypsum and C3G0, C6G0, the doses of 1 and 2NC being the recommended doses to raise the base saturation at 60% and C3G4, the recommended dose of lime and gypsum. After 20 months of application, trenches has been opened in each plot for soil collection and for evaluation of root development of sugarcane of the sixth harvest. Samples for chemical analyses was collected at depths 0.00-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40, 0.40-0.60, 0.60-0.80, 0.80-1.00 m, being analyzed: pH in CaCl₂, organic carbon (OC), potential acidity (H+Al), available phosphorus (P), exchangeable aluminum (Al³⁺), exchangeable calcium (Ca²⁺), exchangeable magnesium (Mg²⁺), exchangeable potassium (K⁺), sum of bases (SB), base saturation (V) and aluminum saturation (m). The application of lime (C3G0) provided higher levels of Ca²⁺, Mg²⁺ and base saturation in the superficial layer. After 20 months of application, the condition of better distribution of magnesium in the soil profile with the application of lime and gypsum dose, that has been observed in 8 months was not maintained. With the doses of lime (C3G0) and gypsum (C0G4), the greatest availability of Mn²⁺ in the soil occurred. The compaction suppressed root development on the surface, even with the correction of the superficial layer. Due to the non-occurrence of the reduction of the aluminum saturation and the increase of the calcium saturation in depth, there was no increase in the effective depth of the roots.

Key words: *Saccharum spp.* Roots. Lime. Phosphogypsum. Sugarcane ratoon.

4.3 INTRODUÇÃO

A acidez do solo é um dos fatores que mais limitam a produtividade das culturas, sendo o calcário o insumo mais utilizado para sua correção (BARBIERI et al., 2015). A combinação do calcário dolomítico com gesso agrícola promovem a melhor distribuição do magnésio no perfil do solo através da ação dos sulfatos em combinar com esse elemento, possibilitando o seu transporte em profundidade no perfil do solo.

O magnésio desempenha várias funções importantes na planta, das quais, a maior delas é constituir a molécula central de clorofila (HAWKESFORD et al., 2012). Notadamente para a cana-de-açúcar, planta que acumula sacarose (seu principal produto), o magnésio possui a importância de participar, em conjunto com o potássio, do transporte de sacarose para os vacúolos (ENGELS, 2012). Portanto, a maior disponibilidade desse nutriente no perfil do solo, pode promover o maior acúmulo de sacarose pela cana-de-açúcar.

Os efeitos da aplicação superficial do calcário tem sido relatados por mais de um ou dois anos da aplicação (BLEVINS; MURDOCK; THOMAS, 1978), devido à baixa solubilidade desse corretivo, mantendo as alterações benéficas à rizosfera, as quais podem favorecer o restabelecimento da soqueira, pois as raízes possuem papel importante para a cana-de-açúcar com a regeneração do canavial após a colheita (BALL-COELHO et al., 1992).

As hipóteses do nosso trabalho são: (i) a distribuição de magnésio no perfil do solo com a aplicação associada de calcário e gesso se mantém ao longo do tempo, favorecendo o desenvolvimento do sistema radicular em profundidade (ii) o efeito residual do calcário e gesso na correção da camada superficial proporciona melhor desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar.

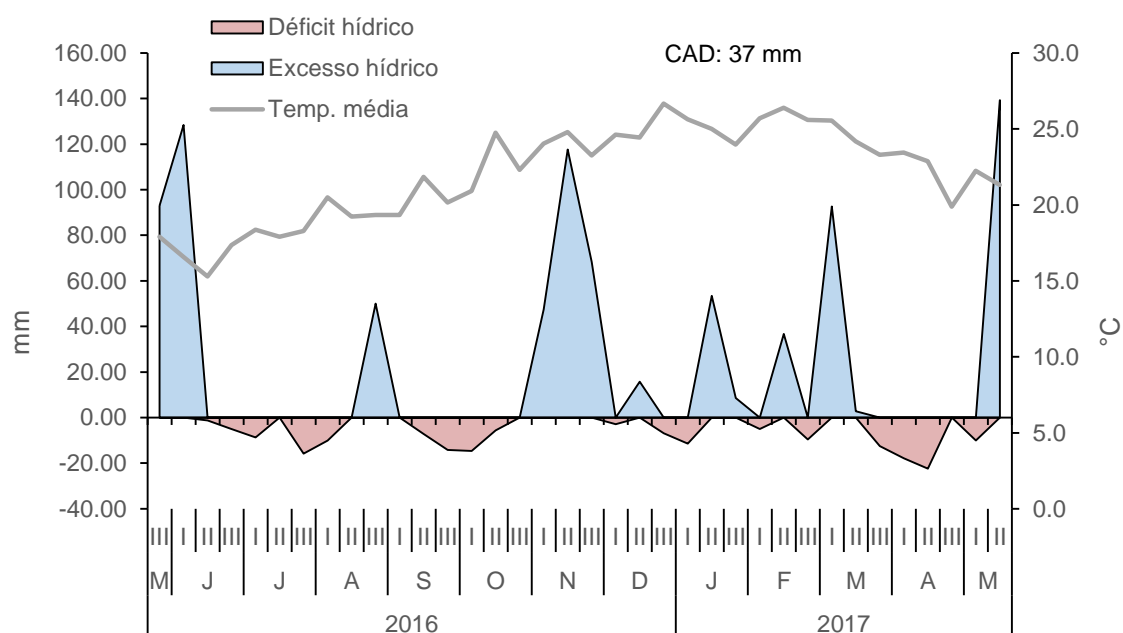
Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi determinar os efeitos residuais da aplicação de doses calcário e gesso e sua influência no sistema radicular da soqueira de cana-de-açúcar, após 20 meses a partir da aplicação em Latossolo Vermelho distroférico.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento, instalado em setembro de 2015, foi conduzido em área de cultivo comercial, no município de Andirá - PR, latitude 23°03'02"S, longitude 50°13'44"W e altitude 470 m.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa, subtropical (CAVIGLIONE et al., 2000). O balanço hídrico (Figura 4.1) foi confeccionado utilizando os dados obtidos em estação meteorológica do IAPAR localizada, aproximadamente, a 6 km do experimento e utilizando a metodologia de Thornthwaite; Mather, (1955). Para a determinação da capacidade de água disponível (CAD), foram coletadas amostras indeformadas nas profundidades de 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m com 4 repetições, a qual a média obtida das três profundidades foi de 37 mm.

Figura 4.1 Balanço hídrico durante a condução da soqueira no sexto corte (2016-2017).



A temperatura média do ar (Figura 4.1) durante o período do sexto corte foi acima da temperatura mínima de 15 °C requerida para o crescimento da cana-de-açúcar (EBRAHIM et al., 1998). Em relação à

disponibilidade hídrica, houve déficit hídrico na fase de brotação, a partir do segundo decêndio de junho de 2016 até o segundo decêndio de agosto (acumulando 41 mm de déficit hídrico), retornando no segundo decêndio de setembro até o segundo decêndio de outubro (déficit hídrico acumulado de 42 mm), prejudicando o estabelecimento da soqueira. Durante o verão, período onde ocorre a maior concentração de chuvas, ocorreram déficits hídricos que causaram prejuízos na etapa de crescimento da cultura.

O experimento foi instalado em Latossolo Vermelho distroférico (Tabela 4.1), em um delineamento experimental de blocos ao acaso, com sete tratamentos e quatro repetições. Os teores de argila nas camadas de 0,00-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, foram respectivamente de 664, 670 e 728 g kg⁻¹. Cada parcela foi constituída de oito linhas de uma soqueira de quinto corte de cana-de-açúcar em fase de rebrota, variedade RB855453, plantada no espaçamento de 1,5 m e com 10 metros de comprimento. A parcela útil considerada foi composta de quatro fileira centrais, com 8 metros de comprimento, e área de 48 m².

Tabela 4.1 Atributos químicos determinados antes da implantação do experimento.

Prof. (m)	P (mg dm ⁻³)	C.O. (g dm ⁻³)	pH CaCl ₂	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Mg ²⁺	K ⁺	SB	T	V %
0,00 – 0,20	2,6	16,1	3,9	2,4	8,57	1,00	0,60	0,10	1,70	10,27	16,6
0,20 – 0,40	1,4	13,4	4,1	1,3	6,09	1,70	0,70	0,03	2,43	8,52	28,5
0,40 – 0,60	0,9	10,7	4,2	0,8	5,82	1,40	0,60	0,02	2,02	7,84	25,7

Os tratamentos foram constituídos de quatro doses: C0G0 (0 Mg ha⁻¹ de calcário e 0 Mg ha⁻¹ de gesso), C0G4, sendo a dose recomendada de gesso por SPIRONELLO et al. (1996), calculada como seis vezes o teor de argila, em g kg⁻¹ na profundidade entre 0,20-0,40 m; C3G0, a dose recomendada de calcário, a qual a necessidade de calcário foi recomendado para elevar a saturação de bases à 60% para a profundidade entre 0,20-0,40 m (SPIRONELLO et al., 1996) e, por fim, a dose recomendada de calcário e gesso, C3G4.

O calcário dolomítico utilizado possuía PRNT de 85% e a composição do gesso agrícola é de 20,40% de CaO, 15,48% de S e 25,42% de umidade. As aplicações foram realizadas de forma manual em setembro de

2015, a lanço, após a brotação da touceira. Foram colhidos a cana-de-açúcar do quinto corte e cultivado a soqueira para o próximo corte.

Em relação aos tratos culturais, foram realizados a aplicação manual de 500 kg ha⁻¹ da fórmula NPK 20-05-20, em agosto de 2016. Para o controle de plantas daninhas, foram aplicados clomazone, 2,4D + picloram e tebutirom, nas dosagens de 1,5 L ha⁻¹, em julho de 2016, de forma tratorizada, e capina em novembro de 2016, para controle do capim colômbio (*Panicum maximum*).

Após 20 meses do corte da safra anterior e 12 meses da aplicação dos insumos, o experimento foi colhido e foram abertas uma trincheira em cada tratamento, perpendicular à linha de plantio, para a coleta de solo e para a avaliação do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. O método utilizado para a avaliação do sistema radicular foi o método da trincheira (BÖHM, 1979). As trincheiras possuíam distância de 0,05 m da touceira e as dimensões foram de 1,0 de profundidade por 1,5 m de largura, a partir do centro da touceira. As raízes foram expostas com a utilização de um rolo escarificador e uma tela com malha de 0,02 x 0,02 m foi fixada na parede do perfil, onde foram quantificadas e calculada a porcentagem de raízes por profundidade. Determinou-se também a profundidade efetiva das raízes, a qual é a profundidade onde se encontra os 80% das raízes avaliadas.

As amostras para análises químicas do solo foram coletadas nas entrelinhas (2 subamostras por parcela) nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80, 0,80-1,00 m. Todas as amostras foram secas ao ar livre, peneiradas em malha de 2 mm e estocada para posterior análise.

O pH foi determinado em suspensão do solo (solo:solução 1:2,5) utilizando solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ após 15 minutos de agitação (PAVAN et al., 1992); Al⁺³, Ca²⁺ e Mg²⁺ trocável foram extraídos pelo KCl 0,01 mol L⁻¹ (solo:extrator 1:10) após 15 minutos de agitação. O Al⁺³ trocável foi determinado através de titulação com a solução de NaOH 0,010 mol L⁻¹ usando o azul de bromotimol. Para o Ca²⁺ e Mg²⁺, foram retirados 0,1 ml do extrato, adicionado 4,9 mL de lantânio 0,1% e determinados por espectrofotômetro de absorção atômico (PAVAN et al., 1992). P e o K⁺ trocável foram extraídos por Mehlich-1

(solo: extrator 1:10) sendo o K^+ medido pelo fotômetro de chama e o P foi determinado pelo espectrofotômetro a 630 nm (PAVAN et al., 1992). O carbono orgânico foi determinado pelo método de Walkey-Back (PAVAN et al., 1992). A acidez potencial ($H+Al^{3+}$) é estimada pelo balanço pH do solo com solução SMP ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$, $Ca(CH_3CO_2)_2$, trietanolamina, p-nitrofenol), tamponada a pH 7,5 (PAVAN et al., 1992). Com os resultados das bases trocáveis e da acidez potencial ($H+Al$), foram calculadas a soma de bases (SB) e saturação por base (V%) (EMBRAPA, 2009). Com a SB e Al^{3+} foi calculada a saturação por alumínio (m) (EMBRAPA, 2009).

A densidade do solo, macro, microporosidade e a porosidade total foram determinadas utilizando anéis de 50,00 mm de diâmetro e 50,00 mm de altura, de acordo com Embrapa (2011). As amostras indeformadas (2 subamostras por profundidade) foram coletadas nas profundidades 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, 0,40-0,60, 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m.

Os dados mensurados foram testados quanto à sua normalidade (Shapiro Wilk) e homogeneidade das variâncias (Hartley) e submetidos à análise de variância. Os dados que não atenderam a normalidade e a homogeneidade, foram transformados. No caso de significância no Teste F, as médias foram comparadas ao teste Tukey a 5% de probabilidade.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após 20 meses, a aplicação de calcário (C3G0) proporcionou maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , maior saturação de base na camada superficial (0,00-0,05 m e 0,05-0,10 m) e menores teores de $H+Al$ (Tabela 4.2). A redução do alumínio trocável e o aumento da saturação de cálcio e magnésio são devidos à reação dos ânions bicarbonato (HCO_3^-) e hidroxilas OH^- liberados pela dissociação do calcário com a acidez presente na superfície do solo, e pela ausência de ânions acompanhantes para o transporte de Ca^{2+} e Mg^{2+} , esses cátions foram adsorvidos ao complexo de troca.

Na camada de 0,00-0,05 m (Tabela 4.3), para as variáveis saturação por bases (V%) e saturação por cálcio (Ca^{2+}), as doses de gesso (C0G4) e a associação com o calcário (C3G4) apresentaram valores

intermediários entre a testemunha (C0G0) e a dose recomendada de calcário (C3G0).

Tabela 4.2 Atributos químicos do solo para as doses de calcário e gesso nas profundidades selecionadas.

Doses	pH	(cmol _c dm ⁻³)				
		Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
0,00-0,05 m						
C0G0	3,6 ns ⁽¹⁾	1,65 a	7,66 a	0,74 b ⁽²⁾	0,60 a	0,43
C0G4	4,0	0,91 ab	6,85 ab	1,31 ab	0,62 a	0,48
C3G0	4,7	0,42 b	4,19 b	2,06 a	1,59 a	0,49
C3G4	4,6	0,29 b	5,11 ab	1,90 ab	1,03 a	0,61
0,05-0,10 m						
C0G0	3,5 b	2,20 a	9,58 b	0,11 b	0,33 b	0,42
C0G4	3,8 ab	1,16 ab	7,66 ab	1,43 ab	0,58 ab	0,47
C3G0	4,3 a	0,55 b	5,34 b	2,83 a	0,97 a	0,41
C3G4	4,0ab	1,19 ab	7,38 ab	1,62 ab	0,65 ab	0,46
0,10-0,20 m						
C0G0	3,6 ns	2,18	8,57	0,31	2,26 ⁽³⁾	0,32
C0G4	3,7	1,51	7,42	1,12	1,74	0,37
C3G0	3,8	1,30	6,94	0,89	1,44	0,33
C3G4	3,7	1,85	7,78	0,61	1,80	0,32
0,60-0,80 m						
C0G0	4,0 ns	1,25	6,16	1,04	0,34	0,22
C0G4	4,3	0,97	5,46	1,69	0,41	0,18
C3G0	3,8	0,98	5,11	1,32	0,27	0,13
C3G4	3,9	1,14	6,12	1,12	0,41	0,14
0,80-1,00 m						
C0G0	3,9 ns	1,60	6,97	0,27	0,27	0,22
C0G4	4,3	1,12	6,02	1,08	0,40	0,18
C3G0	3,8	1,14	5,71	1,20	0,26	0,13
C3G4	3,9	1,41	6,84	0,70	0,34	0,14

⁽¹⁾Presença de letras diferentes na vertical indicam diferença entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade para cada camada. ns: diferença não significativa. ⁽²⁾Dados transformados: $\sqrt{x} + 0,01$. ⁽³⁾Dados transformados: $1/\sqrt{x}$

Nas camadas mais profundas, a contínua ação dos sulfatos removeu os maiores teores de magnésio obtidos com a dose associada de calcário e gesso nas camadas de 0,60-0,80 e 0,80-1,00 m (Tabelas 4.2). Após 20 meses da aplicação, não ocorreu o aumento da saturação de cálcio e a redução da saturação de alumínio com a aplicação dos insumos. A compactação existente até a profundidade de 0,40 m (Tabela 4.4), provavelmente, foi

responsável por dificultar a percolação dos insumos aplicados.

Tabela 4.3 Doses de calcário e gesso e saturação de alumínio (m), saturação por bases (V), saturação por cálcio (Ca^{2+}), saturação por magnésio (Mg^{2+}) e saturação por potássio (K^+) para as profundidades selecionadas.

Doses	m	V	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+
(%)					
0,00-0,05 m					
C0G0	49,34 a ⁽¹⁾	18,57 b	7,52 b	6,43 b	4,62
C0G4	24,93 ab	29,43 ab	18,18 ab	6,32 b	4,93
C3G0	11,73 b	59,86 a	41,51 a	13,85 a	4,50
C3G4	6,59 b	49,90 ab	34,58 ab	9,57 ab	5,75
0,05-0,10 m					
C0G0	71,70 a	8,39 b	1,06 b	3,27 b	4,06 ⁽³⁾
C0G4	37,48 ab	23,32 ab	13,15 ab	5,50 ab	4,67
C3G0	13,23 b	43,66 a	29,33 a	10,09 a	4,24
C3G4	36,62 ab	25,59 ab	14,89 ab	6,19 ab	4,51
0,10-0,20 m					
C0G0	72,16	9,52	3,33	2,84	3,35
C0G4	46,69	20,39	12,25	4,18	3,96
C3G0	44,66	20,41	10,90	5,74	3,76
C3G4	61,10	13,87	6,69	3,67	3,50
0,60-0,80 m					
C0G0	48,18	21,12	2,93 ⁽²⁾	4,40	2,75
C0G4	38,42	28,25	4,24	5,11	2,23
C3G0	38,71	25,08	4,25	4,01	1,86
C3G4	41,81	21,56	3,69	5,32	1,81
0,80-1,00 m					
C0G0	68,00	9,83	3,53	3,47	2,83
C0G4	43,63	21,23	13,93	5,13	2,17
C3G0	46,12	21,94	16,64	3,58	1,72
C3G4	55,64	14,80	8,84	4,25	1,72

⁽¹⁾Presença de letras diferentes na vertical indicam diferença entre si pelo teste Tukey a 5%. ⁽²⁾Dados transformados: $\sqrt{x} + 0,01$. ⁽³⁾Dados transformados: $\log x$.

Os resultados do presente trabalho estão em desacordo com os obtidos por Radcliffe; Clark; Sumner (1986), os quais relatam a redução da compactação do solo, após 3 anos da aplicação de 10 Mg ha⁻¹ de gesso em um Argissolo com barreira química e física para o desenvolvimento das raízes. A redução da compactação ocorreu devido ao gesso ter promovido maior atividade radicular no subsolo. Nas condições do presente trabalho, não ocorreu o mesmo efeito, provavelmente, devido à compactação estar em níveis mais

elevados (Tabela 4.4), do que a relatada naquele trabalho.

Tabela 4.4 Atributos físicos do solo (densidade, macroporosidade e porosidade total) nas camadas selecionadas, após 20 meses da aplicação das doses de calcário e gesso.

Doses	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,40	0,60-0,80	0,80-1,00
Densidade (Mg m ⁻³)					
C0G0	1,37 ns	1,39 ns	1,46 ns	1,31 ns	1,25 ns
C0G4	1,38	1,45	1,45	1,29	1,28
C3G0	1,31	1,38	1,43	1,29	1,22
C3G4	1,42	1,41	1,42	1,33	1,24
Média	1,37	1,41	1,44	1,31	1,25
Macro (m ³ m ⁻³)					
C0G0	0,11 ns	0,08 ns	0,08 ns	0,09 ns	0,10 ns
C0G4	0,09	0,07	0,08	0,09	0,08
C3G0	0,09	0,09	0,08	0,07	0,08
C3G4	0,11	0,10	0,09	0,09	0,10
Média	0,10	0,09	0,08	0,08	0,09
Porosidade Total (m ³ m ⁻³)					
C0G0	0,52 ns	0,48 ns	0,50 ⁽¹⁾ ns	0,53 ns	0,55 ns
C0G4	0,51	0,50	0,49	0,53	0,52
C3G0	0,52	0,53	0,50	0,52	0,54
C3G4	0,52	0,52	0,49	0,54	0,54
Média	0,52	0,51	0,49	0,53	0,54

ns = diferença não significativa, na vertical, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. (1) Dados transformados: x^{-1} .

Em relação aos micronutrientes, a aplicação de calcário e gesso promoveu o aumento da concentração de Mn²⁺ no solo na camada de 0,05-0,10 m (Tabela 4.5), através dos cátions básicos que reagem com o Mn²⁺ associado aos óxidos de ferro. A maior disponibilidade de Mn²⁺ com a aplicação de gesso também foi relatada por Li et al. (2015), os quais verificaram o aumento desse nutriente na solução do solo. O nível desse nutriente no solo, de acordo com o NEPAR (2017), era considerado alto para a testemunha e com a aplicação de gesso (C0G4) e calcário (C3G0), o nível passou para muito alto. A dose associada de calcário e gesso elevou também o nível de Mn²⁺ no solo em comparação com a testemunha, porém ainda permaneceu na classificação alta. Para Malavolta et al. (1997), como o Mn²⁺ possui propriedades semelhantes às de metais alcalino-ferrosos, como o Ca²⁺ e Mg²⁺ e os de metais pesados como, Fe e Zn²⁺, podendo inibir a absorção e transporte desses elementos mencionados.

Tabela 4.5 Doses de calcário e gesso e teores de Mn^{2+} ($mg\ dm^{-3}$) nas profundidades de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m.

Prof. (m)	Mn ²⁺ ($mg\ dm^{-3}$)			
	C0G0	C0G4	C3G0	C3G4
0,00-0,05	70,91 ⁽¹⁾	105,46	85,84	109,91
0,05-0,10	54,06 b	102,05 a	103,06 a	84,58 ab

⁽¹⁾Presença de letras diferentes na horizontal indicam diferença entre si pelo teste Tukey a 5%.

As maiores saturações por bases, cálcio e magnésio verificados nas camadas de 0,00-0,05 e 0,05-0,10 m com a dose de recomendada de calcário (C3G0) não proporcionaram o maior percentual de raízes na camada de 0,00-0,10 m (Tabela 4.6), possivelmente ao valor de macroporosidade de 0,11 $m^3\ m^{-3}$ (Tabela 4.4) não proporcionar a adequada aeração do solo e causar limitação ao desenvolvimento radicular. Como não foi verificado o aumento da saturação de cálcio e redução da saturação de alumínio na subsuperfície, não ocorreu o aumento da profundidade efetiva das raízes (PE).

Tabela 4.6 Percentual de raízes nas profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,30, 0,30-0,40, 0,40-0,50, 0,50-0,60, 0,60-0,70, 0,70-0,80, 0,80-0,90, 0,90-1,00 m e profundidade efetiva das raízes (PE) de cana-de-açúcar submetida a doses de calcário (C) e gesso (G).

Prof. (m)	Doses				C.V. (%)
	C0G0	C0G4	C3G0	C3G4	
% de raízes					
0,00 – 0,10	18,55 ns	16,45	14,45	13,34	33,73
0,10 – 0,20	11,22 ns	12,21	13,10	10,77	20,84
0,20 – 0,30	10,16 ns	9,35	11,65	8,52	19,43
0,30 – 0,40	8,44 ns	8,78	11,11	9,58	21,93
0,40 – 0,50	8,65 ns	9,10	9,23	10,03	21,62
0,50 – 0,60	9,73 ns	10,54	9,48	9,58	22,45
0,60 – 0,70	9,01 ns	9,72	9,36	11,15	18,09
0,70 – 0,80	9,02 ns	9,14	8,31	10,38	17,80
0,80 – 0,90	7,76 ns	7,93	6,83	8,89	21,23
0,90 – 1,00	7,46 ns	6,79	6,48	7,75	22,03
P. E. (m)	0,74 ns	0,73	0,72	0,77	5,48

ns = diferença não significativa, na linha, pelo teste Tukey a 5% de significância.

A aplicação dos insumos na quinta soqueira, não apresentaram os resultados esperados na rizosfera, na soqueira seguinte como redução da saturação de alumínio e aumento da saturação de cálcio na subsuperfície e aumento da atividade radicular no subssolo. Os efeitos ocorridos na superfície não promoveram o aumento do enraizamento, devido à compactação, ocorrendo o baixo aproveitamento dos insumos, os quais devem ser reaplicados no momento da reforma do canavial.

4.6 CONCLUSÕES

A melhor distribuição do magnésio no perfil do solo com a aplicação da associação calcário e gesso não se manteve após 20 meses.

A correção da acidez da camada superficial do solo não foi suficiente para aumentar o enraizamento aos 20 meses após a aplicação, devido à compactação.

Não foi detectada alteração dos atributos físicos do solo após 20 meses da aplicação dos insumos.

5. CONCLUSÕES GERAIS

O aproveitamento da aplicação de calcário e gesso em uma soqueira em quinto corte em solo argiloso foi reduzido devido à compactação do solo, não ocorrendo a recuperação da produtividade da soqueira e o aumento da longevidade do canavial.

No primeiro ano de avaliação a dose C3G4 apresentou a melhor distribuição de Mg^{2+} ao longo do perfil do solo, porém essa condição foi momentânea devido a contínua ação do sulfato, a qual no segundo ano de avaliação, essa condição não se manteve.

Durante os dois anos de avaliação não foram detectados melhoria dos atributos físicos do solo. Frente a ausência dos efeitos que melhorem a produtividade da cana-de-açúcar nas condições da soqueira, a correção da acidez e a redução do teor de alumínio deve ser realizada no período de reforma do canavial, onde o solo será descompactado.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, F. Crop response to lime in the Southern United States. In: ADAMS, F. **Soil acidity and liming**. 2nd ed. Madison: America Society of Agronomy, Crop Science Society of America e Soil Science Society of America, 1984. p. 211-265.
- ANIKWE, M. A. N.; EZE, J. C.; IBUDIALO, A. N. Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in degraded ultissol in Agbani, Enugu Southeastern Nigeria. **Soil & Tillage Research**, v. 158, p. 32-38, 2016.
- AVILAN, L. R.; GRANADOS, F. M.; ORTEGA, D. Estudio del sistema radicular de três variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en un mollisol de los Valles de Aragua. **Agron. Trop.**, v. 27, p. 69-87, 1977.
- BACCHI, O. O. S. Botânica da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: Planalsucar, 1983. p. 25-37.
- 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, p. 297-305, 1992.
- BARBIERI, P. A.; ECHEVERRÍA, H. E.; ROZAS, H. R. S.; MARTÍNEZ, J. P. Soybean and wheat response to lime in no-till Argentinean mollisols. **Soil & Tillage Research**, v. 152, p. 29-38, 2015.
- BELL, M. J.; GARSIDE, A.L. Shoot and stalk dynamics and the yield of sugarcane crops in tropical and subtropical Queensland, Australia. **Field Crops Research**, v. 92, p. 231-248, 2005.
- BENNETT, J. M.; GREENE, R. S. B.; MURPHY, P. HOCKING, TONGWAY. Influence of lime and gypsum on long-term rehabilitation of red sodosol, in a semi-arid environment of New South Wales. **Soil Research**, v. 52, p.120-128, 2014.
- BHERING, S. B.; SANTOS, H. G. (Eds.). **Mapa dos solos do Estado do Paraná: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Florestas, Embrapa Solos, Instituto do Paraná, 2008. 74p.
- BEVEN, K.; GERMANN, P. Macropores and water flow in soils. **Water resources research**, v. 18, p. 1311-1325, 1982.
- BLACKBURN, F. **Sugarcane**. London: Longman, 1984, 414 p.
- BLEVINS, R. L.; MURDOCK, L. W.; THOMAS, G.W. Effect of lime application on no-tillage and conventionally tilled corn. **Agronomy Journal**, v. 70, p. 322-326, 1978.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlim: Springer Verlag, 1979. 188 p.

BOLAN, N.S.; ADRIANO, D. C.; CURTIN, D. Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. **Adv. Agron.**, v.78, p. 215-272, 2003.

BOONE, F. R.; WERF, H. M. G. van der; KROESBERGEN, B.; HAG, B. A. tem; BOERS, A. The effect of compaction of the arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. 2. Soil conditions and plant growth. **Neth. J. Agric. Res.**, v. 35, p. 113-128, 1987.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n.º 35 de 4 de julho de 2006. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 12 jul. 2006. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-35-de-4-7-2006-corretivos.pdf/view>>. Acesso em: 13 mar. 2017.

BRAUNACK, M. V.; ARVIDSSON, J.; HÅKANSSON, I. Effect of harvest traffic position on soil conditions and sugarcane (*Saccharum officinarum*) response to environmental conditions in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, v. 89, p. 103-121, 2006.

CAIRES, E.F.; BANZATTO, D.A.; FONSECA, A. F. Calagem na superfície em sistema de plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 24, p. 161-169, 2000.

CÂMARA, G. M. S. Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. (Ed.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ/FEALQ, 1993. p. 31-64.

CANZIANI, J. R.; GUIMARÃES, V. D. A. **Manual do Consecana Paraná**. 3. ed. Curitiba: FAEP, 2012. 116p.

CATANI, R. A.; GALLO, J.R. Avaliação da exigência em calcário dos solos do estado de São Paulo mediante correlação entre pH e a porcentagem de saturação de bases. **Revista de Agricultura**, v. 30, p. 49-60, 1955.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L.R.B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000. (CD-ROM)

CENTENARO, G.; HUDEK, C.; ZANELLA, A.; CRIVELLARO, A. Root-soil physical and biotic interactions with a focus on tree root systems: A review. **Applied Soil Ecology**. 2017. In press.

CHAMEN, T.; ALAKUKKU, L.; PIRES, S.; SOMMER, K.; SPOOR, G.; TIJINK, F.; WEISSKOPF, P. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part. 2 Equipment and field practices. **Soil & Tillage Research**, v. 73, p. 161-174, 2003.

CHAN, K. Y.; CONYERS, M. K.; SCOTT, B. J. Improved structural stability of an acidic hardsetting soil attributable to lime application. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 38, p. 2163-2175, 2007.

CHEN, L.; KOST, D; DICK, W. A. Flue Gas Desulfurization products as sulfur sources for corn. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 72, p. 1464-1470, 2008.

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

CRUSCIOL, C. A. C.; FOLTRAN, R.; ROSSATO, O. B.; MCCRAY, M.; ROSSETTO, R. Effects of surface application of calcium-magnesium silicate and gypsum on soil fertility and sugarcane yield. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 38, p. 1843-1854, 2014.

CURY, T. N.; DE MARIA, I. C. BOLONHEZI, D. Biomassa radicular da cultura de cana-de-açúcar em sistema convencional e plantio direto com e sem calcário. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 38, n. 6, p. 1929-1938, 2014.

DEXTER, A.R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil & Tillage Research**, v. 20, p. 87-100, 1991.

DRUMMOND, R. D.; GUIMARÃES, C. T.; FELIX, J.; NINAMANGO-CÁRDENAS, CARNEIRO, N. P.; PAIVA, E.; MENOSSI, M. Prospecting sugarcane genes involved in aluminum tolerance. **Genetic and Molecular Biology**, v. 24, p. 221-230, 2001.

EBRAHIM, M. K.; ZINGSHEIM, O.; EL-SHOUBAGY M., MOORE, P. H.; KOMOR, E. Growth and sugar storage in sugarcane grown at temperatures below and above optimum. **Journal of Plant Physiology**, v. 153, p. 593-602, 1998.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2 ed. Brasília. Brasília: EMBRAPA, 2009. 627 p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: EMBRAPA SOLOS, 2011. 230 p.

ENGELS, C.; KIRKBY, E.; WHITE, P. Mineral nutrition, yield and source-sink relationships. In: MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2012. p. 85-133.

EPE. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2018**. Disponível em:<<https://ben.epe.gov.br/benrelatoriosintese.aspx>>. Acesso em 06 jul. 2018.

EVANS, H. The root-system of the sugar-cane: I. Methods of study. **Empire J. Exp. Agric.** n. 3, p. 351-363, 1935.

FAOSTAT. Disponível em:< <http://www.fao.org/faostat/en/#home>>. Acesso em 06 jul. 2018.

FITTER, A. H. Characteristics and functions of root systems. In: WAISEL, Y.; ESHEL A.; KAFKAFI, U. **Plant roots: the hidden half**. 3. ed. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 15-32.

GAVIOLI, E. A.; CASAGRANDE, A. A.; MUTTON, M. A.; VITTI, G. C. PARANHOS, S. B.; CAMPANHÃO, J. Aplicação de calcário, gesso e mistura calcário/gesso em soca de cana-de-açúcar. I. Efeitos na planta. **STAB**, v. 10, p. 17-24, 1992.

HARTEMINK, A. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. **Geoderma**, v. 85, p. 283-306, 1998.

HATI, K. M.; SWARUP, A.; MISHRA, B.; MANNA, M. C.; WANJARI, R. H.; MANDAL, K. G.; MISRA, A. K. Impact of long-term application of fertilizer, manure and lime under intensive cropping on physical properties and organic carbon content of an Alfisol. **Geoderma**, v. 148, p. 173-179, 2008.

HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J. MØLLER, I. S.; WHITE, P. Function of macronutrients. In: MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2012. p. 135-189.

HEITMAN, J. L.; GAUR, A.; HORTON, R.; JAYNES, D. B.; KASPAR, T. C. Field measurement of soil surface chemical transport properties for comparison of management zones. **Soil Sci. Soc.**, v. 71, p. 529-536, 2007.

HILLEL, D. Movement and exchange of gases in the soil. In: _____. **Environmental Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 1998. p. 291-305.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; REIS, L. B. **Energia e Meio Ambiente**. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 764 p.

HOLLAND, J. E.; BENNETT, A. E.; NEWTON, A. C.; WHITE, P. J.; MCKENZIE, B. M.; GEORGE, T. S.; PAKEMAN, R. J.; BAILEY, J. S.; FORNARA, D. A.; HAYES, R. C. Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A Review. **Science of the Total Environment**. v. 610-611, p. 316-332, 2018.

HUMBERT, R. P. Soil as a factor in varietal yield decline. In: INTERNACIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGICAL, 10., 1959, Hawai. **Proceedings...** Amsterdam: Elsevier, 1960. p. 51-59.

INFORZATO, R.; ALVAREZ, R. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar var. Co.290, em solo tipo terra-roxa-legítima. **Bragantia**, v. 16, p. 1-13, 1957.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, p. 185-202, 2005.

KERTESZ, M. A.; MIRLEAU, P. The role of soil microbes in plant sulphur nutrition. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, p. 1939-1945, 2004.

KIM, H., ANDERSON, S. H.; MOTAVELLI, P. P.; GANTZER, C. J. Compaction effects on soil macropore geometry and related parameters for an arable field. **Geoderma**, v. 160, p. 244-251, 2010.

KINGSTON, G.; HURNEY, A. P.; AITKEN, R. L. Depression of ccs in sugarcane after use of liming products: economic significance and associations with soil chemistry and leaf nutrient composition. In: CONFERENCE OF AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 18., 1996, Mackay. **Proceedings...** Brisbane: Watson Ferguson, 1996. p. 164-173.

KINGSTON, G. Mineral Nutrition of Sugarcane. In: MOORE, P. H.; BOTHA F. C. **Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology**. Ames: Willey Blackwell, 2014, p. 85-120.

KULLI, B.; GYSI, M.; FLÜHLER, H. Visualizing soil compaction based on flow pattern analysis. **Soil & Tillage Research**, v. 70, p. 29-40, 2003.

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

LEAL, M. R. L. V.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F. V.; SEABRA, J. E. A.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C. O. F. **Biomass and Bioenergy**, v. 53, p.11-19, 2013.

LI, J.Y; LIU, Z. D.; ZHAO, W. Z.; MASUD, M. M.; XU, R. K. Alkaline slag is more effective than phosphogypsum in the amelioration of subsoil acidity in an Ultisol profile. **Soil & Tillage Research**, v. 149, p. 21-32, 2015.

LIU, C.; ZHAO, Q.; ZHOU, K. Properties of hemihydrate phosphogypsum and application to solidified material. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY, ENVIRONMENT AND MATERIALS SCIENCE, 1., 2015, Guangzhou. **Proceedings...** Leiden: CRC Press, 2016. p. 587-591.

LORENZETTI, J. M.; RODRIGUES, J.C.; MORALES, S. H.; DEMATTÊ, J. L. I. Uso de calcário e gesso em soqueira de cana-de-açúcar. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 10, p. 14-18, 1992.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Funções. In: _____. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. p. 55-114.

MAPA. **Estatísticas de Comércio Exterior**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/relacoes-internacionais/estatisticas-de-comercio-exterior>>. Acesso em 08 jul. 2018.

MEDINA, C. C.; ROBAINA JÚNIOR, R. A. H.; NEVES, C. S. V. J. BRINHOLI, O. Sistema radicular de cana-de-açúcar submetida a doses de gesso, calcário e vinhaça. **Semina Ci. Agrárias**, v. 21, p. 71-75, 2000.

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. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 16, p. 187-194, 1992.

NEPAR. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: NEPAR, 2017. 482 p.

NEVES, C. S. V. J.; FELLER, C.; GUIMARAES, M. F.; MEDINA, C. C.; TAVARES FILHO, J; FORTIER, M. Soil bulk density and porosity of homogeneous morphological units identified by cropping profile method in clayey oxisols in Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 71, p. 109-119, 2003.

NOBLE, A. D.; HURNEY, A. P. Long-term effects of lime additions on sugarcane yield and soil chemical properties in north Queensland. **Expl. Agr.**, v. 36, p. 397-413, 2000.

OLIVEIRA, E. L.; PAVAN, M. A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & Tillage Research**, v. 38, p. 47-57, 1996.

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. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 33, p. 601-611, 2009.

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 & Tillage Research**, v. 117, p. 201-210, 2011.

PAVAN, M. A.; VOLKWEISS, S. J. Efeito do gesso nas relações solo-planta: princípios. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1., 1986, Brasília. **Anais...** Brasília: Embrapa, 1986. p.107-118.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F., ZEMPULSKI, H. C., MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Londrina: IAPAR, 1992, 40 p. (Circular Técnica 76)

PAVAN, M. A.; OLIVEIRA, E. L. **Manejo da Acidez do solo**. Londrina: IAPAR, 1997. 86 p.

PÉREZ, L.; MILLÁN, H.; GONZÁLEZ-POSADA, M. Spatial complexity of soil plow layer penetrometer resistance as influenced by sugarcane harvesting: A prefractal approach. **Soil & Tillage Research**, v. 10, p. 77-86, 2010.

PÖTTKER; BEM, 1998. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 22, p. 675-684, 1998.

RADCLIFFE, D.E.; CLARK, R.L.; SUMNER, M.E. Effect of gypsum and deep-rooting perennials on subsoil mechanical impedance. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 50, p. 1566-1570, 1986.

RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1996. 285p.

RAIJ, B. **Gesso na Agricultura**. Campinas: Instituto Agronômico, 2013, 233 p.

RAMBURAN, S.; WETTERGREEN, T.; BERRY, S. D.; SHONGWE, B. Genetic, environment and management contributions to ratoon decline in sugarcane. **Field Crops Research**, v. 146, p. 105-112, 2013.

REEVE, N.G.; SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity in Natal oxisols by leaching of surface-applied amendments. **Agrochimica**, v. 4, p. 1-6, 1972.

RFA. **Industry Statistics**. Disponível em:<
<https://ben.epe.gov.br/benrelatoriosintese.aspx>>. Acesso em 06 jul. 2018.

RITCHEY, K. D.; SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.; CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting in a Brazilian savannah oxisol. **Agronomy Journal**. v. 72 p. 40-44, 1980.

ROSSETTO, R.; SPIRONELLO, A.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Calagem para a cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, v. 63, p. 105-119, 2004.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C.; CANTARELLA, H. Fertility maintenance and soil recovery in sugarcane crops. In: CORTEZ, L. A. B. ed. **Sugarcane bioethanol – R&D for Productivity and Sustainability**. São Paulo: Edgard Blüthcher, 2014. p. 381-404.

SACHER, J. A.; HATCH, M. D.; GLASZIOU, K. T. Sugar accumulation cycle in sugarcane. III. Physical and metabolic aspect of cycle in immature storage tissues. **Plant Physiol**. v.18, p. 348-354, 1963.

SALDANHA, E. C. M.; ROCHA, A. T.; OLIVEIRA, E. C. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, F. J. Uso do gesso mineral em latossolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Caatinga**. v. 20, p. 36-42, 2007.

SEKIYA, N.; SHIOTSU, F.; ABE, J.; MORITA, S. Distribution and quantity of root systems of field-grown erianthus and napier grass. **American Journal of Plant Sciences**, v. 4, n. 12 A, p. 16-22, 2013.

SHAINBERG, I.; SUMNER, M.E.; MILLER, W. P.; FARINA M. W. P.; PAVAN, M. A.; FEY, M. V. Use of gypsum on soil: a review. **Adv. Soil Sci.**, v. 9, p. 1-111, 1989.

SHUKLA, S. K; YADAV, R. L.; SINGH, P. N.; SINGH, I. Potassium nutrition for improving stubble bud sprouting, dry matter partitioning, nutrient uptake and winter initiated sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid complex) ratoon yield. **European Journal of Agronomy**. v. 30, p. 27-33, 2009.

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

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

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B.; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO J.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETTO, R. Cana-de-Açúcar. In: RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. Ed. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. Ed. Campinas: IAC, 1996. p. 233-239. (Boletim Técnico, 100).

STENBERG, M.; STENBERG, B.; RYDBERG, T. Effects of reduced tillage and liming on microbial activity and soil properties in a weakly-structured soil. **Applied Soil Ecology**, v. 14, p. 135-145, 2000.

SYED-OMAR, S. R.; SUMNER, M. E. Effect of gypsum on soil potassium and magnesium status and growth of alfafa. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**. v.22, p. 2017-2018, 1991.

TASSO JUNIOR, L. C.; MARQUES, M. O.; CAMILOTTI, F.; SILVA, T. Extração de macronutrientes em cinco variedades de cana-de-açúcar cultivadas na região centro-norte do Estado de São Paulo. **STAB**, v. 25, p. 38-42, 2007.

TAVARES FILHO, J. BARBOSA, G. M. C.; GUIMARAES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, p. 725 – 730, 2001.

THORNTON, C.; MATHER, J. R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology. 1955. 104 p.

TIRITAN, C. S.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; CARMEIS FILHO, A. C. A.; FERNANDES, D. M.; NASCENTE, A. S. Tillage system and lime application in a tropical region: soil chemical fertility and corn yield in succession to degraded pastures. **Soil & Tillage Research**, v. 155, p. 437-447, 2016.

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. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 27, p. 849 – 858, 2003.

VERMA, A. K.; AGARWAL, A. K.; DUBEY, R. S.; SOLOMON, S.; SINGH, S.B. Sugar partitioning in sprouting lateral bud and shoot development of sugarcane. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 62, p. 111-115, 2013.

VITTI, A. C.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; BOLOGNA-CAMPBELL, I. Enxofre. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 323-330.

VITTI, G. C.; MAZZA, J. A.; PEREIRA, H. S.; DEMATTÊ, J. L. I. Resultados experimentais do uso de gesso na agricultura – cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO SOBRE USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., 1992, Uberaba. **Anais...** Uberaba: IBRAFOS, 1992. p. 191-224.

WANG, J.; NAYAK, S.; KOCH, K.; MING, R. Carbon partitioning in sugarcane (*Saccharum* species). **Frontiers in Plant Science**, v. 4, p.1-6, 2013.

WANG J.; YANG, P. Potential flue gas desulfurization gypsum utilization in agriculture: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p.1969–1978, 2018.

XU, X; NIEBER, J.L.; GUPTA, S.C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 56, p. 1743-1750, 1992.

ZOCA, S. M.; PENN, C. An Important tool with no instruction manual: A review of gypsum use in agriculture. In: SPARK, S D. L. (Ed), **Advances in Agronomy**, Burlington: Academic Press, 2017, p. 144

APÊNDICES

APÊNDICE A

Custo operacional de implantação de 1 hectare de cana-de-açúcar no norte do Paraná para a safra 2015/2016.

Componentes do custo	Unid	Qtd	Preço Unit. (R\$ ha ⁻¹)	Preço Total (R\$ ha ⁻¹)	Particip. (%)
A – Operações					
Gradagem pesada					
Trator de pneus de 180 cv Grade pesada 16 x 32"	hora ha ⁻¹	1,00	167,42	167,42	2,7
Gradagem pesada					
Trator de pneus de 180 cv Grade pesada 16 x 32"	hora ha ⁻¹	1,00	167,42	167,42	2,7
Gradagem intermediária					
Trator de pneus de 180 cv Grade intermediária 24 x 26"	hora ha ⁻¹	1,00	157,06	157,06	2,5
Construção de terraços					
Trator de pneus de 180 cv Terraceador de arrato 22 discos	hora ha ⁻¹	0,5	156,83	78,42	1,3
Sulcação e adubação química					
Trator de pneus de 180 cv Sulcador e adubador de 2 linhas	hora ha ⁻¹	2,00	143,05	286,11	4,6
Aplicação conj. de herbicida + inseticida					
Trator de pneus de 100 cv Pulverizador de barras de 800 L	hora ha ⁻¹	0,25	110,58	27,64	0,4
Corte manual das mudas					
Diaristas + Encargos	hora ha ⁻¹	21,33	7,50	160,00	2,6
Carregamento das mudas					
Carregadeira	hora ha ⁻¹	0,65	105,58	68,62	1,1
Transporte interno das mudas					
Caminhão	Mg	8	6,56	52,50	0,8
Distribuição das mudas no sulco, acerto e picote					
Diaristas + Encargos	hora ha ⁻¹	32	7,50	240,00	3,8

Cobertura dos sulcos e aplicação de fungicida

Trator de pneus de 100 cv	hora ha ⁻¹	0,7	98,36	68,85	1,1
Cobridor de 2 linhas					

Quebra lombo

Trator de pneus de 140 cv	hora ha ⁻¹	1,00	132,88	132,88	1,1
Cultivador de 2 linhas					

Corte, carregamento e transporte

Colhedora	hora ha ⁻¹	2,00	316,84	633,69	10,2
Transbordo (trator de pneus de 180 cv + transbordo)	hora ha ⁻¹	4,00	180,27	721,07	11,6
Caminhão comboio	hora ha ⁻¹	0,255	114,54	29,21	0,5
Caminhão pipa	hora ha ⁻¹	2,00	109,40	218,79	3,5
Caminhão oficina	hora ha ⁻¹	2,00	65,17	130,35	2,1
Caminhão canavieiro Romeu e Julieta (20 km)	Mg	85,00	6,84	581,79	9,3

SUBTOTAL OPERAÇÕES (A) 3.921,80 62,8

B – Insumos

Cana-de-açúcar (mudas)	Mg	8,00	60,00	480,00	7,7
Inseticida - Regent 800 WG	Kg	0,25	500,00	125,00	2,0
Herbicida – Gamit	L	3,00	56,00	168,00	2,7
Herbicida – Boral	L	2,00	125,00	250,00	4,0
Fertilizante 4-30-15	Mg	0,6	2.020,00	1,212,00	19,4
Fungicida – Piori xtra	L	0,5	169,00	84,50	1,4

SUBTOTAL INSUMOS (B) 2.319,50 37,2

TOTAL (A+B) 6.241,30 100

APÊNDICE B

Custo operacional de cultivo de 1 hectare de soqueira de cana-de-açúcar no norte do Paraná para a safra 2015/2016.

Componentes do custo	Unid	Qtd	Preço Unit. (R\$ ha ⁻¹)	Preço Total (R\$ ha ⁻¹)	Particip. (%)
A – Operações					
<i>Cultivo triplice (capina/adub/subsolo)</i>					
Trator de pneus de 140 cv	hora ha ⁻¹	1,00	132,88	132,88	3,6
Cultivador de 2 linhas					
<i>Aplicação conjunta de herbicida + inseticida</i>					
Trator de pneus de 100 cv	hora ha ⁻¹	0,25	110,58	27,64	0,7
Pulverizador de barras de 800 L					
<i>Controle manual das plantas daninhas</i>					
Diaristas + Encargos	hora ha ⁻¹	16	7,50	120,00	3,2
<i>Corte, carregamento e transporte</i>					
Colhedora	hora ha ⁻¹	2,00	316,84	633,69	17,1
Transbordo (trator de pneus de 180 cv + transbordo)	hora ha ⁻¹	4,00	180,27	721,07	19,5
Caminhão comboio	hora ha ⁻¹	0,255	114,54	29,21	0,8
Caminhão pipa	hora ha ⁻¹	2,00	109,40	218,79	5,9
Caminhão oficina	hora ha ⁻¹	2,00	65,17	130,35	3,5
Caminhão canavieiro Romeu e Julieta (20 km)	Mg	85,00	6,84	581,79	15,7
SUBTOTAL OPERAÇÕES (A)				2.595,42	70,1
B – Insumos					
Herbicida – Velpar K granulado	kg	2,5	39,60	99,00	2,7
Fertilizante 20-05-20	Mg	0,55	1.505,00	827,75	22,4
Inseticida – Actara	kg	1	180,00	180,00	4,9
SUBTOTAL INSUMOS (B)				1.106,75	29,9
TOTAL (A+B)				3.702,17	100

APÊNDICE C

Custo de aplicação da dose recomendada de calcário em 1 hectare de soqueira de cana-de-açúcar no norte do Paraná para a safra 2015/2016.

Componentes do custo	Unid	Qtd	Preço Unit. (R\$ ha ⁻¹)	Preço Total (R\$ ha ⁻¹)	Particip. (%)
A – Operações					
Aplicação Calcário					
Trator de pneus de 100 cv Distribuidor a lanço	hora ha ⁻¹	0,6	127,94	76,76	21,0
Carregamento Calcário					
Carregadeira com concha	hora ha ⁻¹	0,6	105,58	63,35	17,3
SUBTOTAL OPERAÇÕES (A)				140,11	38,4
B – Insumos					
Calcário Dolomítico	Mg	3	75,00	225,00	61,6
SUBTOTAL INSUMOS (B)				225,00	61,6
TOTAL (A+B)				365,11	100

APÊNDICE D

Custo de aplicação da dose recomendada de gesso em 1 hectare de soqueira de cana-de-açúcar no norte do Paraná para a safra 2015/2016.

Componentes do custo	Unid	Qtd	Preço Unit. (R\$ ha ⁻¹)	Preço Total (R\$ ha ⁻¹)	Particip. (%)
A – Operações					
Aplicação Gesso					
Trator de pneus de 100 cv Distribuidor a lanço	hora ha ⁻¹	0,6	127,94	76,76	10,7
Carregamento Calcário e Gesso					
Carregadeira com concha	hora ha ⁻¹	0,6	105,58	63,35	8,8
SUBTOTAL OPERAÇÕES (A)				140,11	19,6
B – Insumos					
Gesso agrícola	Mg	4	144,00	576,00	80,4
SUBTOTAL INSUMOS (B)				576,00	80,4
TOTAL (A+B)				716,11	100

APÊNDICE E

Custo de aplicação das doses recomendadas de calcário e gesso em 1 hectare de soqueira de cana-de-açúcar no norte do Paraná para a safra 2015/2016.

Componentes do custo	Unid	Qtd	Preço Unit. (R\$ ha ⁻¹)	Preço Total (R\$ ha ⁻¹)	Particip. (%)
A – Operações					
Aplicação Calcário					
Trator de pneus de 100 cv	hora ha ⁻¹	0,6	127,94	76,76	7,1
Distribuidor a lança					
Aplicação Gesso					
Trator de pneus de 100 cv	hora ha ⁻¹	0,6	127,94	76,76	7,1
Distribuidor a lança					
Carregamento Calcário e Gesso					
Carregadeira com concha	hora ha ⁻¹	1,2	105,58	126,69	11,7
SUBTOTAL OPERAÇÕES (A)				280,22	25,9
B – Insumos					
Calcário Dolomítico	Mg	3	75,00	225,00	20,8
Gesso agrícola	Mg	4	144,00	576,00	53,3
SUBTOTAL INSUMOS (B)				801,00	74,1
TOTAL (A+B)				1.081,22	100

APÊNDICE F

Conversão do custo de aplicação das doses de calcário e gesso em 1 hectare de soqueira de cana-de-açúcar no norte do Paraná para a safra 2015/2016 em ATR e toneladas de cana-de-açúcar.

Item	Unidade	Doses		
		C3G0	C0G4	C3G4
Custo de aplicação insumos na soqueira	R\$ ha ⁻¹	365,11	716,11	1.081,22
ATR setembro 2015	R\$ kg ⁻¹	0,4911	0,4911	0,4911
Custo aplicação e gesso em ATR	kg ha ⁻¹	743,45	1.458,17	2.201,62
ATR médio cana-de-açúcar PR safra 2014/2015	kg Mg ⁻¹	135,44	135,44	135,44
Custo da aplicação calcário e gesso	Mg ha ⁻¹	5,49	10,77	16,25