

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

MARLON RODRIGUES

Coprodutos da mineração de calcário das Formações Irati e Corumbataí como  
fontes multinutrientes avaliados por meio de sensoriamento remoto

Maringá  
2021

MARLON RODRIGUES

Coprodutos da mineração de calcário das Formações Irati e Corumbataí como fontes multinutrientes avaliados por meio de sensoriamento remoto

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni

Coorientador: Prof. Dr Everson Cezar

Maringá  
2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

R696c

Rodrigues, Marlon

Coprodutos da mineração de calcário das Formações Iratí e Corumbataí como fontes multnutrientes avaliados por meio de sensoriamento remoto / Marlon Rodrigues. -- Maringá, PR, 2021.

212 f.: il. color., figs., tabs., maps.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni.

Coorientador: Prof. Dr. Everson Cezar.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2021.

1. Calcário - Coprodutos de mineração. 2. Calcário - Índices de vegetação. 3. Calcário - Nutrientes. 4. Pós de rocha. 5. Sensoriamento remoto. I. Nanni, Marcos Rafael , orient. II. Cezar, Everson , coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Ciências Agrárias. Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDD 23.ed. 630.14

Jane Lessa Monção - CRB 9/1173

## FOLHA DE APROVAÇÃO

MARLON RODRIGUES

### Coprodutos da mineração de calcário das Formações Irati e Corumbataí como fontes multinutrientes avaliados por meio de sensoriamento remoto

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Departamento de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Agronomia pela Comissão Julgadora composta pelos membros:

#### COMISSÃO JULGADORA

---

Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni

(Presidente) Universidade Estadual de Maringá (UEM)

---

Prof. Dra. Aline Marques Genu

Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO)

---

Prof. Dr. Antonio Saraiva Muniz

Universidade Estadual de Maringá (UEM)

---

Prof. Dr. Everson Cezar

Universidade Estadual de Maringá (UEM)

---

Prof. Dr. Marcelo Augusto Batista

Universidade Estadual de Maringá (UEM)

Local de defesa: Via remota em 21/06/2021 às 08:00.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu saúde, força e o privilégio de alcançar mais uma etapa.

A meus pais e irmãos pelo apoio durante esta etapa da minha vida e pela confiança em mim depositada, sendo o meu grande alicerce.

Ao professor Marcos Rafael Nanni pela orientação, amizade, confiança e contribuição na minha formação.

Ao pesquisador Carlos Augusto Posser Silveira pela confiança, pelos ensinamentos e apoio.

A Universidade Estadual de Maringá, ao Programa de Pós-graduação em Agronomia, pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

A todos os professores do PGA/UEM, pelos ensinamentos, em especial ao Everson Cezar pela ajuda na produção bibliográfica e coorientação.

Aos funcionários da UEM pelo apoio no desenvolvimento de diversas atividades, em especial à Silvia Tanno e Roberto D'Ávila.

A Calcário Diamante, na pessoa de seu diretor-presidente, Fábio Ramos Vitti, pela disponibilização do material de estudo.

A RIDESA, na pessoa de seu pesquisador, Heroldo Webber, pelo suporte estrutural, técnico e pela confiança em mim depositada.

Aos colegas de curso e laboratório, pelas discussões, estudos, ajuda e companheirismo: Glaucio, Amanda, Renato, Karym, Roney e Anderson (*in memoriam*).

Aos demais amigos e a todos que de alguma forma contribuíram para a viabilização deste trabalho, um sincero muito obrigado.

## **EPÍGRAFE**

“Queremos ter certezas e não dúvidas,  
resultados e não experiências, mas nem  
mesmo percebemos que as certezas só podem  
surgir através das dúvidas e os resultados  
somente através das experiências.”

(CARL JUNG)

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	HIPÓTESE .....	3
3.	OBJETIVOS.....	4
3.1.	Objetivo geral .....	4
3.2.	Objetivos específicos .....	4
4.	REVISÃO DE LITERATURA .....	4
4.1.	Formação Iratí .....	4
4.2.	Formação Corumbataí.....	5
4.3.	Pós de rocha como fonte de nutrientes .....	6
4.4.	Sensoriamento remoto aplicado a agricultura.....	10
4.4.1.	Índices de vegetação.....	12
5.	MATERIAL E MÉTODOS.....	14
5.1.	Estudo I - Avaliação de coprodutos da mineração das Formações Iratí e Corumbataí incubados em duas classes de solo.....	15
5.1.1.	Caracterização química, física, mineralógica e espectral dos coprodutos.....	15
5.1.2.	Caracterização do solo e métodos de análises .....	18
5.1.3.	Delineamento experimental .....	20
5.1.4.	Procedimento experimental .....	21
5.1.5.	Análise estatística .....	22
5.2.	Estudo II – Avaliação por meio de análise química de rotina e índices de vegetação dos coprodutos da mineração das Formações Iratí e Corumbataí como fonte de nutrientes para as culturas da braquiária e soja após o período de incubação .....	23
5.2.1.	Procedimento experimental, análise espectral e química de plantas .....	24
5.2.2	Índices de vegetação.....	27
5.2.3.	Análise estatística .....	28
5.3.	Estudo III – Avaliação por meio de análise química de rotina e sensoriamento remoto de insumos fontes de K, Ca, Mg e S aplicados na cultura da cana-de-açúcar.....	28
5.3.1.	Local do experimento e classe de solo .....	29
5.3.2	Caracterização química, física, mineralógica e espectral do solo e dos insumos....	30
5.3.3.	Delineamento experimental .....	32
5.3.4.	Procedimento experimental .....	35
5.3.5.	Aquisição de imagens aéreas da cultura da cana-de-açúcar (ciclo planta).....	38

5.3.6. Processamento das imagens obtidas pelo VANT .....	41
5.3.7. Aquisição do espectro foliar da cultura da cana-de-açúcar .....	42
5.3.8. Índices de vegetação.....	43
5.3.9. Análises tecnológicas e colheita da cana-de-açúcar .....	43
5.3.10. Análise estatística .....	45
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>6.1. Estudo I - Avaliação de coprodutos da mineração das Formações Irati e Corumbataí incubados em duas classes de solo.....</b>	<b>45</b>
6.1.1. Caracterização mineralógica e espectral dos solos e coprodutos .....	45
6.1.2. Atributos químicos do solo durante o período de incubação.....	48
6.1.2.1. pH do solo .....	48
6.1.2.2. Teores de K <sup>+</sup> .....	50
6.1.2.3. Teores de Ca <sup>2+</sup> .....	52
6.1.2.4. Teores de Mg <sup>2+</sup> .....	53
6.1.2.5. Teores de S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> .....	55
6.1.2.6. Teores de P .....	57
6.1.2.7. Teores de Si.....	58
6.1.3. Discussão geral do estudo I .....	59
<b>6.2. Estudo II - Avaliação por meio de análise química de rotina e índices de vegetação dos coprodutos da mineração das Formações Irati e Corumbataí como fonte de nutrientes para as culturas da braquiária e soja após o período de incubação .....</b>	<b>60</b>
6.2.1. Produção de massa seca da parte aérea do primeiro cultivo da brachiária e seus acúmulos e teores de macro e micronutrientes .....	60
6.2.2. Índices de vegetação do primeiro corte da brachiária .....	70
6.2.3. Produção de massa seca da parte aérea do segundo cultivo da brachiária e seus acúmulos e teores de macro e micronutrientes .....	73
6.2.4. Índices de vegetação do segundo cultivo da brachiária.....	83
6.2.5. Atributos químicos do solo após dois cultivos da brachiária .....	85
6.2.6. Produção de massa seca da parte aérea da soja e seus acúmulos e teores de macro e micronutrientes .....	89
6.2.7. Índices de vegetação da soja.....	99
6.2.8. Discussão geral do estudo II.....	101

6.3. Estudo III - Avaliação por meio de análise química de rotina e sensoriamento remoto de insumos fontes de K, Ca, Mg e S aplicados na cultura da cana-de-açúcar .....	102
6.3.1. Caracterização mineralógica e espectral dos insumos.....	102
6.3.2. Atributos químicos do solo.....	105
6.3.3. Produtividade da cana-de-açúcar planta e seus acúmulos e teores de macro e micronutrientes das folhas .....	114
6.3.4. Parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar planta .....	121
6.3.5. Índices de vegetação da cana-de-açúcar planta coletados pelo espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR .....	124
6.3.6. Índices de vegetação e temperatura do dossel da cana-de-açúcar planta coletados por sensore multiespectrais embarcados em VANT.....	127
6.3.7. Produtividade e acúmulo de nutrientes pela cana-de-açúcar (soca) .....	133
6.3.8. Discussão geral do estudo III.....	137
6.4. Considerações finais .....	138
7. CONCLUSÕES .....	139
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	141
9. APÊNDICES .....	180

## **Índice de figuras**

Figura 1. Mapa do Brasil (a), estado de São Paulo (b), perfil estratigráfico para coleta de coprodutos (c) e afloramento das Formações Corumbataí (FC) e Iratí (FI) próximo ao município de Tietê-SP/Brasil (d).....	14
Figura 2. Fluxograma do processo metodológico utilizado no estudo I.....	15
Figura 3. Coleta de dados espectrais da placa padrão <i>Spectralon</i> (a) e dos coprodutos dispostos na placa de Petri (b). .....	18
Figura 4. Incorporação dos insumos (a) e vasos envoltos por sacos plásticos (b). .....	22
Figura 5. Amostragem do solo com trado rosca (a) e disposição dos vasos na casa de vegetação (b). .....	22
Figura 6. Fluxograma do processo metodológico utilizado no estudo II. ....	23
Figura 7. Desenvolvimento do 1º cultivo da brachiária (a-b), coleta de dados espectrais (c) e corte da brachiária (d).....	24
Figura 8. Desenvolvimento do 2º cultivo da brachiária (a-b).....	26
Figura 9. Aplicação fertilizantes PK (a), semeadura (b), desenvolvimento da soja (c) e leitura espectral da face adaxial de folhas da soja (d).....	27
Figura 10. Fluxograma do processo metodológico utilizado no estudo III. ....	29
Figura 11. Localização da área experimental. ....	30
Figura 12. Croqui da área experimental com as parcelas e as subparcelas divididas pelo tracejado.....	34
Figura 13. Aplicação do calcário (a), incorporação (b), sulcamento (c), e aplicação dos demais insumos (d).....	35
Figura 14. Mudas pré-brotadas (a) e plantio das mudas (b). .....	36
Figura 15. Croqui da parcela experimental dividida (área em marrom) em subparcela; asteriscos referentes a disposição das plantas na parcela.....	37
Figura 16. Amostragem foliar (a), sistema de numeração de folhas da cana-de-açúcar estabelecido por Kuijper (b) (Casagrande, 1991), controle fitossanitário (c) e condição de desenvolvimento pré-colheita da cultura (d). .....	38
Figura 17. Câmera fotográfica multiespectral Fujifilm S200 EXR (a), Sensor Super CCD EXR (b), lentes IR Filter 760 (c) e UV-IR CUT (d).....	39
Figura 18. Placas de calibração (a) e coleta de imagens pelo VANT (b). .....	40
Figura 19. VANT com as câmeras com filtro RGB e NIR.....	41

Figura 20. Fieldspiec 3 Jr. (a), coleta de dados de campo (b) e acessório <i>ASD Plant Probe</i> (c).	43
Figura 21. Difratometria de raio-X do LVdf (a), RQo (b), ritmito (c), folhelho (d) e siltito argiloso (e).....	46
Figura 22. Caracterização espectral dos solos e coprodutos avaliados.....	48
Figura 23. Produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S na parte aérea do primeiro cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.....	64
Figura 24. Acúmulo de Cu, Fe, Mn e Zn pela parte aérea do primeiro cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.....	66
Figura 25. Fertigrama com os teores médios de nutrientes da parte aérea do primeiro cultivo da brachiária cultivada no LVdf e RQo com seus respectivos níveis de suficiência (folha recém expandida) para os tratamentos: .....	70
Figura 26. Desenvolvimento vegetativo do primeiro cultivo da brachiária (30 DAS) submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.....	70
Figura 27. Produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S na parte aérea do segundo cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.....	76
Figura 28. Produção de massa verde da parte aérea do 2º cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração no LVdf (a) e RQo (b). ....	78
Figura 29. Acúmulo de Cu, Fe, Mn e Zn pela parte aérea do segundo cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. ....	79
Figura 30. Fertigrama com os teores médios de nutrientes da parte aérea do segundo cultivo da brachiária cultivada no LVdf e RQo com seus respectivos níveis de suficiência (folha recém expandida) para os tratamentos: .....	83
Figura 31. Desenvolvimento vegetativo do segundo cultivo da brachiária (21 dias após o 1º corte) submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.....	83
Figura 32. Produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S na parte aérea da soja submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. ....	91
Figura 33. Acúmulo de Cu, Fe, Mn e Zn pela parte aérea da soja submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. ....	95

Figura 34. Fertograma com os teores médios de nutrientes da soja cultivada no LVdf e RQo com seus respectivos níveis de suficiência para os tratamentos: T1 (a-b), T2 (c-d), T3 (e-f), T4 (g-h), T5 (i-j), T6 (k-l) e T7 (m-n). ....	98
Figura 35. Desenvolvimento vegetativo da soja cultivada após a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. Estádio V6.....	99
Figura 36. Difratometria de raios-X dos pós de rocha utilizados no trabalho;.....	103
Figura 37. Fator de reflectância dos pós de rocha utilizados no estudo.....	104
Figura 38. Precipitação acumulada após 425 dias de cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta). ....	114
Figura 39. Acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S nas folhas de cana-de-açúcar aos 210 DAP e produtividade de colmo aos 425 DAP após a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K. ....	117
Figura 40. Acúmulo de Cu, Fe, Mn e Zn nas folhas de cana-de-açúcar aos 210 DAP e após a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K. ....	118
Figura 41. Fertograma com os teores médios de nutrientes da cana-de-açúcar (ciclo planta) cultivada nas subparcelas fonolito e siltito argiloso com seus respectivos níveis de suficiência para as parcelas: testemunha (a-b), calcário (c-d), ritmito (e-f), calcário + ritmito (g-h), calcário + gesso (i-j), calcário + fidagran (k-l). ....	121
Figura 42. GNDVI coletado por VANT da cana-de-açúcar aos 57 (a), 120 (b), 150 (c), 210 (d), 254 (e), 300 (f), 354 (g) e 423 DAP (h).....	131
Figura 43. Temperatura do dossel da cana-de-açúcar coletada por sensor acoplado em VANT aos 354 DAP.....	133
Figura 44. Acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S nas folhas de cana-de-açúcar soca aos 210 DAR e nº de perfis e produtividade de colmo aos 364 DAR após a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K. ....	136
Figura 45. Acúmulo de Cu, Fe, Mn e Zn nas folhas de cana-de-açúcar aos 210 DAR após a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K. ....	137

## Índice de tabelas

Tabela 1. Teores de CaO, MgO, K <sub>2</sub> O e S de insumos coletados no processo de mineração de calcário utilizados no estudo I .....	16
Tabela 2 Distribuição granulométrica dos coprodutos utilizados no estudo I.....	16
Tabela 3. Teor de argila e atributos químicos da camada arável (0-20 cm) de um Latossolo Vermelho Distroférrego (LVdf) e um Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) utilizados no estudo I .....	19
Tabela 4. Descrição dos tratamentos com as quantidades aplicadas de K <sub>2</sub> O, CaO, MgO e S.	21
Tabela 5. Teores de CaO, MgO, K <sub>2</sub> O e S dos insumos utilizados no estudo III.....	31
Tabela 6. Distribuição granulométrica, reatividade (RE), poder de neutralização (PN) e poder relativo de neutralização total (PRNT) de insumos utilizados no estudo III.....	31
Tabela 7. Teor de argila e atributos químicos da camada arável (0-20 cm) de um Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) utilizado no estudo III.....	32
Tabela 8. Fatores de tratamento e doses aplicadas das fontes de Ca, Mg, S e K .....	33
Tabela 9. Valores médios do pH em água do solo após 21, 60, 90 e 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. ....	50
Tabela 10. Teores médios de K <sup>+</sup> do solo após 21, 60, 90 e 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. ....	51
Tabela 11. Teores médios de Ca <sup>2+</sup> do solo após 21, 60, 90 e 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. ....	53
Tabela 12. Teores médios de Mg <sup>2+</sup> do solo após 21, 60, 90 e 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. ....	54
Tabela 13. Teores médios de S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> do solo após 21, 60, 90 e 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. ....	57
Tabela 14. Teores médios de P do solo após 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. ....	58
Tabela 15. Teores médios de Si solúvel do solo após 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.....	59
Tabela 16. Valores médios de IV's de folhas da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. ....	72
Tabela 17. Valores médios de IV's de folhas da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. ....	85

Tabela 18. Valores médios de pH e teores de K <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> e S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> após o cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração.....	88
Tabela 19. Valores médios de IV's de folhas de soja submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.....	100
Tabela 20. Valor de F e coeficiente de variação (CV) de atributos químicos do solo em duas profundidades aos 425 DAP para as fontes de variação parcela e subpacela.....	105
Tabela 21. Valores médios de atributos químicos do solo em duas profundidades aos 425 DAP da cultura da cana-de-açúcar submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K. ..	110
Tabela 22. Valor de F e coeficiente de variação (CV) para os teores de Si, Cu, Fe, Mn e Zn do solo em duas profundidades aos 425 DAP para as fontes de variação parcela e subpacela...	111
Tabela 23. Valores médios de Si, Cu, Fe, Mn e Zn do solo em duas profundidades aos 425 DAP da cultura da cana-de-açúcar submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K. ..	113
Tabela 24. Parâmetros tecnológicos aos 425 DAP da cultura da cana-de-açúcar planta submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K. ....	123
Tabela 25. Valores médios do GNDVI coletado pelo espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR ao longo do cultivo da cana-de-açúcar planta. ....	126
Tabela 26. Valores médios do GNDVI obtidos por sensores multiespectrais embarcados em VANT ao longo do cultivo da cana-de-açúcar. ....	129
Tabela 27. Valores médios da temperatura do dossel da cana-de-açúcar submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K.....	132
Tabela 28. Valores médios do NDVI coletado pelo espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).....	180
Tabela 29. Valores médios do GNIR coletado pelo espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).....	181
Tabela 30. Valores médios do RNIR coletado pelo espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).....	182
Tabela 31. Valores médios do RVI coletado pelo espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).....	183
Tabela 32. Valores médios do GRVI coletado pelo espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).....	184
Tabela 33. Valores médios do NDVI obtidos por sensores multiespectrais embarcados em VANT ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).....	185

Tabela 34. Valores médios do GNIR obtidos por sensores multiespectrais embarcados em VANT ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).....	186
Tabela 35. Valores médios do RNIR obtidos por sensores multiespectrais embarcados em VANT ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).....	187
Tabela 36. Valores médios do RVI obtidos por sensores multiespectrais embarcados em VANT ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).....	188
Tabela 37. Valores médios do GRVI obtidos por sensores multiespectrais embarcados em VANT ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).....	189
Tabela 38. Parâmetros tecnológicos aos 364 DAR da cultura da cana-de-açúcar (ciclo soca) submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K. ....	190
Tabela 39. Valores médios de atributos químicos do solo na profundidade 0-20 cm 364 DAR da cultura da cana-de-açúcar (ciclo soca) submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K. ....	191
Tabela 40. Valores médios de atributos químicos do solo na profundidade 20-40 cm 364 DAR da cultura da cana-de-açúcar (ciclo soca) submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K. ....	192

## RESUMO

RODRIGUES, M. Universidade Estadual de Maringá (UEM), junho de 2021, **Coprodutos da mineração de calcário das formações Irati e Corumbataí como fontes multinutrientes avaliados por meio de sensoriamento remoto.** Orientador: Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni; Co-orientador: Prof. Everson Cezar.

O uso de fontes alternativas de nutrientes, como pós de rocha e coprodutos de mineração, é uma prática que tem sido cada vez mais utilizada nos últimos anos com o objetivo de reduzir a necessidade de importação de fertilizantes solúveis. Para avaliar os coprodutos da mineração, técnicas alternativas, como o uso do sensoriamento remoto por meio de índices de vegetação, poderiam reduzir consideravelmente o custo das análises de fertilidade do solo e nutrição de plantas, permitindo maior aproveitamento desses insumos. Desse modo, o presente trabalho foi dividido em três estudos que tiveram como objetivo geral avaliar o potencial de uso dos coprodutos da mineração de calcário oriundos das Formações Irati e Corumbataí como fontes de nutrientes e o sensoriamento remoto como forma de avaliá-los. O estudo I foi constituído por um experimento em vasos dispostos em casa de vegetação. Os tratamentos foram conduzidos no delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial duplo ( $7 \times 2$ ) com dez repetições. Os fatores avaliados foram tipos de coprodutos e as classes de solo (Latossolo e Neossolo). Ao longo do período de incubação foram avaliados o pH,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $S-SO_4^{2-}$  aos 21, 60, 90 e 140 dias após a aplicação dos insumos e P e Si na última data avaliada. No estudo I, a aplicação dos coprodutos, em geral, aumentou o pH e o conteúdo dos íons disponíveis:  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ , P,  $S-SO_4^{2-}$  e Si. Como destaque, aos 140 dias, o ritmito foi o coproduto mais eficiente no aumento do pH,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , com aumento de 23%, 241% e 722% no Neossolo, respectivamente. Na mesma data, o folhelho betuminoso aumentou o conteúdo de  $SO_4^{2-}$  em 72 e 427% no Latossolo e no Neossolo, respectivamente. Em conclusão ao estudo I, a aplicação de coprodutos de mineração alterou os atributos químicos do solo, o que demonstra o potencial desses insumos como uma solução ambiental limpa para a fertilização do solo. O estudo II foi uma continuação do estudo I, em que foram aplicados fertilizantes NPK nos vasos e cultivados dois ciclos da brachiária e um ciclo da soja. Após a colheita das culturas foram avaliados os teores de macro e micronutrientes no tecido das plantas. Anterior à colheita, foram determinados índices de vegetação (IV) com o auxílio de um espectroradiômetro, como forma complementar de avaliação dos coprodutos. No estudo II, o acúmulo de K, Ca, Mg e S, bem

como a produção de massa seca da parte aérea da braquiária aumentou com a aplicação dos coprodutos. Para a soja, a aplicação dos coprodutos aumentou a produção de massa seca da parte aérea e os acúmulos de N, P, Ca, Mg, S e Fe nas plantas cultivadas no Neossolo e S e Fe nas plantas cultivadas no Latossolo. Quanto aos IV, notou-se que o GNDVI foi o mais eficiente em diferenciar os tratamentos, relacionando-o com aspectos nutricionais, especialmente para os dois cultivos da brachiária. Em conclusão do estudo II, a aplicação de coprodutos de mineração possibilitou aporte de nutrientes pelas plantas cultivadas após o período de incubação (estudo I), o que favoreceu a produção de massa seca da parte aérea de ambas as culturas analisadas, tendo os IV, em especial o GNDVI, potencial de distinguir os tratamentos e relacionar-se com aspectos nutricionais das plantas. O estudo III foi conduzido em condições de campo, em Paranavaí-PR, e buscou comparar os coprodutos da mineração, fontes predominantemente de K, Ca, Mg e S, com outras fontes tradicionais desses nutrientes para o cultivo da cana-de-açúcar. Após 7 meses de cultivo, foram coletadas folhas para a determinação dos macros e micronutrientes e, após 14 meses, a cana-de-açúcar foi colhida e a produção de colmo foi avaliada. Durante a condução do experimento foram determinados IV com sensores embarcados em VANT e espectroradiômetro terrestre. Posteriormente à colheita, foram coletadas amostras de solos em duas profundidades para a determinação de macro e micronutrientes no solo. De acordo com os resultados, na maioria das situações, os materiais avaliados aumentaram o pH do solo e os coprodutos derivados da Formação Irati (ritmito) contribuíram para aumento de  $\text{Ca}^{2+}$  (+89%) e  $\text{Mg}^{2+}$  (+307%) em ambas as profundidades avaliadas e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  (+63%) na profundidade de 20-40 cm. Na maioria dos casos, o fonolito foi mais eficiente do que o siltito argiloso no fornecimento de  $\text{K}^+$  ao solo. Os coprodutos aplicados, em geral, permitiram maior acúmulo de K, Mg e S pelas plantas. Através do uso de IV's, como o GNDVI coletado por espectroradiômetro e VANT, foi possível diferenciar, em determinadas datas de avaliação, as variações advindas da condição nutricional das plantas, já que houve diferenças entre os tratamentos para esse IV. Os resultados do estudo III demonstram que os coprodutos da mineração das Formações Irati e Corumbataí podem ser utilizados como fontes alternativas e limpas de nutrientes, aumentando os teores de íons disponíveis no solo e o acúmulo de nutrientes pelas plantas. Ademais, os IV avaliados possibilitaram a distinção entre os tratamentos e relacionaram-se com aspectos nutricionais da cana, o que possibilita utilizá-los como ferramenta adicional de manejo da cultura.

**Palavras-chave:** coprodutos de mineração; índices de vegetação; nutrientes; pós de rocha; sustentabilidade; sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

RODRIGUES, M. Universidade Estadual de Maringá (UEM), junho de 2021, **Coproducts from limestone mining of the Irati and Corumbataí Formations as multinutrients sources evaluated by remote sensing.** Orientador: Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni; Co-orientador: Prof. Everson Cezar.

The use of alternative sources of nutrients, such as rock powders and mining coproducts, is a practice that has been increasingly applied in recent years with the aim of reducing the necessity to import soluble fertilizers. To evaluate mining coproducts, alternative techniques, such as the use of remote sensing through the vegetation indices, could considerably reduce the cost of soil fertility and plant nutrition analyzes, allowing for greater use of these inputs. Thus, the present work was divided into three studies that had the general objective of evaluating the potential use of limestone mining coproducts from the Irati and Corumbataí Formations as sources of nutrients and remote sensing as a way of evaluating them. Study I consisted of an experiment in pots arranged in a greenhouse. The treatments were conducted in a double factorial scheme (7 x 2) completely randomized with ten replications. The evaluated factors were the type of coproduct and the soil class (Latosol and Neossol). During the incubation period, pH, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> and S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> were evaluated at 21, 60, 90 and 140 days after the application of the inputs and P and Si on the last evaluated date. In study I, the application of the coproducts, in general, increased the pH and the content of the available ions: K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, P, S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and Si. As a highlight, at 140 days, the rhythmite was the most efficient coproduct in the increase in pH, Ca<sup>2+</sup> and Mg<sup>2+</sup>, with an increase of 23%, 241% and 722% in the Neossolo, respectively. On the same date, the bituminous shale increased the content of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> by 72 and 427% in the Latosol and the Neossol, respectively. In conclusion to study I, the application of mining coproducts changed the chemical attributes of the soil, which demonstrates the potential of these inputs as a clean environmental solution for soil fertilization. Study II was a continuation of study I, in which NPK fertilizers were applied to the pots and two brachiaria cycles and one soybean cycle were grown. After harvesting the cultures, the contents of macro and micronutrients in the plant tissue were evaluated. Before the harvest, vegetation indexes (IV) were determined with the aid of a spectroradiometer, as a complementary way of evaluating the coproducts. In study II, the accumulation of K, Ca, Mg and S, as well as the production of dry mass in the aerial part of the brachiaria increased with the application of the coproducts. For soybeans, the application of

coproducts increased the dry matter production of the aerial part and the accumulations of N, P, Ca, Mg, S and Fe in the plants grown in the Neossol and S and Fe in the plants grown in the Latosol. As for IV, it was noted that GNDVI was the most efficient in differentiating treatments, relating it to nutritional aspects, especially for the two crops of the brachiaria. In conclusion of study II, the application of mining coproducts allowed nutrient input by plants grown after the incubation period (study I), which favored the production of dry mass from the aerial part of both analyzed crops, with IV, in especially the GNDVI, the potential to distinguish treatments and relate to nutritional aspects of plants. Study III was conducted under field conditions, in Paranavaí-PR, and sought to compare mining coproducts, which are predominantly sources of K, Ca, Mg and S, with other traditional sources of these nutrients for the cultivation of sugarcane. After 7 months of cultivation, leaves were collected to determine macros and micronutrients and, after 14 months, sugarcane was harvested and stem production was evaluated. During the conduct of the experiment, IV was determined with sensors embedded in UAV and terrestrial spectroradiometer. After the harvest, soil samples were collected in two depths for the determination of macro and micronutrients in the soil. According to the results, in most situations, the evaluated materials increased the pH of the soil and the coproducts derived from the Irati Formation (rhythmite) contributed to an increase in  $\text{Ca}^{2+}$  (+ 89%) and  $\text{Mg}^{2+}$  (+ 307%) in both depths evaluated and  $\text{S-SO}_4^{2-}$  (+ 63%) at a depth of 20-40 cm. In most cases, phonolite was more efficient than clay siltstone in providing  $\text{K}^+$  to the soil. The applied coproducts, in general, allowed a greater accumulation of K, Mg and S by the plants. Through the use of IV's, such as GNDVI collected by spectroradiometer and UAV, it was possible to differentiate, on certain evaluation dates, variations arising from the nutritional condition of plants, since there were differences between treatments for this IV. The results of study III demonstrate that the mining coproducts of the Irati and Corumbataí Formations can be used as alternative and clean sources of nutrients, increasing the levels of ions available in the soil and the accumulation of nutrients by plants. In addition, the IV evaluated allowed the distinction between treatments and related to nutritional aspects of sugarcane, which makes it possible to use them as an additional tool for crop management.

**Keywords:** mining coproducts; vegetation indexes; nutrients; rock powders; sustainability; remote sensing.

## **Lista de siglas**

<i>ANOVA</i>	- <i>Análise de variância</i>
<i>AR</i>	- <i>Açúcares Redutores</i>
<i>ATR</i>	- <i>Açúcares Totais Recuperáveis</i>
<i>CCD</i>	- <i>Couple Charge Device</i>
<i>CMOS</i>	- <i>Complementary Metal Oxide Semicondutor</i>
<i>CQFS-RS/SC</i>	- <i>Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina</i>
<i>DAA</i>	- <i>Dias após a Aplicação dos Insumos</i>
<i>DAP</i>	- <i>Dias após Plantio das Mudas</i>
<i>DAS</i>	- <i>Dias após a Semeadura</i>
<i>DRX</i>	- <i>Difratometria de Raio X</i>
<i>EMBRAPA</i>	- <i>Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária</i>
<i>FC</i>	- <i>Formação Corumbataí</i>
<i>FI</i>	- <i>Formação Irati</i>
<i>FP</i>	- <i>Folhelho Pirobetuminoso</i>
<i>GNDVI</i>	- <i>Índice de Vegetação da Diferença de Verde Normalizado</i>
<i>GNIR</i>	- <i>Razão entre o Verde e o Infravermelho Próximo</i>
<i>GRVI</i>	- <i>Razão entre Infravermelho Próximo e o Verde</i>
<i>IV's</i>	- <i>Índices de Vegetação</i>
<i>IN</i>	- <i>Instrução Normativa</i>
<i>ISO</i>	- <i>International Standards Organization</i>
<i>LCD</i>	- <i>Liquid Crystal Display</i>
<i>LVdf</i>	- <i>LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico</i>
<i>MPB</i>	- <i>Mudas pré-brotadas</i>
<i>ND</i>	- <i>Número Digital</i>
<i>NDVI</i>	- <i>Índice de Vegetação da Diferença Normalizado</i>
<i>NIR</i>	- <i>Infravermelho próximo</i>
<i>NPK</i>	- <i>Nitrogênio, Fósforo e Potássio</i>
<i>OSD</i>	- <i>On Screen Data</i>
<i>PCC</i>	- <i>Porcentagem de Açúcar Aparente</i>
<i>PN</i>	- <i>Poder de Neutralização</i>
<i>PRNT</i>	- <i>Poder Relativo de Neutralização Total</i>

<i>PZA</i>	- <i>Pureza do Caldo</i>
<i>RAW</i>	- <i>Formato ‘cru’ da imagem</i>
<i>RE</i>	- <i>Reatividade</i>
<i>REM</i>	- <i>Radiação Eletromagnética</i>
<i>RGB</i>	- <i>Vermelho, Verde, Azul</i>
<i>RM</i>	- <i>Remineralizador</i>
<i>ROI</i>	- <i>Region Of Interest</i>
<i>RNIR</i>	- <i>Razão entre o Vermelho e o Infravermelho Próximo</i>
<i>RQo</i>	- <i>NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico</i>
<i>RVI</i>	- <i>Razão entre o Infravermelho Próximo e Vermelho</i>
<i>SA</i>	- <i>Siltito argiloso</i>
<i>SBCS</i>	- <i>Sistema Brasileiro de Classificação de Solos</i>
<i>SMP</i>	- <i>Shoemaker, Mac lean e Pratt</i>
<i>SWIR</i>	- <i>Short Wave Infrared</i>
<i>TIFF</i>	- <i>Tagged Image File Format</i>
<i>UV</i>	- <i>Ultravioleta</i>
<i>VANT</i>	- <i>Veículo Aéreo Não Tripulado</i>
<i>VIS</i>	- <i>Visível</i>

## **1. INTRODUÇÃO**

Em 2050, a população mundial atingirá 9,8 bilhões de pessoas (NATIONS, 2017).

Para alimentar essa população, a fertilidade do solo terá de ser mantida por meio da adição de insumos fertilizantes, ou seja, de forma artificial. Nas condições do Brasil, que apresenta nas regiões tropicais e subtropicais solos altamente intemperizados, ácidos, pobres em nutrientes e com níveis de Al considerados tóxicos para as plantas (BUOL, 2009; CUNHA; FONTES; LANI, 2019), a correção do pH e fertilidade do solo é necessária e realizada majoritariamente por meio de corretivos de acidez e fertilizantes solúveis importados, respectivamente. Como exemplo, aproximadamente 95% do nutriente K vem da matéria-prima importada principalmente do Canadá e da Rússia (ADUBOS, 2019). Ou seja, buscar fontes alternativas nacionais de nutrientes é essencial para diminuir custos e garantir a soberania alimentar do país. Dentre essas fontes, destacam-se os pós de rocha, remineralizadores e coprodutos ou subprodutos da mineração.

Sabe-se que a exploração de minério é uma atividade indispensável para a economia do país e configura a base da cadeia produtiva, já que os produtos gerados pelas mineradoras estão presentes no cotidiano da sociedade de maneira expressiva e praticamente substancial (HEMPE, 2013). Contudo, essa exploração de recurso natural pode causar impactos ambientais tanto na área minerada, como também nas áreas próximas. Na água altera sua qualidade com a deposição de resíduos, contaminação do lençol freático e assoreamento dos cursos d’água. No solo causa destruição direta com a retirada da cobertura vegetal e consequente erosão. A perfuração da rocha junto à detonação de explosivos prejudica a qualidade do ar. Fauna e flora também são comprometidas com a modificação do habitat faunístico (TONETTO; SILVA, 2011).

Os resíduos do processo de extração do calcário são rochas fragmentadas de diferentes granulometrias que, normalmente, são descartadas em aterros ou depositados no meio ambiente, sem qualquer processo de tratamento. As mineradoras que realizam suas atividades em minas a céu aberto, descarregam esse minério em britadores primários, que alimentam as usinas de beneficiamento ou pilhas de homogeneização e o resíduo é descarregado nas pilhas de estocagem (RODRIGUES; PINTO, 2012). No presente trabalho, a mineradora avaliada explora o calcário que está a aproximadamente 15 m de profundidade. Acima disso, encontra-se coprodutos das Formações Irati e Corumbataí, que devem ser retirados para a lavra do banco de calcário.

Segundo Silva; Viana; Cavalcante, (2012) aproximadamente 200 milhões de toneladas de resíduos de mineração de calcário serão produzidas de 2020 até 2030 no Brasil. De acordo com Barbieri (2017), a solução ou minimização dos impactos ambientais que envolvem a mineração, se dá por uma nova atitude de gestão, que deve considerar o meio ambiente em suas decisões, além de processos que auxiliem no aproveitamento dos resíduos para promover a sustentabilidade do ambiental local. Segundo Rodrigues (2017), quando a rocha fragmentada é considerada um resíduo, seu acúmulo pode constituir um passivo ambiental. Já quando é considerado um coproducto capaz de gerar lucros e vantagens, seu reaproveitamento pode proporcionar inúmeros benefícios ao setor da mineração. No mesmo sentido, da Rocha et al. (2013) afirmam que coprodutos que apresentam minerais que se solubilizam e liberam nutrientes, possuem potencial para uso agrícola.

O uso de fontes alternativas de nutrientes, como pós de rocha e coprodutos de mineração é uma prática milenar que tem sido cada vez mais aplicada nos últimos anos com o objetivo de reduzir a necessidade de importação de fertilizantes solúveis, muitas vezes caros e de baixo efeito residual no solo (TOSCANI; CAMPOS, 2017). Além disso, a aplicação desse tipo de produto em combinação com fertilizantes solúveis permite aumento na eficiência destes (LEÃO et al., 2014; RANZAN, 2014). No Brasil, existem várias reservas de minerais que são fontes de K (DE TOLEDO PIZA et al., 2011; DUARTE et al., 2013), Ca, Mg (CASTRO; CRUSCIOL, 2015; GUELFI-SILVA et al., 2013) e S (BROCH et al., 2011; LUCHETA; LAMBAIS, 2012), que podem ser utilizados como insumos fonte de nutrientes para as culturas.

Porém, mesmo que seu uso seja uma boa alternativa em substituição ao uso de fertilizantes solúveis, as mudanças nos atributos do solo e da planta com a aplicação de pós de rocha ao longo do tempo têm sido estudadas e determinadas por meio de análises químicas de rotina, que, em muitos casos, são inviáveis devido ao alto custo e tempo gasto para realizá-los (RODRIGUES et al., 2020). Portanto, o desenvolvimento de novas tecnologias para determinação de atributos químicos do solo e da planta alterados pelo uso de insumos alternativos poderia reduzir consideravelmente o custo das análises de fertilidade do solo e nutrição de plantas, permitindo maior aproveitamento desses insumos. Dentro dessas tecnologias, destacam-se os métodos de análise que utilizam o princípio do sensoriamento remoto (SR). O princípio básico do SR é a utilização de sensores para obtenção de dados sobre um objeto sem que ocorra contato físico entre o sensor e o objeto de estudo (ex: solo e/ou planta). Para que tal fenômeno aconteça é necessário que a energia seja transmitida sob a forma de radiação eletromagnética (REM) (NANNI; DEMATTÉ, 2006). Assim, a utilização de

sensores permite obter informações sobre os atributos físicos e químicos dos materiais presentes na superfície coletada, como os solos e as plantas (JENSEN; EPIPHANIO, 2009).

Dentre as vantagens do uso do sensoriamento remoto estão: preparo mínimo das amostras, análises rápidas, determinação simultânea de constituintes do solo, análise não destrutiva da amostra e a não utilização de reagente químicos tóxicos ao meio ambiente (NANNI; DEMATTÊ, 2006). Assim, o uso do sensoriamento remoto é um importante instrumento em estudos relacionados à mineração e agricultura e, em particular, na caracterização, mapeamento de solos e monitoramento do ciclo produtivo das culturas agrícolas. Esse monitoramento pode auxiliar de forma mais eficaz a tomada de decisão do produtor quanto ao uso de fertilizantes, o que permite uso racional de insumos e aumento do potencial produtivo das culturas.

A utilização do SR possibilita ainda a obtenção de dados espectrais sobre a planta, os quais, podem ser convertidos em diversos tipos de índices de vegetação (IV's) que realçam as particularidades de uma vegetação sadia, que apresenta baixa e alta reflectância no visível e infravermelho próximo, respectivamente. Além disso, os IV's buscam normalizar os efeitos de iluminação, condições atmosféricas e as condições de substratos, vegetação e topografia, o que permite avaliações espaciais e temporais do ciclo da cultura (JENSEN; EPIPHANIO, 2009).

Diante disso, a utilização do SR como ferramenta para o estudo dos coprodutos da mineração como fontes de nutrientes, fornece valiosas informações no manejo desses insumos e, com isso, é possível incrementar a produtividade de culturas em solos com deficiência nutricional. Assim, o trabalho foi subdividido em três estudos visando elucidar, por meio de análise químicas de rotina e através do sensoriamento remoto, o comportamento do solo e das plantas após a aplicação de coprodutos da mineração de calcário das Formações Irati e Corumbataí.

## 2. HIPÓTESE

Os coprodutos do processo de extração do calcário em Tietê – SP, oriundos das Formações Irati e Corumbataí disponibilizam nutrientes ao solo, favorecendo a absorção desses nutrientes bem como a produtividade da brachiária, soja e cana-de-açúcar.

A variação na reflectância das plantas pela disponibilização de nutrientes permite a utilização de índices de vegetação que diferenciam os tratamentos e se relacionam com o acúmulo de nutrientes nas plantas e a sua produtividade.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo geral**

Estudar o potencial de uso dos coprodutos da mineração de calcário oriundos das Formações Iratí e Corumbataí como fontes de nutrientes e o sensoriamento remoto como forma de avaliá-los.

#### **3.2. Objetivos específicos**

Avaliar os coprodutos como fontes multinutrientes por meio de análise química de rotina do solo e da planta.

Avaliar o efeito da aplicação dos coprodutos na produtividade e no acúmulo de nutrientes pela brachiária, soja e cana-de-açúcar.

Utilizar os índices de vegetação como ferramenta de distinção entre os tratamentos, relacionando-os com os teores de macro e micronutrientes no solo e na planta, bem como a produtividade da brachiária, soja e cana-de-açúcar.

### **4. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **4.1. Formação Iratí**

A Formação Iratí a várias décadas desperta interesse econômico e científico. Essa Formação apresenta litofácies bastante singulares como evaporitos e a alternância de calcários dolomíticos e folhelhos pirobetuminosos, chamados de ritmitos (LAGES, 2004). Destaca-se também pela presença de mesossaurídeos (répteis aquáticos primitivos), os quais permitem realizar correlações estratigráficas com unidades eopermianas do sul da África que foram originadas há 250 milhões de anos (ZALÁN et al., 1986).

Essa Formação ocupa uma área de 1 milhão de km<sup>2</sup>, abrangendo, no Brasil, os estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, além de parte do Paraguai, Uruguai e Argentina. Possui a forma aproximada de um anzol alongado na direção norte-nordeste, com aproximadamente 1700 km de comprimento e 1000 km de largura (HACHIRO, 1997).

Cronoestratigraficamente, essa Formação está situada no Permiano Superior e registra o máximo da inundação no final do Paleozoico da Bacia do Paraná (MILANI; FRANÇA; MEDEIROS, 2007), que é uma bacia policíclica, ou seja, formada por mais de um ciclo de sedimentação (FÚLFARO, 1972). No contexto do preenchimento sedimentar da Bacia do

Paraná, está compreendida na Seqüência Gondwana I (Neocarbonífero – Eotriássico), constituindo a base do grupo Passa Dois no Permiano (Neo-artinskiano) (SANTOS et al., 2006).

A Formação Irati faz parte da unidade basal do Grupo Passa Dois, que se divide nos membros: Taquaral (inferior) e Assistência (Superior), sendo este último objeto deste estudo. No Membro Taquaral ocorrem folhelhos com rochas carbonáticas e silexíticas subordinadas, depositados em ambiente marinho de águas calmas, abaixo do nível de ação das ondas, em condições de fundo periodicamente anóxico (HACHIRO, 1996). O Membro Assistência é caracterizado por uma sequência superior composta por folhelhos pirobetuminosos intercalados com horizontes de calcários dolomíticos (ritmitos), depositada em ambientes marinhos de água rasas (ARAÚJO, 2001). Do Amaral (1971), ao caracterizar a uniformidade litológica lateral da Formação Irati, observou camadas rítmicas de folhelhos pretos e calcários dolomíticos. Na petrografia, o mesmo autor descreveu os calcários com textura constante, sem orientação cristalina, quase sempre maciça e com predominância de dolomita à calcita.

A espessura média da Formação Irati é de aproximadamente 25 metros, sendo que em muitas localidades não ultrapassa 10 metros, enquanto que em outras localidades pode atingir de 30 a 35 metros (MENDES; PETRI, 1971). O calcário explorado da Formação Irati tem grande importância para a economia do Brasil. Contudo, como em outros casos de minerações, há grande produção de subprodutos. A proporção minério : subprodutos, em algumas jazidas, chega a 1 : 13 (SOUZA, 1999). Nesse sentido, pesquisas vêm sendo realizadas com o objetivo de aproveitamento dos minerais presentes nesses resíduos (MARTINS et al., 2010; RODRIGUES, 2017). Segundo Santos; Matai (2010), o folhelho pirobetuminoso da Formação Irati, que é explorado pela Petrobrás para extração de petróleo, tem como subproduto um resíduo de excelente qualidade para ser usado como fertilizante.

#### **4.2. Formação Corumbataí**

A Formação Corumbataí está cronoestratigraficamente situada no Neo-Permiano e a principal litologia desta unidade é composta de siltitos e argilitos cinza-avermelhados/esverdeados e arroxeados (ALMEIDA et al., 2013). Intercaladas a essas rochas de menor granulometria ocorrem, ainda, lentes e camadas de arenitos muito finos (PERINOTTO; LINO, 2006).

As evidências paleontológicas e quanto aos sedimentos presentes, apontam que ocorreram ambientes marinhos costeiros, pantanosos e eventualmente lacustres para o

desenvolvimento da Formação Corumbataí (PERINOTTO; LINO, 2006). Pesquisas assinalam um clima mais quente e seco do que aquele que ocorria na época da geração dos sedimentos da Formação Iratí (GASPAR JR, 1999). Segundo Ramos; Formoso (1975), a aridez do ambiente deposicional da Formação Corumbataí também é apontada pelos argilominerais presentes, onde predomina a illita, montmorillonita e clorita. Interestratificações de illita-montmorillonita são raras, e a clorita e montmorillonita são mutuamente excludentes (RAMOS; FORMOSO, 1975).

No Estado de São Paulo, a Formação Corumbataí aflora ao norte do rio Tietê, atingindo a espessura máxima de 130 metros nos arredores de Rio Claro, atenuando-se para norte, não ultrapassando 60 m nas proximidades de Leme e Pirassununga (SOARES; LANDIM, 1973). Na bacia hidrográfica do Rio Corumbataí são observados na parte inferior argilitos, siltitos e folhelhos pirobetuminoso, podendo ocorrer ainda cimentação calcária. O contato da Formação Corumbataí com a Formação Iratí (unidade subjacente) é do tipo concordante (ALMEIDA et al., 2013).

Grande parte das indústrias de revestimento cerâmico localizadas na região de Rio Claro utiliza matérias primas obtidas da Formação Corumbataí para composição de suas massas bases (CHRISTOFOLLETTI; MORENO; BATEZELLI, 2016; MORENO et al., 2012; ZANARDO et al., 2009). Contudo, não foram encontrados estudos relacionados ao aproveitamento desses materiais como fontes de nutrientes para as plantas.

#### **4.3. Coprodutos da mineração como fonte de nutrientes**

A mineração vem há muitos anos desenvolvendo papel importante no setor econômico brasileiro. De acordo com dados oficiais do IBRAM (2012), somente em 2013, a indústria de mineração exportou mais de 32 bilhões de dólares, ou seja, aproximadamente 17 % de toda a exportação nacional ou 30 % do saldo da balança comercial do Brasil. Além disso, foi responsável por 180 mil empregos diretos e mais de 2 milhões indiretos.

O calcário é o segundo principal produto extraído e comercializado no Brasil (100 milhões de toneladas), logo depois do minério de ferro (390 milhões de toneladas) (CORSINI et al., 2012). Associado a mineração de calcário, está a produção de resíduos. No Brasil, estima-se que a produção de resíduos da mineração de calcário no ano de 2012 foi na ordem de 13,43 Mt, com perspectiva para o ano de 2030 na ordem de 20,35 Mt (SILVA; VIANA; CAVALCANTE, 2012). Normalmente, esses resíduos são descartados em aterros e, muito frequentemente, são jogados diretamente no meio ambiente, sem qualquer processo de tratamento.

A atividade de mineração produz basicamente dois tipos de resíduos sólidos pelos processos de capeamento e beneficiamento, que são, respectivamente, os estéreis e os rejeitos. O primeiro possui pouco ou nenhum mineral útil. Já o segundo apresenta minerais na sua composição e pode ser chamado de coprodutos. As quantidades produzidas desses resíduos são muito grandes e depende de diversos fatores, como a localização da mina em relação à superfície e o processo utilizado para extração do minério (SILVA; VIANA; CAVALCANTE, 2012).

Cada vez mais a agricultura brasileira tem buscado novos insumos e matérias-primas para garantir a sustentabilidade e soberania do setor agrícola do país. O Brasil se destaca pela grande diversidade geológica com potencial para uso como rochas em pó fonte de nutrientes. Entretanto, segundo de Pádua (2012), ainda há grande deficiência de conhecimentos sobre quais materiais são mais eficientes e quais métodos são mais indicados para análises, formas de se aumentar a solubilidade destes materiais, doses, granulometria ideal e desempenho à campo desses insumos.

Buscando reduzir a dependência brasileira de fertilizantes importados, pesquisas têm sido realizadas com o objetivo de avaliar o efeito de insumos à base de rochas moídas como fonte de nutrientes na agricultura. Esse insumos podem ser coprodutos da mineração e/ou remineralizadores (RM), que visam restaurar a fertilidade do solo por um tempo mais longo que os fertilizantes altamente solúveis (CAMPE; O'BRIEN; BARKER, 1996; DA SILVA RIBEIRO et al., 2010; MELO et al., 2012a; SILVA; VIANA; CAVALCANTE, 2012). Os remineralizadores foram incluídos na categoria de insumos agrícolas pela Lei 12.890/2013. A lei especifica como remineralizador todo "material de origem mineral que tenha sofrido apenas redução e classificação de tamanho por processos mecânicos e que altere os índices de fertilidade do solo por meio da adição de macro e micronutrientes para as plantas, bem como promova a melhoria das propriedades físicas ou físico-químicas ou da atividade biológica do solo". As Instruções Normativas (IN) nº 5 e nº 6 do MAPA, publicadas em 10 de março de 2016, estabelecem as especificações, garantias e tolerâncias que os RM devem possuir para serem comercializados como tal. Assim, foram estabelecidos dois conjuntos de critérios para esses insumos. O primeiro se refere às garantias e especificações que devem ser ratificadas por análises geoquímicas e mineralógicas, como percentuais mínimos da soma de bases, indicação do pH e percentuais máximos de elementos potencialmente tóxicos e de sílica livre, assim como a granulometria. Já o segundo conjunto de critérios é relacionado à eficiência agronômica, que

deve ser aferida por instituições públicas de pesquisa e outras entidades credenciadas pelo MAPA (BERGMANN, 2017).

A utilização de fontes alternativas, como pós de rocha, coprodutos ou remineralizadores, pode complementar às práticas tradicionalmente utilizadas no Brasil, tornando-se uma importante técnica de melhoria do solo preconizada, a princípio, para pequenos produtores, em escala regional e, até mesmo, agricultura orgânica (DE PÁDUA, 2012; LUZ et al., 2010; SOUZA, 2014). No mesmo sentido, van Straaten (2010) cita que pesquisadores e extensionistas precisam buscar insumos alternativos na agricultura. O mesmo autor menciona que a utilização de pós de rocha é atrrente pois estes tipos de fertilizantes têm potencial para suprir solos com uma grande variedade de macro e micronutrientes em comparação com os fertilizantes solúveis comercialmente disponíveis.

Segundo Beneduzzi (2011), os remineralizadores aumentam a disponibilidade de nutrientes no solo e, por não serem prontamente solubilizados, não sofrem fortemente a lixiviação. Com isso, tais insumos podem ser considerados adubos com poucas perdas e recomendados para diversos tipos de agricultura, como a agroecológica.

Os elementos liberados pelos subprodutos são disponibilizados pelos processos de intemperismo, ou seja, as rochas são desintegradadas, ocorrendo a decomposição da sua estrutura. A composição da rocha é muito variada quanto as espécies minerais, fazendo com que a liberação dos nutrientes ocorra em velocidades diferentes (BENEDUZZI, 2011). A disponibilização multielementar de nutrientes beneficia não só a cultura, mas também a microbiota do solo. Além disso, a eficiência agronômica de cada tipo de rocha depende, dentre outros fatores, da conformação de sua granulometria, à qual está diretamente relacionada à velocidade de liberação dos nutrientes (BAMBERG et al., 2013).

Segundo Theodoro; Leonards; Almeida (2010), a aplicação de pós de rocha aos solos altamente intemperizados potencializa sua remineralização por meio da adição de uma quantidade considerável de macro e micronutrientes que foram perdidos ao longo dos processos de intemperismo e antrópicos.

Hitch; Ballantyne; Hindle (2010), ao discutirem o gerenciamento de resíduos de mineração, mencionam que tais materiais possuem certas propriedades químicas, as quais têm potencial para uso em outras indústrias, como a agricultura. Os mesmos autores mencionam que a avaliação detalhada da química do material residual, especificamente sua reatividade, determina seu uso final.

O intemperismo dos solos aliado a processos erosivos, lixiviação e exportações pelas colheitas são responsáveis pelas principais saídas dos nutrientes do solo. Nesse sentido, o uso de fontes alternativas tem sido descrito na literatura com comprovados efeitos na melhoria da fertilidade dos solos (MACHADO et al., 2019; TCHOUANKOUE et al., 2016; THEODORO; LEONARDOS, 2011; VAN STRAATEN, 2014).

Nesse sentido, Ramos et al. (2019) ao avaliarem o potencial dos pós de rocha vulcânica como fonte de nutrientes, concluíram que a rocha vulcânica pode ser utilizada como fonte de macronutrientes e micronutrientes para o solo, visto que possui em sua composição diversos minerais silicatados como piroxênio, plagioclásio e ferromagnesiano facilmente modificáveis pelo intemperismo, que liberam nutrientes e elementos benéficos como: Ca, Fe, K, Mg, P e Si.

Ribes et al. (2012) avaliando o efeito da aplicação de quatro tipos de rochas (migmatito, granodiorito gnáissico, dacito e basalto hidrotermalizado), sobre as concentrações de macronutrientes em folhas de plantas de milho, demonstraram que o migmatito e granodiorito gnáissico proporcionaram as maiores concentrações de K nas folhas de plantas de milho, podendo ser consideradas como fontes de K de liberação rápida.

Welter et al. (2011) avaliaram as respostas da aplicação de pó de rochas basálticas da Formação geológica Apoteripó, em duas granulometrias, como fertilizantes alternativos no desenvolvimento inicial de mudas de camu-camu. Os autores encontraram os melhores resultados quando da aplicação da dose de 8,33 g kg<sup>-1</sup> na granulometria de 0,05 mm.

Resende et al. (2005), estudando o uso de rochas brecha alcalina, biotita xisto e ultramáfica alcalina como fontes de K para a soja e o milheto em sucessão demonstraram que a aplicação desses materiais, apenas moídos, contribuiu de forma significativa para o aporte de K às plantas já no primeiro cultivo em um Latossolo argiloso de Cerrado. Os autores destacam ainda que houve considerável efeito residual do nutriente para o cultivo subsequente.

Ramos et al. (2015) estudaram a caracterização e o potencial de fornecimento de macro e micronutrientes de um resíduo de rocha vulcânica da cidade de Nova Prata – RS (Brasil). Os materiais do estudo eram ricos em plagioclásio, piroxênio e minerais de ferro e magnésio facilmente intemperizáveis e, de acordo com os resultados, os autores concluíram que esse material pode ser utilizado como fonte de macro e micronutrientes no solo, já que apresenta em sua constituição uma proporção relevante de matriz amorfa vítreia facilmente disponibilizada para as plantas.

Betania (2015), estudando a participação dos fertilizantes no custo de produção da cana-de-açúcar em Penápolis - SP, chegou à conclusão que este era o principal da cadeia

produtiva e onerava 26,5% do custo total de produção. O mesmo autor comenta que o uso de RM é importante para atenuar problemas relacionados a dependência de fertilizantes e a grande quantidade de resíduos produzidos nas indústrias de mineração.

De Souza; Fontanetti; Assad (2017) avaliando as alterações nos atributos químicos de um Latossolo Vermelho cultivado com feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) submetido à aplicação de vinhaça e de pó de basalto, concluíram que a vinhaça contribui para a alteração de minerais contidos no pó de basalto, proporcionando aumento do pH e da saturação por bases e diminuição da acidez potencial.

Assim, diversas vantagens ambientais, agronômicas e econômicas podem ser atribuídas à utilização de coprodutos da mineração, como: fornecimento de vários nutrientes ao mesmo tempo, devido à composição multielementar dos agrominerais; disponibilização de nutrientes de forma gradual; não acidificam o solo e, ao contrário, podem apresentar potencial para correção da acidez; não salinizam o solo; não causam problemas relacionados à eutrofização dos corpos d'água. Por isso, abranger estes insumos nas práticas de adubação pode tornar-se uma estratégia interessante para elevar a fertilidade do solo e torná-lo mais produtivo, permitindo uma diminuição do uso de fertilizantes convencionais altamente solúveis, podendo também reduzir os custos de produção no campo, tornando mais rentável a atividade agrícola (MACHADO et al., 2019).

#### **4.4. Sensoriamento remoto aplicado a agricultura**

O sensoriamento remoto é uma ferramenta que possibilita o estudo de diversas variáveis ambientais, devido a sua aplicabilidade nas ciências biológicas, físicas e sociais. O funcionamento desta ferramenta se dá pela interação da radiação eletromagnética (REM) emitida por fontes naturais ou artificiais, que é refletida e/ou emitida pelos diferentes alvos da superfície terrestre (MARTINS et al., 2015a).

O uso do sensoriamento remoto já está bastante difundido na agricultura. Através desta técnica, é possível obter informações sobre: solo, produção agrícola, estimativa de área plantada, vigor vegetativo das plantas, além de fornecer informações para o manejo agrícola em nível de município, estado, país ou ainda em nível de propriedade (RUDORFF; MOREIRA; ALVES, 2002).

Os sensores mais utilizados na agricultura são os sistemas multiespectrais e hiperespectrais. O primeiro é constituído por sensores embarcados em satélites ou câmera fotográfica profissional adaptada para operar em outras bandas do espectro eletromagnético. Já

os sensores hiperespectrais são mais recentes e possuem grande potencial para aplicação no estudo do solo e das culturas. Esses sensores podem ser embarcados em diferentes plataformas, sendo classificados de acordo com os níveis de altitude como: orbital, aéreo ou suborbital e terrestre (FLORENZANO, 2002).

A pesquisa envolvendo o uso de sensores hiperespectrais vem crescendo, já que a partir desses é possível visualizar o comportamento espectral do solo, permitindo a identificação de diversos atributos, além de possibilitar a detecção de mudanças nas características biofísicas e metabólicas nos tecidos das plantas, colaborando para uma melhor tomada de decisão no manejo agrícola (WEST et al., 2003).

Segundo Moreira (2005), os parâmetros do solo que influenciam a radiação eletromagnética da superfície são diversos, porém a literatura menciona como mais importantes: umidade, óxidos de Fe, matéria orgânica, granulometria, mineralogia da argila e o material de origem. Outros atributos citados como possíveis de serem identificados são: capacidade de troca de cátions, cor do solo, drenagem do solo e temperatura (NANNI; DEMATTÊ, 2006).

Souza et al. (2013) estudando o comportamento espectral de um perfil de solo, através de espectrorradiometria em laboratório, concluíram que os atributos físicos, químicos e mineralógicos determinados apresentaram relação direta com as identificações realizadas na caracterização do comportamento espectral.

Demattê et al. (2004) realizaram um estudo avaliando as alterações químicas causadas pela aplicação de vinhaça em Neossolo Quartzarênico e Argissolo Vermelho e sua interação com a resposta espectral em laboratório. Segundo os autores, os resultados encontrados foram capazes de diferenciar amostras de solos com aplicação de vinhaça e amostras de solo sem vinhaça, em que o incremento de potássio e cálcio nas amostras com vinhaça foi responsável pelo aumento da reflectância das amostras.

No caso de plantas, as técnicas utilizando sensoriamento remoto vêm sendo estudadas em muitas áreas produtivas do mundo, em diversas culturas e sistemas de produção, onde resultados promissores têm sido adquiridos, tendo destaque trabalhos com milho, trigo (CHEN et al., 2010) e arroz (SONG et al., 2011). No caso de cana-de-açúcar, os sensores hiperespectrais (Vis-NIR-SWIR) vem sendo utilizados para a predição do teor relativo de clorofila (TANG et al., 2011), na diferenciação de doses de nitrogênio (MIPHOKASAP et al., 2012) e para avaliação da resposta da cultura em relação a condições edáficas (MARTINS et al., 2015a).

Para as forrageiras, Paz et al. (2009) avaliando as diferenças de comportamento espectral em toda a extensão de bandas medidas por sensor hiperespectral Vis-NIR-SWIR em pastagens gramíneas, concluíram que apesar da semelhança fenológica entre os capins Colonião e Elefante, estes, apresentam respostas espectrais com diferenças significativas do fator de reflectância, podendo ser assim diferenciados.

Como alternativa aos sensores hiperespectrais, tem crescido a utilização de câmeras digitais profissionais multiespectrais de pequeno e médio tamanho por serem leves, de baixo custo e fácil manuseio (COLOMINA; MOLINA, 2014; CRUSIOL et al., 2017). Essas câmeras coletam números digitais (níveis de cinza) referentes as bandas R (vermelho), G (verde), B (blue) e NIR (infravermelho próximo). Apesar disso, nos levantamentos convencionais, usualmente, não é adquirida a banda do NIR. As câmeras digitais com essa característica não são comuns e seu custo é elevado (MARTELLO, 2017). Como alternativa, é realizado a eliminação do filtro interno responsável pelo bloqueio da região do NIR e substitui-se por um filtro bloqueador da região do visível (RGB) (ROIG et al., 2013).

de Moura (2013) estudando a variabilidade espacial de níveis de produtividade de cana-de-açúcar utilizando câmeras multiespectrais RGB-NIR concluiu que a utilização de plataforma aérea possibilita rapidez e facilidades de coletas de dados de reflectâncias multiespectrais e apresenta viabilidade operacional para estudos de variabilidade espacial de produtividade de culturas agrícolas.

Fonseca; Locatelli (2018) investigando processos de degradação de pastagens cultivadas no município de Colorado do Oeste – RO, por meio da aplicação do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) obtido pelo sensor OLI/LANDSAT 8, encontraram cinco diferentes classes de degradação existente no município: extremamente degradada, fortemente degradada, moderadamente degradada, levemente degradadas e não degradadas. Os resultados demonstraram que o índice de vegetação forneceu um bom indicativo da quantidade de fitomassa que, por sua vez, possui relação direta com os níveis de degradação.

#### **4.4.1. Índices de vegetação**

Dentre as inúmeras possibilidades de aplicação de dados de sensoriamento remoto, ganham destaque os estudos relacionados à análise, detecção e monitoramento da cobertura vegetal através dos índices de vegetação (IV's). Esses IV's vêm a muitos anos sendo estudados como forma de avaliar os contrastes entre vegetação, o solo, e outros alvos da superfície terrestre. Esses IV's são relações entre bandas espectrais que tem a finalidade de realçar

características específicas de cada banda, utilizando-se, na maioria das vezes, as porções do espectro do Vis-NIR, já que essas faixas representam aproximadamente 90% da variação da resposta espectral da vegetação (ROSA, 1990).

Em grande parte das situações, a obtenção dos IV's é realizada pelo uso de imagens digitais originadas de sensores a bordo de plataformas orbitais, suborbitais e terrestres. Dentre os sensores terrestres destacam-se os espectroradiômetros, que apesar de não gerar imagens, registram a radiância refletida dos alvos.

Existem dezenas de IV's relatados na literatura, como exemplo NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada – ROUSE JR, 1974), GNDVI (Índice de vegetação da diferença de verde normalizado – GITELSON; KAUFMAN; MERZLYAK, 1996), GNIR (Razão entre verde e infravermelho próximo – BAUSCH; DUKE, 1996), RNIR (Razão entre vermelho e infravermelho próximo – RICHARDSON; WIEGAND, 1977), RVI (Razão entre infravermelho próximo e vermelho – BIRTH; MCVEY, 1968) e GRVI (Razão entre o vermelho e verde – SRIPADA et al., 2006), IRVI (Razão entre o vermelho e o ‘red edge’ - KAPP JUNIOR; GUIMARAES; CAIRES, 2016), entre outros.

Esses IV's têm sido muito utilizados na avaliação de parâmetros nutricionais das plantas (PENG et al., 2020). Desse modo, trabalhos demonstram o potencial do NDVI e RVI na predição de N na soja (GUO et al., 2017), GNDVI na detecção do status de N em brachiária (SILVA JÚNIOR et al., 2013) e citrus (PRADO OSCO et al., 2019), NDSI na predição de N na canola (WAN et al., 2018), NDVI na avaliação de teores de N (BAGHERI et al., 2013; MARESMA et al., 2016) e P no milho (GRACIA-ROMERO et al., 2017).

Nota-se que, normalmente, esses índices são elaborados utilizando dados de sensores multiespectrais. Contudo, estudos tem demonstrado que dados coletados por sensores hiperespectrais de bandas estreitas apresentam informações espetrais aprimoradas (KAWAMURA et al., 2011). Desse modo, pode-se criar IV's que permitem avaliar o status nutricional de plantas cultivadas (ABRAHÃO et al., 2009; HOGREFE et al., 2017). Porém, são poucas as informações da relação desses IV's com micronutrientes das plantas.

Os IV's podem ainda ser empregados para estimar a produção de biomassa das plantas. No caso de forrageiras, essa estimativa é útil no planejamento da capacidade de suporte e entrada dos animais nas pastagens, o que permite manejo racional da área. Trabalhos como os de Rahetlah et al. (2014), Silva Júnior et al. (2013) e Hogrefe et al. (2017) tem demonstrado o potencial de utilização dessa ferramenta para auxiliar no conhecimento da condição de vigor das plantas assim como na correlação com a produtividade de massa seca da parte aérea.

Embora existam diversos relatos de aplicação do sensoriamento remoto, bem como os IV's como formas de avaliar o solo e a planta, não foram encontradas pesquisas que objetivaram avaliar o potencial de aplicação de insumos alternativos, como pós de rocha ou coprodutos da mineração, por meio do sensoriamento remoto.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

Para o presente trabalho, foram desenvolvidos três estudos com o objetivo de avaliar coprodutos obtidos a partir de um perfil estratigráfico de 15 m de espessura de uma mineração de calcário das Formações Irati e Corumbataí localizada em Tietê / SP - Brasil ( $22^{\circ}55'5,52''S$ ;  $47^{\circ}46'1,68''O$ ). O depósito de calcário está a uma profundidade média de 15-20 m. Acima disso estão: coprodutos da Formação Corumbataí (siltitos argilosos - SA com intercalações de siltitos arenosos) denominados no presente trabalho de siltitos argilosos, localizados a profundidade média de 0 a 3 m; coprodutos da Formação Irati denominados como ritmito (calcário intercalado com folhelho pirobetuminoso) e folhelho pirobetuminoso (FP), localizados a uma profundidade média de 3-15 m (Figura 1).

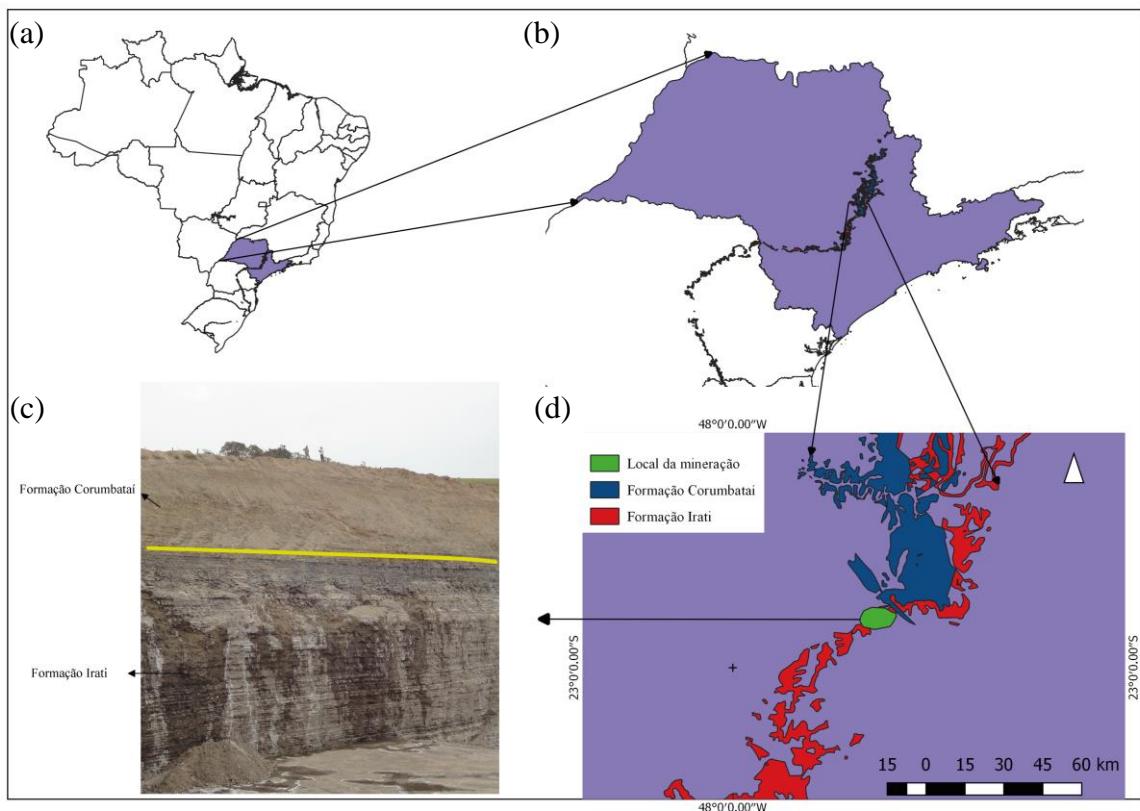


Figura 1. Mapa do Brasil (a), estado de São Paulo (b), perfil estratigráfico para coleta de coprodutos (c) e afloramento das Formações Corumbataí (FC) e Irati (FI) no município de

Tietê-SP/Brasil (d). No detalhe do perfil estratigráfico, é possível notar o siltito argiloso em amarelo (FC) e o ritmito (FI) composta por calcário em tons claros intercalados com o folhelho pirobetuminoso em tons escuros.

### **5.1. Estudo I - Avaliação agronômica de coprodutos da mineração das Formações Iratí e Corumbataí incubados em duas classes de solo**

O estudo I resume-se em um experimento de incubação com diferentes coprodutos produzidos no processo de mineração de calcário em Tietê – SP, oriundos das Formações Iratí e Corumbataí. A base científica experimental utilizada no estudo I seguiu o protocolo para avaliação da eficiência agronômica de remineralizadores de solo sugerido pela Embrapa por SILVEIRA et al. (2019). O resumo do procedimento metodológico utilizado no estudo I está descrito na forma de fluxograma na Figura 2.

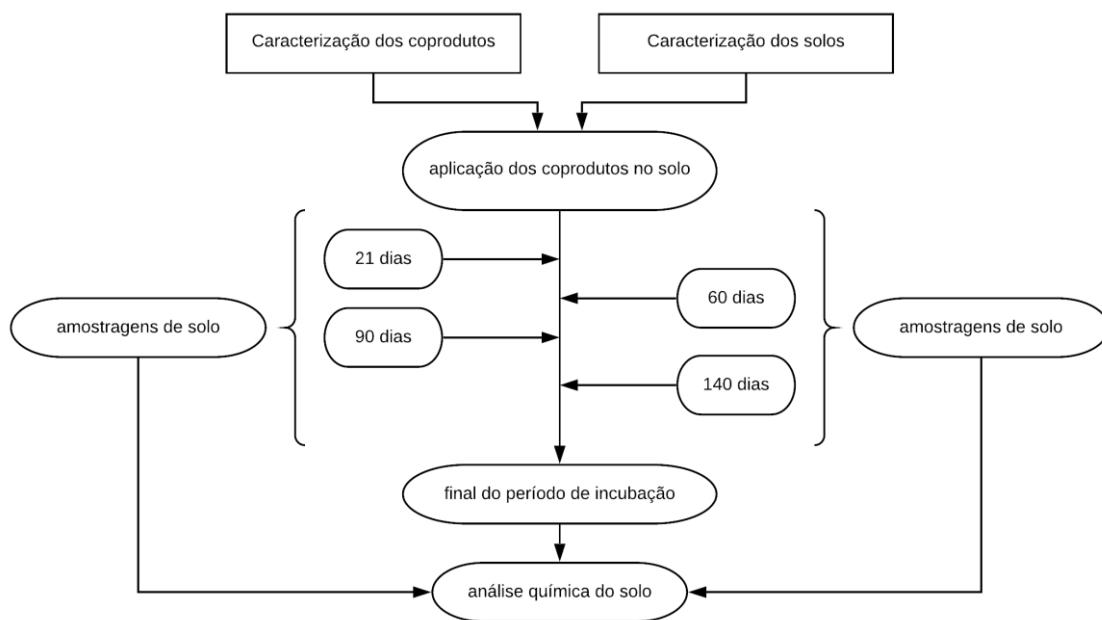


Figura 2. Fluxograma do processo metodológico utilizado no estudo I.

#### **5.1.1. Caracterização química, física, mineralógica e espectral dos coprodutos**

A abertura da amostra foi realizada utilizando a digestão modificada de água-régia (1:1:1 HNO<sub>3</sub>:HCl:H<sub>2</sub>O) e a determinação dos teores de CaO, MgO, K<sub>2</sub>O e S dos coprodutos (Tabela 1) foi realizada por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) na Acme Analytical Laboratories Ltd. (Acmelabs), Vancouver, Canadá (NOGUEIRA et al., 2017).

Tabela 1. Teores de macro, micronutrientes e metais pesados de coprodutos coletados no processo de mineração de calcário utilizados no estudo I.

Insumos	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Zn	Cu	Cd	Pb	Hg	As
	% -----								----- mg kg <sup>-1</sup> -----					
Ritmito <sup>1</sup>	14,4	13,0	0,6	1,3	0,14	0,35	4,52	35,7	32,5	17,3	<LQ <sup>3</sup>	15,11	<LQ <sup>3</sup>	0,51
FP <sup>1</sup>	3,5	3,2	2,2	1,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SA <sup>2</sup>	0,7	2,4	3,1	0,1	0,26	0,09	5,37	66,0	70,0	25,3	0,20	18,50	0,07	3,90

<sup>1</sup>Formação Irati; <sup>2</sup>Formação Corumbataí; <sup>3</sup>limite de quantificação (Cd = 0,09; Hg = 0,02).

A distribuição granulométrica dos insumos utilizados no presente estudo foi 100% < 0,30 mm, o que confere uma reatividade teórica de 100% (Tabela 2).

Tabela 2 Distribuição granulométrica dos coprodutos utilizados no estudo I.

Classes de distribuição (mm)	Coproductos		
	Ritmito	Folhelho pirobetuminoso	Siltito argiloso
	% -----		
> 0,30	0	0	0
0,3 - 0,25	21,4	26,1	4,7
0,25 - 0,10	51,9	34,1	42,4
0,10 - 0,054	25,8	39,1	52,2
0,054 - 0,037	0,9	0,8	0,7
< 0,037	0,05	0	0,08
Total	100	100	100

Com o objetivo de detalhar os minerais presentes nos coprodutos para melhor entender como ocorre o processo de liberação dos nutrientes constituintes nesses materiais, foram realizadas a caracterização mineralógica dos coprodutos. Também foi avaliada a mineralogia dos solos em que os coprodutos foram aplicados. A difração de raios X foi realizada em fração menor que 200 mesh, que foi moída em gral de porcelana até a granulometria de talco. Após, as amostras foram dispostas em recipientes de alumínio e colocados em um difratômetro de raios-X (Shimadzu XRD-6000) utilizando radiação CoK $\alpha$  em varredura escalonada no intervalo de 2 $\theta$  de 5 a 70°, com passo angular de 0,02° em configuração de Bragg (MEDEIROS et al., 2016). Após a leitura das fases presentes nos coprodutos pelo equipamento de raios-X, foi gerado um arquivo com os resultados no formato txt. Esses dados foram inseridos no software

ConvX – XRD para conversão em formato rd. A interpretação foi efetuada por comparação com padrões de referência contidos no Arquivo de Difração em Pó (PDF 02) do Centro Internacional de Difração de dados (SMITH; JENKINS, 1996) em software X’Pert HighScore Plus 2.0.1 (PANALYTICAL, 2002).

Para a caracterização espectral, inicialmente as amostras dos coprodutos foram secas a 105 °C por 48 horas para reduzir os efeitos da umidade. O sensor utilizado foi um espectroradiômetro ASD FieldSpec 3 Jr., que opera na faixa espectral de 350 nm a 2.500 nm (Vis-NIR-SWIR), apresentando resolução espectral de 3 nm na faixa de 350 nm a 1.400 nm e 30 nm de 1.400 nm a 2.500 nm. Na faixa espectral de 350 nm a 1.000 nm do espectro eletromagnético capta valores por meio de um detector CCD e na faixa espectral de 1.000 nm a 2.500 nm por meio do detector InGaAs photodiode. O funcionamento do espectrorradiômetro é controlado por um notebook a ele conectado, onde são também armazenados os dados espectrais coletados. A coleta de dados foi realizada por meio de um cabo de fibra ótica associada a um acessório *Pistol grip* conectado ao Fieldspec 3 Jr.

Para coleta de dados espectrais dos coprodutos, inicialmente o espectrorradiômetro foi otimizado para ajustar a sensibilidade dos detectores do instrumento de acordo com as condições de iluminação específicas no momento da medição com 20 varreduras por referência de branco (padrão *Spectralon*). Em seguida, para obter as medidas de refletância relativa, a referência branca foi coletada antes de digitalizar as amostras dos coprodutos até que uma linha de referência 100% limpa foi obtida de acordo com as especificações fornecidas pelo Laboratório de Reflexão e Calibração (LABSPHERE, 1996). Diante disso, a razão entre o fluxo radiante espectral refletido pela superfície dos coprodutos e o fluxo radiante espectral refletido pelo padrão de referência, gerou o fator de reflectância espectral bidirecional.

Para a leitura espectral, as amostras dos coprodutos foram colocadas em uma placa de Petri com 9 cm de diâmetro e 1,5 cm de altura. O leitor de fibra óptica acoplado ao *Pistol grip* foi movido verticalmente a 8 cm das amostras. A área de leitura foi de aproximadamente 2 cm<sup>2</sup>. A fonte de luz utilizada foi uma lâmpada de 650 W de feixe não colimado disposta a 35 cm da plataforma e com ângulo de 30° em relação ao plano horizontal. As leituras espetrais dos coprodutos foram repetidas dez vezes com deslocamento sucessivo da placa de Petri a 120° no sentido horário, permitindo a varredura completa da amostra (CEZAR et al., 2019) (Figura 3). Posteriormente, a média das dez leituras de cada amostra foi utilizada nas análises subsequentes, de acordo com as recomendações de Nanni; Demattê (2006).

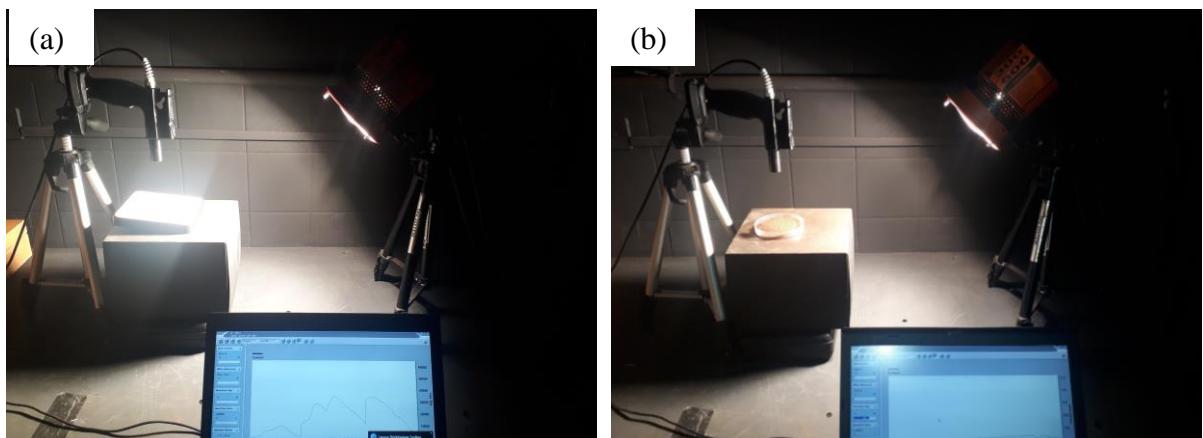


Figura 3. Coleta de dados espectrais da placa padrão *Spectralon* (a) e dos coprodutos dispostos na placa de Petri (b).

### 5.1.2. Caracterização do solo e métodos de análises

Para analisar a eficácia agronômica dos coprodutos, foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0-20 cm de duas classes de solo contrastantes em termos de conteúdo de argila e matéria orgânica. Os solos escolhidos foram Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf) (SOLOS, 2013) localizado em Mandaguari-PR/Brasil ( $23^{\circ}31'9,58\text{ S}$ ;  $51^{\circ}43'7,89\text{ O}$ ) e um Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) (SOLOS, 2013) localizado em Paranavaí-PR/Brasil ( $22^{\circ}58'12,31\text{ S}$ ;  $52^{\circ}29'9,07\text{ O}$ ). Após a coleta, as amostras foram secas ao ar, destorreadas e passadas em peneira de 5 mm de malha.

O LVdf é derivado do material de origem basáltico da Formação Serra Geral e o RQo é derivado do arenito da Formação Caiuá. O principal objetivo da escolha de duas classes de solos contrastantes foi demonstrar que os coprodutos avaliados geralmente têm potencial agronômico em solos com baixa capacidade de fornecer nutrientes, como o RQo e, por outro lado, são pouco eficientes em solos com alta capacidade de troca catiônica, como LVdf.

Previamente à instalação do experimento foi realizada a caracterização química e do teor de argila das amostras de solo nos laboratórios de física e fertilidade do solo, do Departamento de Agronomia (DAG) da Universidade Estadual de Maringá (UEM) (Tabela 3).

Tabela 3. Teor de argila e atributos químicos da camada arável (0-20 cm) de um Latossolo Vermelho Distroférrico (LVdf) e um Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) utilizados no estudo I.

Solo	Argila <sup>1</sup>	C	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (CaCl <sub>2</sub> )	H+Al	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CTC <sub>p</sub>	K <sup>+</sup>	P	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	V
	--- g kg <sup>-1</sup> ---					----- cmolc dm <sup>-3</sup> -----				----- mg dm <sup>-3</sup> -----			%
LVdf	770	12,4	5,2	4,4	3,42	0,30	3,18	1,99	9,04	175,5	7,3	5,57	62
RQo	70	7,2	5,1	4,2	1,88	0,20	0,77	0,28	3,01	31,2	0,6	2,08	38

<sup>1</sup>método da pipeta.

Para a caracterização química, inicialmente as amostras foram secas em estufa com circulação de ar forçada a 45 °C até a obtenção de massa constante, posteriormente, foram moídas e passadas em peneira de 2 mm para serem analisadas. As determinações de P e K<sup>+</sup> (Mehlich-1), Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, pH (H<sub>2</sub>O/CaCl<sub>2</sub> - 1:2,5) e C orgânico seguiram as metodologias propostas por Teixeira et al. (2017). Já para o Si solúvel e K<sup>+</sup> (resina), as metodologias seguiram propostas feitas por Korndörfer (2004) e Raij (2001), respectivamente. O P e K<sup>+</sup> foram extraídos por uma solução de Mehlich-1 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 mol L<sup>-1</sup> + HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup>), sendo o K<sup>+</sup> determinado pelo fotômetro de chama Micronal® B462 e o P por Espectrofotometria UV-VIS. Para a determinação do Al<sup>3+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, inicialmente foi realizada a extração com uma solução 1 mol L<sup>-1</sup> de KCl. O Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> foram determinados utilizando espectrômetro de absorção atômica Varian® AA240FS utilizando como mistura o ar:acetileno para produzir chama, e nas amostras adicionado o óxido de lantânio 1 g L<sup>-1</sup> para suprimir interferências. A acidez potencial foi avaliada de forma indireta pela mudança de pH da amostra frente ao tampão SMP (SHOEMAKER; MCLEAN; PRATT, 1961), após 20 minutos de repouso. Para avaliar o S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, foi utilizado como extrator o fosfato de cálcio (500 mg L<sup>-1</sup> de P) em ácido acético 2,0 mol L<sup>-1</sup>, e determinado por espectrofotometria utilizando turbidez formada pela precipitação de sulfato pelo cloreto de bário. Após determinação dos elementos foi calculada a soma de bases (SB = Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup>), capacidade de troca de cátions potencial (CTC = SB + H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>). O teor de C orgânico foi determinado seguindo o método de combustão úmida com dicromato de sódio e leitura por colorimetria. O K<sup>+</sup> (resina) foi extraído pelo método da resina de troca iônica mista e, após, determinado pelo fotômetro de chama. O Si solúvel foi determinado a partir de extração por soluções aquosas de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> com o emprego do azul de molibdênio.

### **5.1.3. Delineamento experimental**

O estudo foi realizado em casa de vegetação da Universidade Estadual de Maringá, campus principal, em Maringá-PR. Foram utilizados dois tipos de aplicação dos coprodutos, isolados e compostos (blend), conforme apresentado na Tabela 4. Os tratamentos foram organizados em esquema fatorial duplo, inteiramente casualizados com dez repetições. Foram considerados os seguintes fatores: a) tipo de coproducto (com sete níveis: T1. testemunha - sem nenhum coproducto; T2. 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3. 100% siltito argiloso; T4. 100% ritmito; T5. 100% FP; T6. 30% siltito argiloso + 15% FP + 55% ritmito; T7. 55% siltito argiloso + 15% FP + 30% ritmito; e b) classe de solo (com dois níveis: 1. LVdf; 2. RQo). A escolha dos tratamentos blends (T2, T6 e T7) ocorreu com o objetivo de atender a legislação brasileira (BRASIL, 2016) que trata do uso de remineralizadores e recomenda que o teor de óxido de potássio ( $K_2O$ ) desses materiais seja igual ou maior que 1%. Os coprodutos foram aplicados e incorporados nas duas classes de solos escolhidas (LVdf e RQo). As doses utilizadas nos tratamentos T2, T4 e T6 foram calculadas de acordo com a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina - (SILVA et al., 2016), observando-se os teores de  $CaO$  dos insumos para atingir o nível crítico de  $Ca^{2+}$  das duas classes de solo ( $> 4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), visto que se caracterizam principalmente como fontes desse nutriente. Para os tratamentos T3, T5 e T7, as doses foram calculadas de acordo com o Silva et al. (2016), com base nos teores de  $K_2O$  dos insumos para atingir (ou manter) o nível crítico de  $K^+$  das duas classes de solo ( $> 90 \text{ mg dm}^{-3}$  no LVdf e  $> 60 \text{ mg dm}^{-3}$  no RQo), pois são materiais que podem ser utilizados como fontes desse nutriente para o solo.

Embora tenha-se utilizado solos do Paraná, não foi utilizado o manual de adubação e calagem do estado (PAULETTI; MOTTA, 2017), já que segundo esse manual, as quantidades aplicadas dos coprodutos seriam diminutas no RQo e não seria necessária a aplicação dos coprodutos na classe LVdf, o que inviabilizaria a demonstração do potencial de suprimento de nutrientes por parte dos coprodutos e a comparação entre solos.

Os tratamentos com as quantidades aplicadas de  $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $MgO$  e  $S$  estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4. Descrição dos tratamentos com as quantidades aplicadas de K<sub>2</sub>O, CaO, MgO e S.

Tratamentos	Tipos de coprodutos	Classes de solo	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	S
			kg ha <sup>-1</sup>			
T1	testemunha – sem aplicação de coprodutos	LVdf	-	-	-	-
		RQo	-	-	-	-
T2	50% siltito argiloso + 50% ritmito <sup>1</sup>	LVdf	66	459	442	56
		RQo	260	1809	1740	221
T3	100% siltito argiloso <sup>2</sup>	LVdf	130	30	103	4
		RQo	300	69	237	10
T4	100% ritmito <sup>1</sup>	LVdf	19	459	414	42
		RQo	74	1809	1630	164
T5	100% FP <sup>2</sup>	LVdf	130	208	187	94
		RQo	300	479	432	217
T6	30% siltito argiloso + 15% FP +55% ritmito <sup>1</sup>	LVdf	83	459	442	53
		RQo	329	1809	1742	209
T7	55% siltito argiloso + 15% FP +30% ritmito <sup>2</sup>	LVdf	130	310	338	42
		RQo	300	780	780	96

<sup>1</sup>Dose baseada nos teores de CaO dos coprodutos para atingir o nível crítico de Ca<sup>2+</sup> (> 4 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); <sup>2</sup>Dose baseada nos teores de K<sub>2</sub>O dos coprodutos para atingir (ou manter) o nível crítico de K<sup>+</sup> (> 60 mg dm<sup>-3</sup> no RQo; > 90 mg dm<sup>-3</sup> no LVdf).

#### 5.1.4. Procedimento experimental

A incorporação dos coprodutos foi realizada no dia 11/08/17 em vasos contendo 3,0 kg de solo seco. O controle de umidade do solo no período de incubação visou manter valores próximos à capacidade de campo das duas classes de solo utilizadas. Após, os vasos foram envoltos por um saco plástico com pequenos furos para trocas gasosas e dispostos dentro da casa de vegetação (Figura 4).



Figura 4. Incorporação dos insumos (a) e vasos envoltos por sacos plásticos (b).

Durante o período de incubação foram realizadas amostragens do solo com trado rosca (Figura 5) e determinações de pH ( $\text{H}_2\text{O}$  - 1:2,5),  $\text{K}^+$  (Mehlich-1),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  aos 21, 60, 90 e 140 dias após a aplicação dos insumos (DAA). Nesta última data, também foram avaliados os teores de P (Mehlich-1),  $\text{K}^+$  (resina) e Si solúvel conforme metodologias descritas no item 5.1.2.



Figura 5. Amostragem do solo com trado rosca (a) e disposição dos vasos na casa de vegetação (b).

### 5.1.5. Análise estatística

Os resultados das análises de solo inicialmente foram avaliados quanto a sua normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade da variância do erro (Levene). Atendido as pressuposições, foram posteriormente submetidos à análise de variância e, quando as variáveis apresentaram efeito significativo para os fatores estudados (tipo de coproducto e classe de solo),

foi realizado o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Os softwares utilizados foram o Excel - suplemento XLSTAT (ADDINSOFT, 2010) e SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2011).

### **5.2. Estudo II – Avaliação por meio de análise química de rotina e índices de vegetação dos coprodutos da mineração das Formações Iratí e Corumbataí como fonte de nutrientes para as culturas da braquiária e soja após o período de incubação**

Após o período de incubação, foram realizados dois cultivos de brachiária e um de soja, que foi denominado de estudo II. A base científica experimental utilizada no estudo II seguiu o protocolo para avaliação da eficiência agronômica de remineralizadores de solo sugerido por SILVEIRA et al. (2019). A escolha pela brachiária se deu por ser uma cultura exigente em termos de potássio no solo (nutriente presente no siltito argiloso) e com o sistema radicular bastante agressivo, que poderia melhor explorar o potencial dos coprodutos. A escolha da soja foi baseada na sua alta demanda de enxofre (nutriente presente no FP e ritmito), além de sua importância no cenário nacional de produção. O fluxograma experimental do estudo II está descrito na Figura 6.

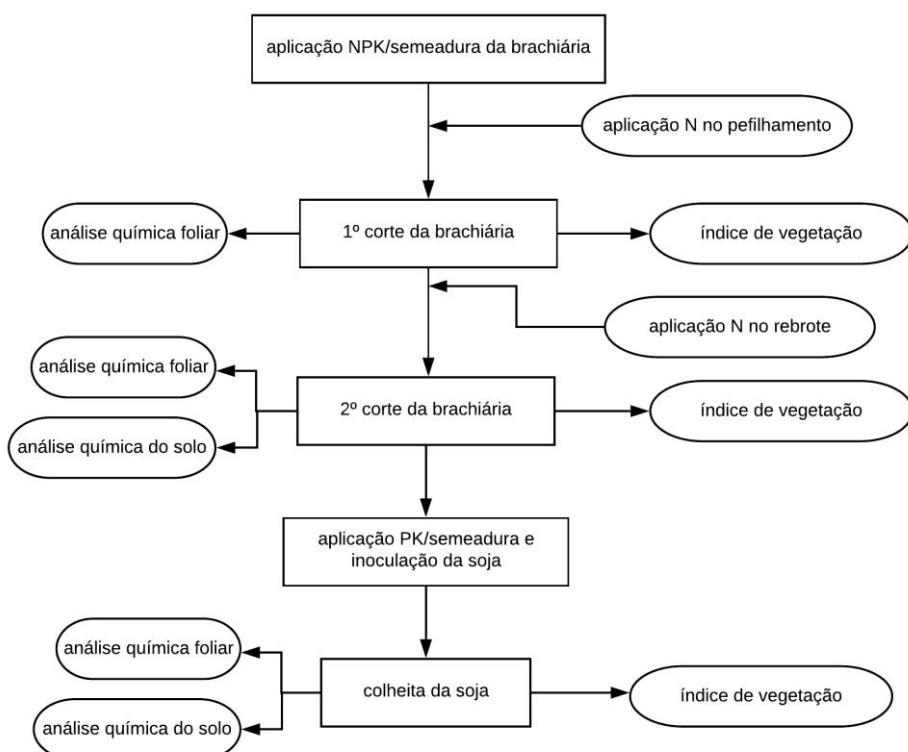


Figura 6. Fluxograma do processo metodológico utilizado no estudo II.

### 5.2.1. Procedimento experimental, análise espectral e química de plantas

O Estudo II foi uma continuação do Estudo I. Os tratamentos foram os mesmos do Estudo I, com a adição de fertilizantes NPK. A recomendação das doses de PK foi fundamentada nos resultados das análises de amostras de solo coletadas aos 140 DAA (estudo I). As doses para cada tratamento foram calculadas para elevar os teores de P e K do solo para o nível crítico (SILVA et al., 2016). A fonte nitrogenada foi a ureia, com aplicação de 20 % da dose na semeadura, 40 % no perfilhamento (21 dias após a semeadura) e 40 % no rebrote (40 dias após a semeadura). Para a correção de P e K foram utilizados superfosfato triplo e coproduto T3 (siltito argiloso), respectivamente, ambos aplicados na semeadura.

Logo após a aplicação dos fertilizantes NPK, foram semeadas 10 sementes de braquiária (*Brachiaria ruziziensis*) por vaso e, quando a planta atingiu o estádio V1, foi realizado o raleio, deixando 4 plantas por vaso. O 1<sup>a</sup> corte foi realizado no estádio V7 da braquiária, 40 dias após a semeadura (DAS) (Figura 7d). Momentos antes do corte, foi realizado o procedimento de coleta de dados espectrais (reflectância) com o FieldSpec 3 Jr. (Figura 7c).

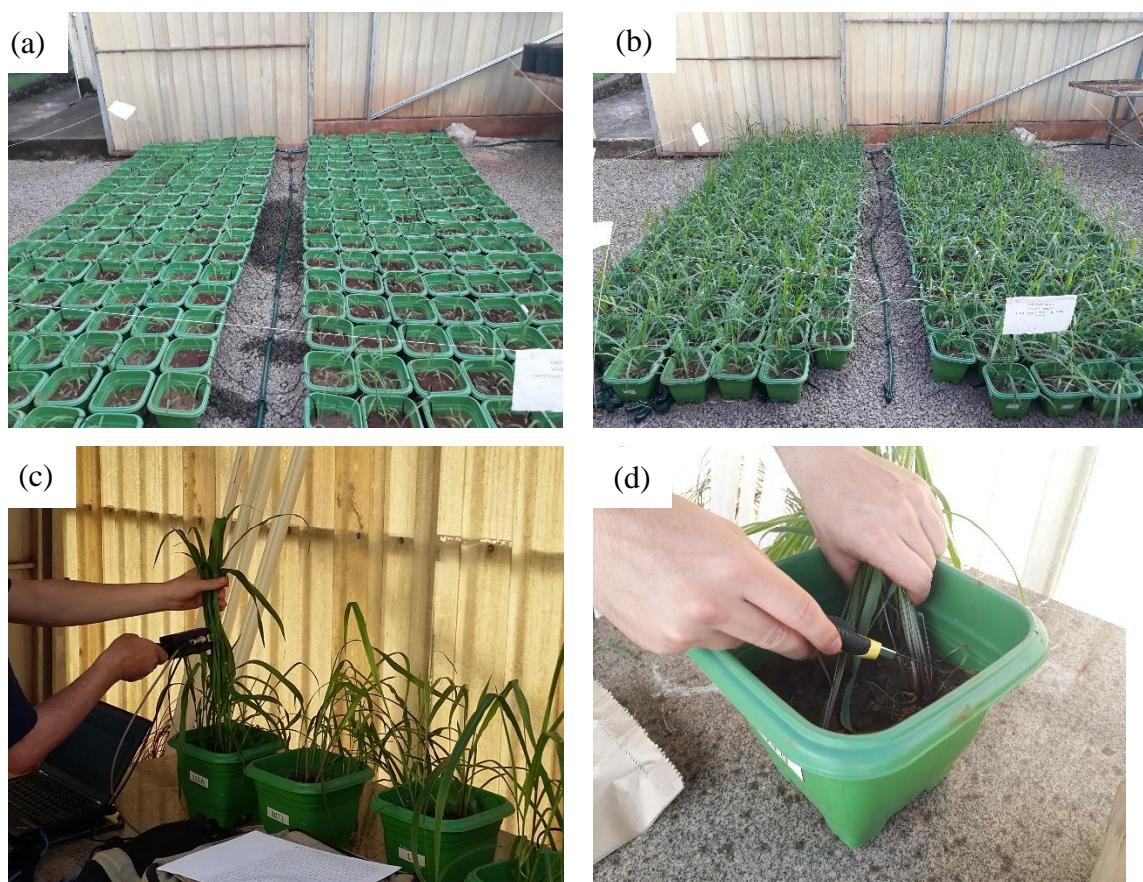


Figura 7. Desenvolvimento do 1º cultivo da brachiária (a-b), coleta de dados espetráis (c) e corte da brachiária (d).

O propósito da medição da reflectância das plantas foi a verificação da relação entre o efeito da aplicação dos coprodutos no comportamento espectral das plantas. Para isso, foram realizadas leituras espectrais com o *ASD Plant Probe* em três diferentes porções de folhas da parte superior das plantas por vaso, sempre na parte adaxial, sendo posteriormente calculadas as médias para composição da leitura de uma única unidade experimental (vaso). Este processo de repetição de leituras é uma ferramenta para compensar qualquer possível falha ocorrida durante as leituras do sensor (NANNI; DEMATTÊ, 2006).

O *ASD Plant Probe* é projetado para medições espetrais de contato de matérias-primas sólidas. Através desse método, foi possível minimizar erros associados à luz difusa. Esse acessório apresenta comprimento de 25,4 cm, peso de 0,7 kg e lâmpada 6,5 W. Com os dados espetrais, foi possível elaborar índices de vegetação (item 5.2.2.).

Após a coleta dos dados espetrais e a colheita da parte aérea do primeiro cultivo da braquiária (1º corte), as plantas foram mantidas nos vasos para rebrotarem. Todo o material vegetal foi seco em estufa com circulação forçada de ar, a 60 °C, até massa constante. Logo após, foi avaliada a produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e os teores de macro e micronutrientes da parte aérea da brachiária seguindo metodologia descrita por Silva (2009). Inicialmente as amostras de tecido foram submetidas a digestão nitroperclórica (4:1 HNO<sub>3</sub>:HClO<sub>4</sub> v/v) para a determinação de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn e digestão sulfúrica para o N. Este último foi determinado através de destilação em aparelho semi-micro Kjeldahl e titulação com ácido sulfúrico 0,025 mol L<sup>-1</sup>. Para o S, foi promovida a precipitação do extrato com BaCl<sub>2</sub> e determinação do precipitado através de um espectrofotômetro UV-Vis na forma de transmitância. Os demais nutrientes foram determinados utilizando o espectrômetro de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente. O acúmulo de nutrientes foi obtido pelo produto da quantidade de massa seca pelo teor de cada nutriente, obtendo-se o resultado em mg por planta para os macronutrientes e µg por planta para os micronutrientes.

O 2º corte da braquiária, considerado o rebrote ou segundo cultivo (Figura 8), foi realizado 70 DAS (estádio V7). Momentos antes do 2º corte, foi realizado o procedimento de coleta de dados espetrais com o FieldSpec 3 Jr, de forma semelhante a metodologia descrita anteriormente. Posteriormente, todo o material vegetal foi seco em estufa com circulação forçada de ar, a 60 °C, até massa constante. Após, foi avaliada a produção de MSPA e os teores de macro e micronutrientes da parte aérea da brachiária seguindo metodologia descrita anteriormente. Também foi calculado o acúmulo de nutrientes. Finalizado o 2º cultivo da

braquiária, foi realizada a amostragem de solo para a determinação do pH ( $\text{H}_2\text{O}$  - 1:2,5),  $\text{K}^+$  (Mehlich-1),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  (item 5.1.2.).

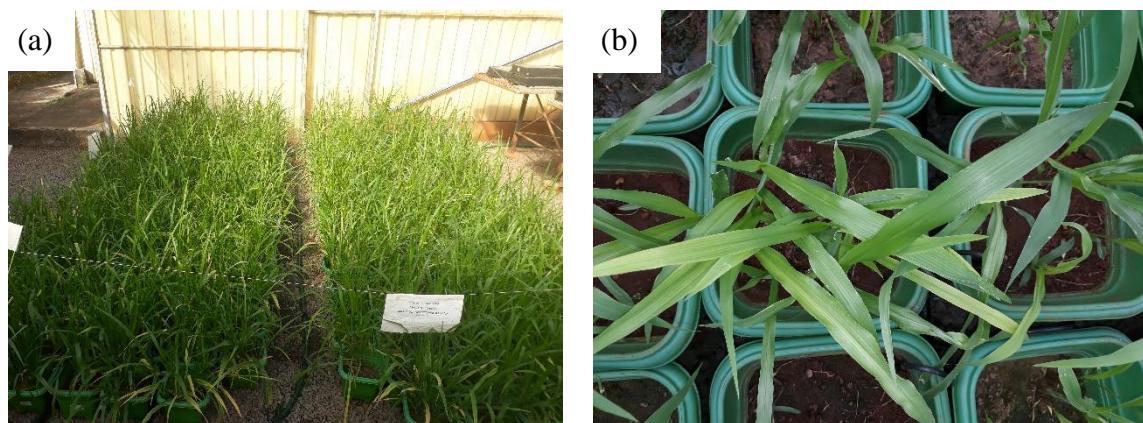


Figura 8. Desenvolvimento do 2º cultivo da brachiária (a-b).

Posteriormente ao 2º cultivo da braquiária, foram determinadas as doses de cada tratamento para elevar os teores de P e K do solo para o nível crítico, considerando a cultura da soja (SILVA et al., 2016). Os fertilizantes utilizados foram o superfosfato triplo como fonte de P, e coproduto T3 (siltito argiloso) como fonte de K, ambos aplicados na semeadura. Ainda foi realizada a inoculação das sementes de soja com *Bradyrhizobium* spp. para a fixação de N. Logo após a aplicação dos fertilizantes, foram semeadas 10 sementes de soja (*Glycine max* L.) (NIDERA NA 5909) por vaso e, quando a planta atingiu o estádio V1, foi realizado o raleio, deixando 4 plantas por vaso (Figura 9c).

A colheita da parte aérea da soja foi realizada 42 DAS, no estádio V6. Momentos antes da colheita, foi realizado o procedimento de coleta de dados espectrais com o FieldSpec 3 Jr. (Figura 9d), de forma semelhante a metodologia descrita anteriormente para coleta dos dados da brachiária.

Após a coleta dos dados espectrais, foi realizado a coleta da parte aérea da soja. Todo o material vegetal coletado foi seco em estufa com circulação forçada de ar, a 60 °C, até massa constante. Após, foi avaliada a produção de MSPA e os teores de macro e micronutrientes da parte aérea da soja seguindo metodologia descrita anteriormente. Também foi obtido o acúmulo de nutrientes pelo produto da quantidade de massa seca da parte aérea pelo teor de cada nutriente, obtendo-se o resultado em mg por planta para os macronutrientes e  $\mu\text{g}$  por planta para os micronutrientes. Além disso, foi realizada a amostragem de solo para a determinação do pH ( $\text{H}_2\text{O}$  - 1:2,5),  $\text{K}^+$  (Mehlich-1),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  conforme metodologia descrita no item 5.1.2.

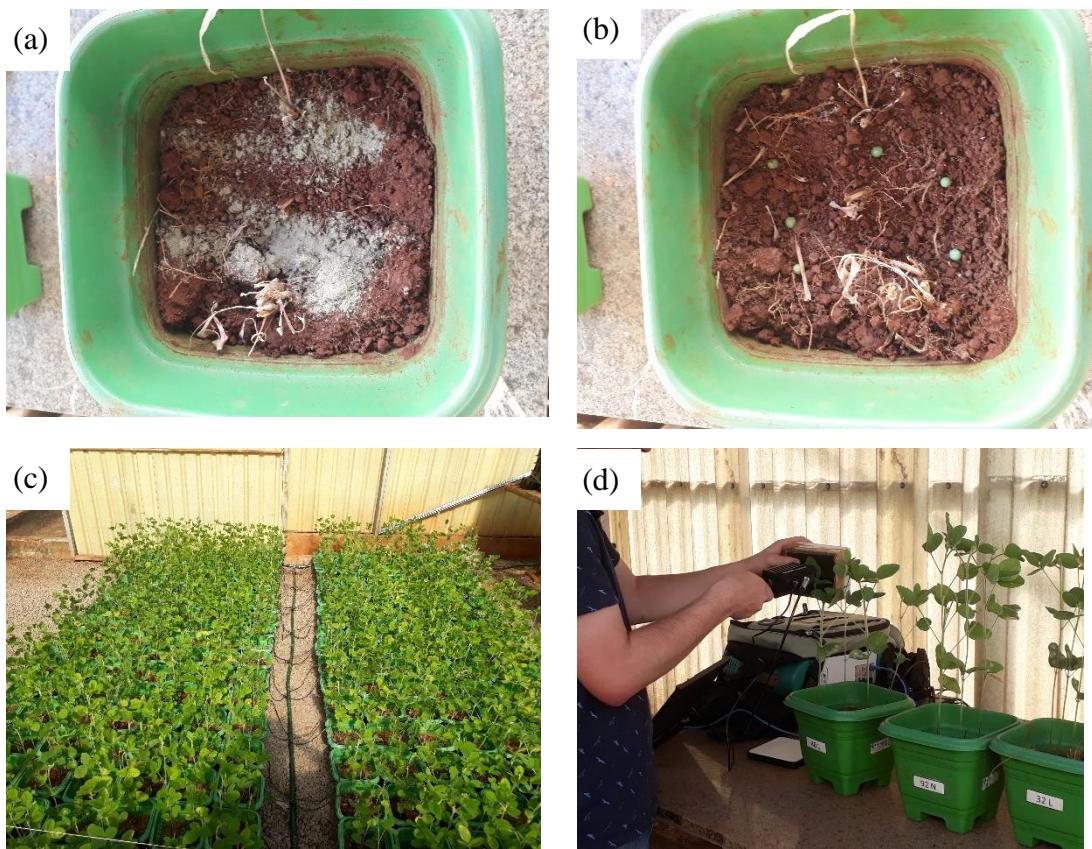


Figura 9. Aplicação fertilizantes PK (a), semeadura (b), desenvolvimento da soja (c) e leitura espectral da face adaxial de folhas da soja (d).

### 5.2.2 Índices de vegetação

Os índices de vegetação (IV's) são combinações lineares de dados espectrais (reflectância) de determinadas bandas do espectro eletromagnético. Esses, dentre outras coisas, têm a finalidade de realçar as diferenças entre solo e planta, ou mesmo entre vegetação saudável com determinada moléstia ou deficiência nutricional. Assim, buscando identificar as diferenças entre os coprodutos utilizados, foram criados diferentes IV's com o intuito de avaliar o potencial desses em disponibilizar nutrientes e aumentar a produtividade das culturas avaliadas.

Para a obtenção dos IV's, seguindo Moreira (2005), foi utilizado a média dos comprimentos de onda nas seguintes bandas do espectro eletromagnético coletadas pelo spectroradiômetro:

- Banda Verde (500 - 578nm),
- Banda Vermelho (620 - 720nm),
- Banda Infravermelho próximo (NIR) (760 - 1000nm).

Os IV's calculados foram: NDVI (Índice de vegetação por diferença normalizada – ROUSE JR 1974), GNDVI (Índice de vegetação da diferença de verde normalizado –

GITELSON; KAUFMAN; MERZLYAK, 1996), GNIR (Razão entre verde e infravermelho próximo – BAUSCH; DUKE, 1996), RNIR (Razão entre vermelho e infravermelho próximo – RICHARDSON; WIEGAND, 1977), RVI (Razão entre infravermelho próximo e vermelho – BIRTH; MCVEY, 1968), GRVI (Razão entre verde e vermelho – SRIPADA et al., 2006)) e IRVI (Razão inversa - KAPP JUNIOR; GUIMARAES; CAIRES, 2016) (Tabela 5).

Tabela 5 - Descrição dos índices de vegetação espectrais testados neste estudo.

Indices	Formulação	Referência
NDVI	$(R_{NIR} - R_{red}) / (R_{NIR} + R_{red})$	Rouse et al. (1974)
GNDVI	$(R_{NIR} - R_{green}) / (R_{NIR} + R_{green})$	Gitelson et al. (1996)
RVI	$R_{NIR} / R_{red}$	Birth; Mcvey (1968)
GRVI	$(R_{green} - R_{red}) / (R_{green} + R_{red})$	Sripada et al. (2006)
GNIR	$R_{green} / R_{NIR}$	Bausch; Duke (1996)
RNIR	$R_{red} / R_{NIR}$	Richardson; Wiegand (1977)
IRVI	$R_{650} / R_{770}$	Kapp junior; Guimaraes; Caires (2016)

### 5.2.3. Análise estatística

Os resultados das análises de solo, tecido e índices de vegetação foram incialmente avaliados quanto a sua normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade da variância do erro (Levene). Atendido as pressuposições, foram posteriormente submetidas à análise de variância e quando as variáveis apresentaram efeito significativo para os fatores estudados (tipo de coproducto e classe de solo), foi realizado o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Os softwares utilizados foram o Excel - suplemento XLSTAT (ADDINSOFT, 2010) e SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2011).

### 5.3. Estudo III – Avaliação por meio de análise química de rotina e sensoriamento remoto de insumos fontes de K, Ca, Mg e S aplicados na cultura da cana-de-açúcar

O fluxograma do estudo III está descrito na Figura 10.

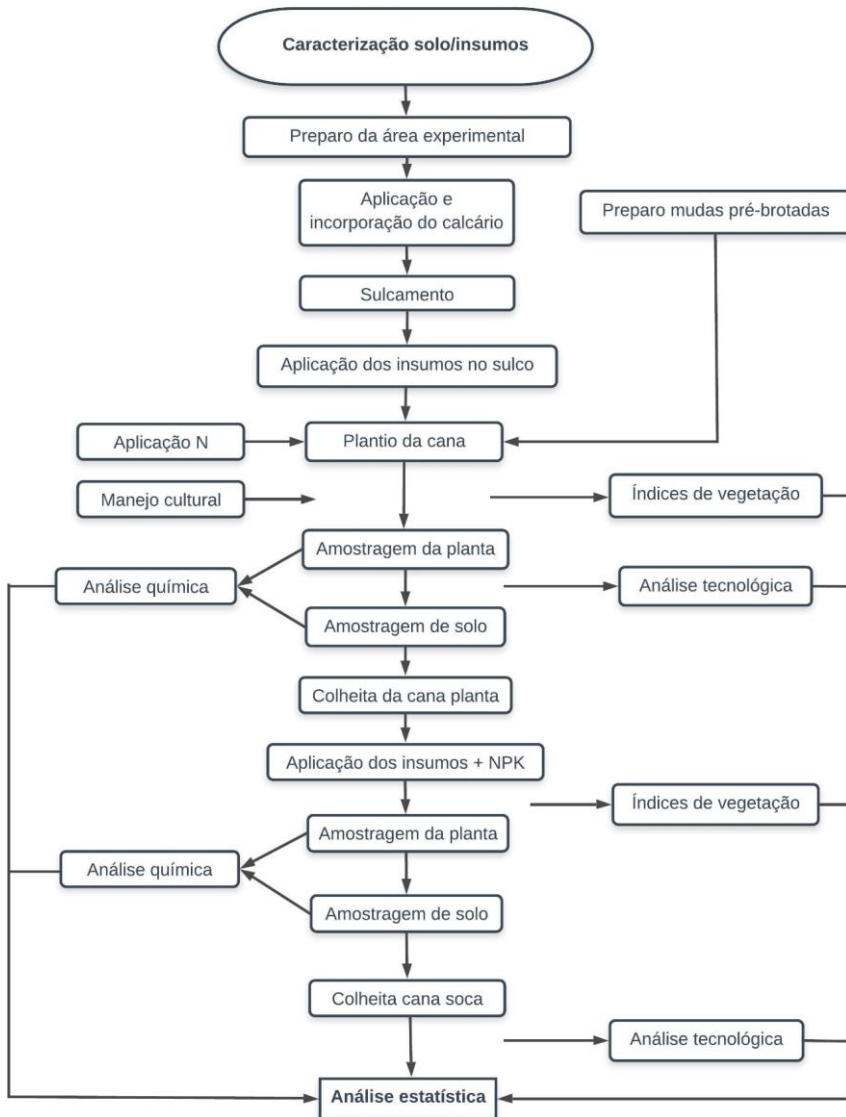


Figura 10. Fluxograma do processo metodológico utilizado no estudo III.

### 5.3.1. Local do experimento e classe de solo

O Estudo III foi desenvolvido em uma área de aproximadamente 2000 m<sup>2</sup> na estação experimental da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro – RIDESA (Paranavaí – PR) (22°58'36.83"S; 52°28'25.34"O) (Figura 11) cultivada anteriormente com *Brachiaria ruziziensis*. O local apresenta clima tipo Cfa, subtropical, com temperatura média no mês mais frio de 18 °C e temperatura média no mês mais quente de 22 °C e precipitação bem distribuída ao longo do ano, sem estação seca definida, mas com tendência à concentração de chuvas nos meses de verão (OLIVEIRA; BORROZZINO, 2018). A classe de solo predominante na área é Neossolo Quartzarênico Órtico (SOLOS, 2013).

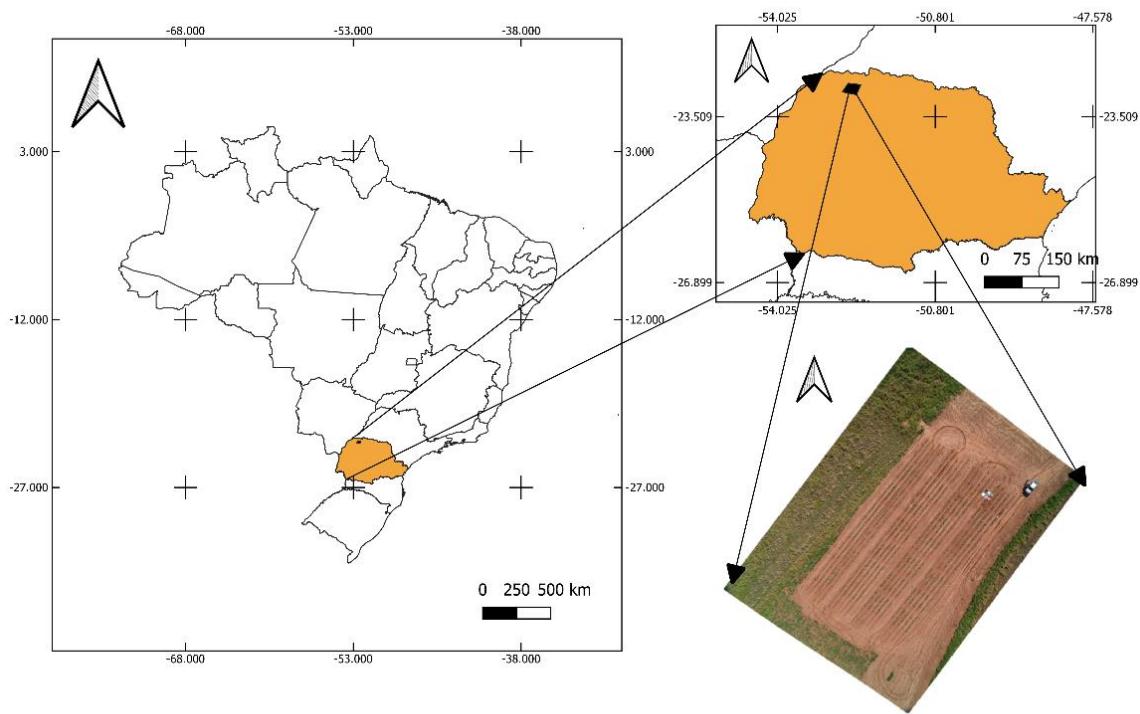


Figura 11. Localização da área experimental.

A escolha da área de experimentação ocorreu em função da provável resposta da cultura da cana-de-açúcar à aplicação dessas fontes com base na prévia caracterização granulométrica e química de uma amostra de solo coletada na área, que apresentou baixos teores de argila e fertilidade química do solo. A escolha da cultura se deu pela importância dessa no local de mineração do coproduto (Tietê-SP). Além disso, a cultura da cana-de-açúcar, por ser semi-perene, permite que as fontes pouco solúveis, como pós de rocha, sejam aproveitadas ao longo dos vários ciclos de cultivo.

### 5.3.2 Caracterização química, física, mineralógica e espectral do solo e dos insumos

O estudo III buscou comparar os coprodutos da mineração de calcário de Tietê-SP, que são fontes potenciais de K, Ca, Mg e S, com outras fontes tradicionais desses nutrientes, como o calcário (fonte de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ), gesso agrícola (fonte de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$ ), Fidagran S05 (fonte de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$ ) e fonolito (fonte de  $\text{K}^+$ ). A determinação dos teores de CaO, MgO, K<sub>2</sub>O, S e Si dos coprodutos (Tabela 5) foi realizada por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) na Acme Analytical Laboratories Ltd.

(Acmelabs), Vancouver, Canadá, usando a digestão modificada de água-régia (1:1:1 HNO<sub>3</sub>:HCl:H<sub>2</sub>O).

Tabela 5. Teores de CaO, MgO, K<sub>2</sub>O e S dos insumos utilizados no estudo III.

Insumos	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	S	Si
	%				
ritmito <sup>1</sup>	14,4	13,0	0,6	1,3	35,7
siltito argiloso <sup>1</sup>	0,7	2,4	3,1	0,1	na <sup>5</sup>
calcário <sup>1</sup>	25,8	18,4	0,2	0,3	12,2
fonolito <sup>2</sup>	1,8	0,2	8,0	0,0	56,1
gesso agrícola <sup>3</sup>	28,0	0,0	0,0	13,0	0,0
Fidagran S05 <sup>4</sup>	25,2	11,6	0,0	5,0	na <sup>5</sup>

<sup>1</sup>Coproduto do processo de mineração de calcário, em Tietê-SP; <sup>2</sup>Material extraído do processo de mineração do fonolito em Poços de Caldas-MG; <sup>3</sup>Subproduto industrial da produção de fertilizante a base de P; <sup>4</sup>Material granulado composto de CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> + CaSO<sub>4</sub> + S; <sup>5</sup>na= não avaliado.

Na Tabela 6, estão presentes a distribuição granulométrica, reatividade (RE), poder de neutralização (PN) e poder relativo de neutralização total (PRNT) de insumos utilizados no estudo III.

Tabela 6. Distribuição granulométrica, reatividade (RE), poder de neutralização (PN) e poder relativo de neutralização total (PRNT) de insumos utilizados no estudo III.

Granulometria (mm)	Insumos			
	ritmito	siltito argiloso	calcário	fonolito
	%			
> 1	0,0	0,0	0,0	0,0
1 - 0,85	3,7	1,3	3,3	0,0
0,85 - 0,5	14,8	8,6	14,7	0,0
0,5 - 0,3	8,8	5,2	7,1	0,0
0,3 - 0,212	6,5	4,9	5,7	0,0
0,212 - 0,15	11,3	9,2	10,7	0,0
0,15 - 0,075	14,0	11,9	12,5	0,0
0,075 - 0,053	5,9	7,7	4,4	52,1
0,053 - 0,045	6,2	7,1	3,4	32,9
< 0,045	28,9	44,1	38,3	15,0
RE <sup>1</sup>	91,1	95,5	91,5	100
PN <sup>2</sup>	57,9	7,3	91,8	3,2
PRNT <sup>3</sup>	52,7	6,9	84,0	3,2

<sup>1</sup>Reatividade; <sup>2</sup>Poder de neutralização; <sup>3</sup>Poder relativo de neutralização total.

Para a caracterização granulométrica e química da amostra de solo coletada na área experimental, inicialmente essa amostra foi identificada, seca em estufa com circulação de ar forçada a 45 °C até a obtenção de massa constante, posteriormente foi moída e passada em peneira de 2 mm para ser analisada (Tabela 7). As metodologias utilizadas foram propostas por Teixeira et al. (2017) e foram descritas no item 5.1.2.

Tabela 7. Teor de argila e atributos químicos da camada arável (0-20 cm) de um Neossolo Quartzarênico Órtico (RQo) utilizado no estudo III.

Solo	Argila <sup>1</sup>	C	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (CaCl <sub>2</sub> )	H+Al	Al	Ca	Mg	CTC <sub>P</sub>	K	P	SO <sub>4</sub>	V
	--- g kg <sup>-1</sup> ---				-----	cmolc dm <sup>-3</sup> -----				----- mg dm <sup>-3</sup> -----			%
RQo	140	4,84	6,0	5,0	2,05	0,05	0,72	0,51	3,39	50,8	4,2	6,4	40

<sup>1</sup>método da pipeta.

A caracterização mineralógica e espectral dos insumos foi avaliada conforme metodologia descrita no item 5.1.1.

### 5.3.3. Delineamento experimental

Os tratamentos com as respectivas quantidades de K, Ca, Mg e S aplicadas estão descritas na Tabela 8. Esses, foram arranjados no esquema de parcelas subdivididas (6x2), delineadas em blocos casualizados com quatro repetições. As parcelas experimentais (fator primário) foram compostas por 5 linhas de 6,0 metros com espaçamento de 1,50 m entre linhas e 2,0 m entre parcelas. Cada subparcela (fator secundário) foi composta por 5 linhas de 3,0 metros com espaçamento de 1,50 m entre linhas e 1,0 m entre subparcela (Figura 12). Os tratamentos foram denominados: T1 = testemunha + fonolito; T2 = testemunha + siltito argiloso; T3 = calcário + fonolito; T4 = calcário + siltito argiloso; T5 = ritmito + fonolito; T6 = ritmito + siltito argiloso; T7 = calcário + ritmito + fonolito; T8 = calcário + ritmito + siltito argiloso; T9 = calcário + gesso + fonolito; T10 = calcário + gesso + siltito argiloso; T11 = calcário + Fidagran S05 + fonolito; T12 = calcário + Fidagran S05 + siltito argiloso.

As doses dos insumos seguiram a recomendação do Manual de Adubação e Calagem do Paraná (PAULETTI; MOTTA, 2017). Para o calcário, o objetivo foi elevar para 3 cmolc dm<sup>-3</sup> a soma dos teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>. Já o gesso agrícola, Fidagran S05 e ritmito (fontes de S), as doses aplicadas foram equivalentes a recomendação de 700 kg ha<sup>-1</sup> de gesso agrícola. Para o fonolito e siltito argiloso (fontes de K), as quantidades aplicadas foram equivalentes a 140 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O.

Tabela 8. Fatores de tratamento e doses aplicadas das fontes de Ca, Mg, S e K.

Parcela	Subparcela	Tratamentos	Quantidades aplicadas (kg ha <sup>-1</sup> )			
			CaO	MgO	S	K <sub>2</sub> O
testemunha	fonolito <sup>2</sup>	T1	0	0	0	140
	siltito argiloso	T2				
calcário	fonolito <sup>2</sup>	T3	820	583	10	140
	siltito argiloso	T4				
ritmito <sup>1</sup>	fonolito <sup>2</sup>	T5	776	688	91	140
	siltito argiloso	T6				
calcário + ritmito <sup>1</sup>	fonolito <sup>2</sup>	T7	1596	1271	101	140
	siltito argiloso	T8				
calcário + gesso agrícola	fonolito <sup>2</sup>	T9	977	583	101	140
	siltito argiloso	T10				
calcário + Fidagran S05	fonolito <sup>2</sup>	T11	1279	794	101	140
	siltito argiloso	T12				

<sup>1</sup>Produto comercial = Dianutri; <sup>2</sup>Produto comercial = Ekosil.

O croqui experimental com a disposição dos tratamentos referentes as parcelas e subparcela está presente na Figura 12.

<b>bloco 4</b>	<b>bloco 3</b>	<b>bloco 2</b>	<b>bloco 1</b>
T1 testemunha + fonolito	T11 calcário + Fidagran + fonolito	T5 ritmito + fonolito	T9 calcário + gesso + fonolito
T2 testemunha + siltito argiloso	T12 calcário + Fidagran + siltito argiloso	T6 ritmito + siltito argiloso	T10 calcário + gesso + siltito argiloso
T9 calcário + gesso + fonolito	T3 calcário + fonolito	T7 calcário + ritmito + fonolito	T1 testemunha + fonolito
T10 calcário + gesso + siltito argiloso	T4 calcário + siltito argiloso	T8 calcário + ritmito + siltito argiloso	T2 testemunha + siltito argiloso
T11 calcário + Fidagran + fonolito	T1 testemunha + fonolito	T9 calcário + gesso + fonolito	T5 ritmito + fonolito
T12 calcário + Fidagran + siltito argiloso	T2 testemunha + siltito argiloso	T10 calcário + gesso + siltito argiloso	T6 ritmito + siltito argiloso
T7 calcário + ritmito + fonolito	T9 calcário + gesso + fonolito	T3 calcário + fonolito	T11 calcário + Fidagran + fonolito
T8 calcário + ritmito + siltito argiloso	T10 calcário + gesso + siltito argiloso	T4 calcário + siltito argiloso	T12 calcário + Fidagran + siltito argiloso
T5 ritmito + fonolito	T7 calcário + ritmito + fonolito	T1 testemunha + fonolito	T3 calcário + fonolito
T6 ritmito + siltito argiloso	T8 calcário + ritmito + siltito argiloso	T2 testemunha + siltito argiloso	T4 calcário + siltito argiloso
T3 calcário + fonolito	T5 ritmito + fonolito	T11 calcário + Fidagran + fonolito	T7 calcário + ritmito + fonolito
T4 calcário + siltito argiloso	T6 ritmito + siltito argiloso	T12 calcário + Fidagran + siltito argiloso	T8 calcário + ritmito + siltito argiloso

Figura 12. Croqui da área experimental com as parcelas e as subparcelas divididas pelo tracejado.

### 5.3.4. Procedimento experimental

A aplicação do calcário foi realizada dia 22/02/18 em área total e, logo após, houve incorporação e sulcamento com espaçamento entre linhas de 1,5 m e profundidade de 20 cm. Os demais insumos/tratamentos juntamente com o superfosfato triplo na dose de 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (PAULETTI; MOTTA, 2017) foram aplicados no dia 26/02/18 no interior dos sulcos que, após, foram cobertos (Figura 13).



Figura 13. Aplicação do calcário (a), incorporação (b), sulcamento (c), e aplicação dos demais insumos (d).

O plantio da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) foi realizado em 02/04/18, utilizando a variedade RB867515 no sistema de plantio manual com mudas pré-brotadas (MPB) (Figura 14a). Essas, foram distribuídas dentro das linhas de plantio (sulcos), em uma densidade de 2 plantas por metro linear, totalizando 60 mudas por parcela ou 30 mudas por subparcela experimental (Figuras 14-15). No mesmo dia foi aplicada e incorporada a 5 cm a ureia na dose de 70 kg ha<sup>-1</sup> de N.



Figura 14. Mudas pré-brotadas (a) e plantio das mudas (b).

	0,75 m	1,5 m	1,5 m	1,5 m	1,5 m	0,75 m
0,25 m	*	*	*	*	*	0,25 m
0,5 m	*	*	*	*	*	0,5 m
0,5 m	*	*	*	*	*	0,5 m
0,5 m	*	*	*	*	*	0,5 m
0,5 m	*	*	*	*	*	0,5 m
0,5 m	*	*	*	*	*	0,5 m
0,25 m	*	*	*	*	*	0,25 m
0,5 m	0,5 m					0,5 m
0,25 m	*	*	*	*	*	0,25 m
0,5 m	*	*	*	*	*	0,5 m
0,5 m	*	*	*	*	*	0,5 m
0,5 m	*	*	*	*	*	0,5 m
0,5 m	*	*	*	*	*	0,5 m
0,5 m	*	*	*	*	*	0,5 m
0,25 m	*	*	*	*	*	0,25 m

Figura 15. Croqui da parcela experimental dividida (área em marrom) em subparcela; asteriscos referentes a disposição das plantas na parcela.

No decorrer do experimento, o controle de plantas daninhas e pragas foi realizado de acordo com as recomendações da cultura. Aos 210 dias após o plantio (DAP) foi realizada a amostragem foliar, retirando o terço mediano, excluída a nervura principal, de 20 folhas (+3) por parcela para a determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn conforme metodologia descrita no item 5.2.1. (Figura 16). Foi ainda obtido a produção de massa seca de folhas por hectare para o cálculo do acúmulo dos nutrientes, que foi adquirido pelo produto da multiplicação dos teores dos nutrientes pela produção de massa seca de folhas (210 DAP).

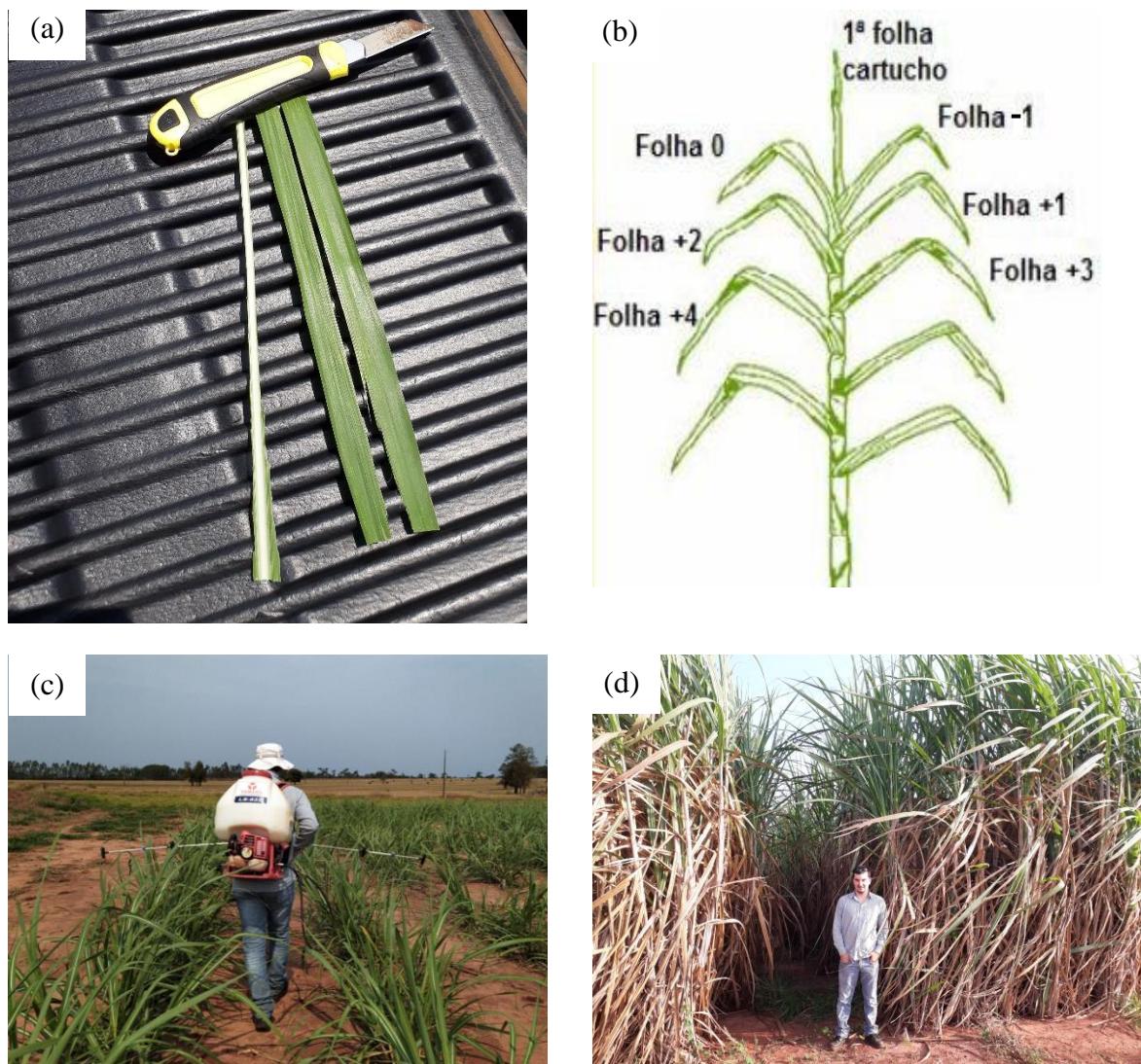


Figura 16. Amostragem foliar (a), sistema de numeração de folhas da cana-de-açúcar estabelecido por Kuijper (b) (CASAGRANDE, 1991), controle fitossanitário (c) e condição de desenvolvimento pré-colheita da cultura (d).

### 5.3.5. Aquisição de imagens aéreas da cultura da cana-de-açúcar (ciclo planta)

A coleta de imagens RGB-NIR foi realizada aos 57, 120, 150, 210, 254, 300, 354 e 423 dias após o plantio (DAP). Os dados de imagens foram obtidos por meio de duas câmeras multiespectrais Fujifilm S200 - EXR análogas, acopladas a um Veículo Aéreo Não tripulado (VANT). Assim, foi possível a aquisição de imagens na porção visível e infravermelho próximo simultaneamente. As câmeras utilizadas são equipadas com detector interno *charge-coupled device* (CCD), com sensibilidade à radiação eletromagnética entre 350 e 1100 nm (LEBOURGEOIS et al., 2008) e não apresentarem filtro interno de bloqueio à NIR. A resolução radiométrica é de 8 bits distribuídos em três canais: red, green, blue (RGB) (Figura 17). Para

evitar variações inerentes ao sensor utilizado, o foco da câmera foi travado, e o balanço de branco foi personalizado e padronizado para as condições momentâneas de iluminação do ambiente do estudo.

As imagens foram obtidas em formato RAW, tamanho Large 4:3 com 4000x3000 pixels e o ISO de 800. A câmera foi configurada no modo EXR, que controla a abertura do diafragma e o tempo de abertura do obturador de acordo com a quantidade de radiação incidente para sensibilização do detector CCD.

Cada câmera foi equipada com determinado filtro óptico. Uma com UV-IR CUT, que bloqueia a passagem da radiação ultravioleta e infravermelho, possibilitando apenas a transmissão de valores espectrais na faixa visível; e outra com filtro 760 nm, que permite somente a passagem da radiação do espectro infravermelho com comprimentos de onda superiores a 760 nm (Figura 17).



Figura 17. Câmera fotográfica multiespectral Fujifilm S200 EXR (a), Sensor Super CCD EXR (b), lentes IR Filter 760 (c) e UV-IR CUT (d).

Previamente a obtenção das fotografias em campo, as câmeras foram calibradas em laboratório em condições controladas para avaliar a resposta radiométrica e a distribuição da

luminosidade no sensor. Para isso, foi utilizada a esfera integradora óptica modelo UMKK-280, fabricada pela Gigahertz Optik Inc., que possibilita a emissão e distribuição homogênea da luminosidade (CRUSIOL et al., 2017). Desse modo, a obtenção de imagens em ambiente controlado possibilita estimar o ruído interno das câmeras obtendo o valor considerado como *offset*.

Ainda foi realizada uma calibração com o espectrorradiômetro ASD Fieldspec 3 Jr. com o intuito de obter os valores de reflectância dos alvos de calibração (lonas) para em seguida utilizá-los como parâmetros para conversão do número digital – ND das câmeras para reflectância. Para isso, inicialmente o espectrorradiômetro foi calibrado para fator de reflectância utilizando a placa Spectralon (Labsphere ®) e, após, com o acessório *pistol grip*, foi realizada a coleta do espectro a uma distância de 1 metro de seis lonas de cores e tonalidades diferentes que foram utilizadas como alvos de referência para calibração: vermelho, verde, azul, amarelo, cinza escuro e cinza claro. Essas lonas foram dispostas no campo em todas as datas de avaliação para a avaliação simultânea da reflectância por meio do espectrorradiômetro e ND através das câmeras RGB + NIR acopladas no VANT (Figura 18).

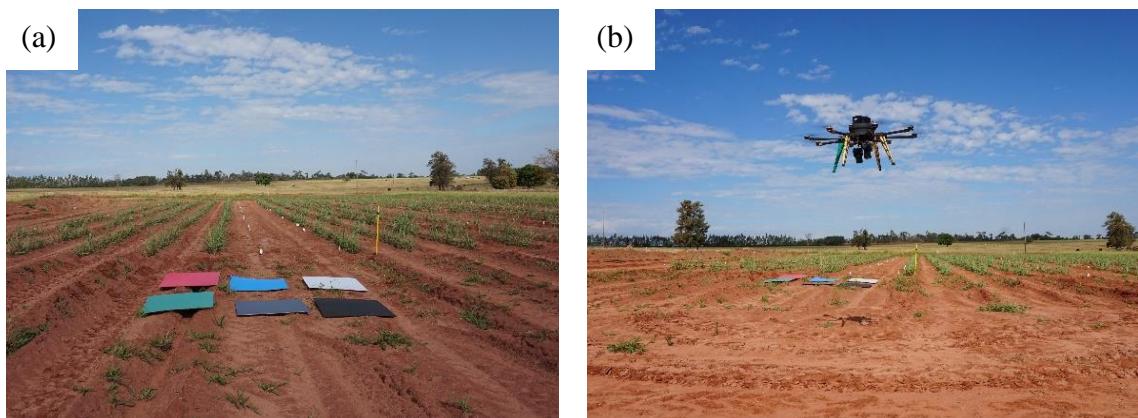


Figura 18. Placas de calibração (a) e coleta de imagens pelo VANT (b).

Foi ainda realizado um voo aos 354 DAP utilizando uma câmera térmica FLIR Vue Pro R 640, que utiliza detectores de microbolômetro que medem radiação infravermelha e térmica de 7–14  $\mu\text{m}$  por um sensor de Germânio. Quando a radiação atinge o material do detector, há aquecimento e, portanto, altera a resistência elétrica que é medida e processada em valores de temperatura.

Para aquisição das imagens aéreas foram realizados voos com um VANT octocóptero modelo Tarot Iron Man 1000 com *frame* de fibra de carbono 3k, equipado com motores brushless de 340 KV modelo T-Motor MN5212 e potência de 600 W, utilizando hélices de fibra de carbono 3k de 17 x 5.5 polegadas. O VANT foi fabricado para transportar sensores

multiespectrais e hiperespectrais e possui capacidade de carga (*payload*) de aproximadamente 4 kg com autonomia de voo de 20 minutos. A bateria utilizada é de polímero de lítio (Lipo) com capacidade 16.000 mAh 6S 22.8V e taxa de descarga de 10C. O VANT possui sistema de estabilização de câmera para evitar vibrações durante a realização do voo (Figura 19).

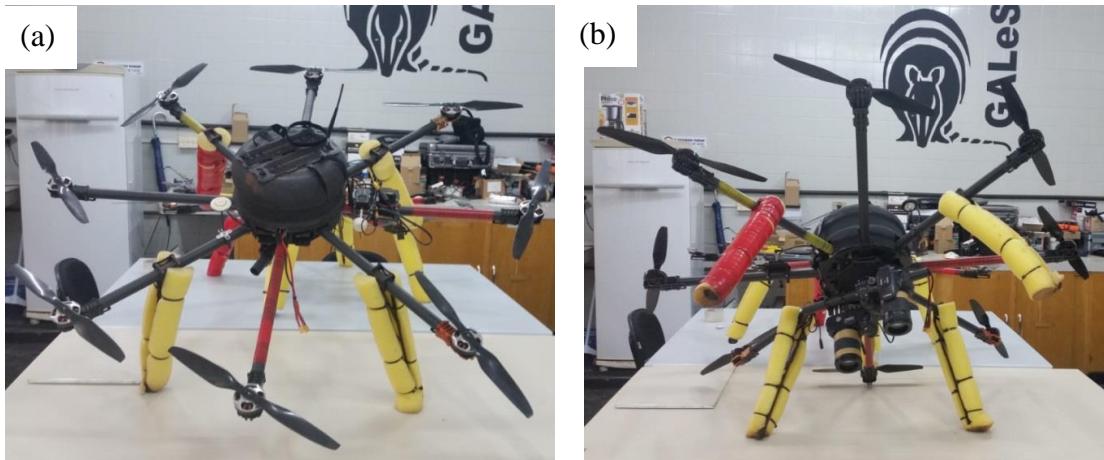


Figura 19. VANT com as câmeras com filtro RGB e NIR.

A transmissão das imagens durante o voo foi possível com o auxílio de um sistema de transmissão de vídeo trabalhando na frequência de 5.8 ghz com 2.000 mW. As informações de telemetria foram obtidas por um “*OSD*” (*On Screen Data*). O acompanhamento do voo foi feito em solo com um receptor de vídeo 5.8 ghz e uma tela LCD de 5 polegadas. O VANT foi operado por meio de um rádio controle FUTABA de 2.4 ghz com 14 canais, sendo um dos canais configurado para realizar o disparo das câmeras sob o alvo avaliado (cana-de-açúcar). A altitude de voo foi determinada com o objetivo de captar toda área de estudo em uma única foto, sendo possível quando o voo atingia 80 metros em relação a superfície. Para evitar o efeito de distorção das imagens foram realizadas múltiplas capturas das cenas, sendo posteriormente selecionada a imagem com a melhor qualidade.

### 5.3.6. Processamento das imagens obtidas pelo VANT

As imagens obtidas em campo pelo VANT primeiramente foram selecionadas manualmente buscando as que apresentassem a melhor qualidade visual. As imagens obtidas pela câmera infravermelho passaram por um processo extra de conversão de colorida para preto e branco. Posteriormente, tanto as imagens RGB, quanto a NIR, foram convertidas do formato .RAW para .TIFF, através do software FinePix Viewer.

Após o processo de seleção e preparo das imagens, foi realizado o georreferenciamento das imagens. Para isso, na área experimental foram previamente alocados 5 azulejos (20 x 20

cm) equidistantes e coletados suas referências geográficas através de um GPS Hiper II (Topcon®). Após, foi realizado o pós processamento das coordenadas geográficas coletadas utilizando os dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS – RBMC (estação Maringá – PR). No software QGIS 3.03 foi criado um projeto utilizando o sistema geodésico SIRGAS 2000 e, posteriormente, realizou-se o georreferenciamento de uma das imagens obtidas pelo VANT utilizando os pontos de controle. As demais imagens foram georreferenciadas a partir desta primeira imagem, buscando visualmente os pontos de controles.

Os valores de ND das imagens georreferenciadas foram obtidos com a utilização do software ENVI 5.3® - Environment for Visualizing Images – SulSoft por meio da ferramenta ROI - *Region of interest*, criando um polígono do albedo vegetal de cada uma das parcelas experimentais, extraíndo assim, os valores de ND nas bandas do vermelho, verde, azul e infravermelho próximo.

Logo após, foi necessário a conversão dos ND para valores de reflectância. Para isso, foram necessários modelos matemáticos de regressão calculados a partir da reflectância das lonas de calibração coletada pelo espectroradiômetro e os ND obtidos pelas câmeras RGB-NIR acopladas ao VANT. Posteriormente, os resultados foram utilizados para geração de índices de vegetação conforme descrição no item 5.3.8.

### **5.3.7. Aquisição do espectro foliar da cultura da cana-de-açúcar**

As coletas dos espectros foliares da cana-de-açúcar foram realizadas nas mesmas datas das coletas das imagens RGB-NIR (57, 120, 150, 210, 254, 300, 354 e 423 DAP). Essas, foram obtidos através do spectrorradiômetro ASD FieldSpec 3 Jr. As características do equipamento bem como os procedimentos de calibração estão descritos no item 5.2.1.

As leituras de reflectância da parte adaxial das folhas foram realizadas através do acessório *ASD Plant Probe*, posicionando a face abaxial das mesmas sobre o fundo negro e opaco presente no acessório do equipamento. A coleta dos dados de reflectância foi realizada na porção central da folha +3 (Figura 20).

Para melhorar a representatividade das leituras, foram realizadas medidas de reflectância em 5 plantas por parcela experimental, em que cada espectro coletado foi resultado da média de outras 30 leituras realizadas internamente pelo equipamento. Todas as leituras foram realizadas em condição de céu limpo, nos horários entre as 10 a 12 horas.

Os dados coletados foram processados no software Viewspec Pro (ASD, 2008) e exportados do formato .asd para .txt para posteriormente a geração de índices de vegetação (item 5.3.8) e análise estatística.

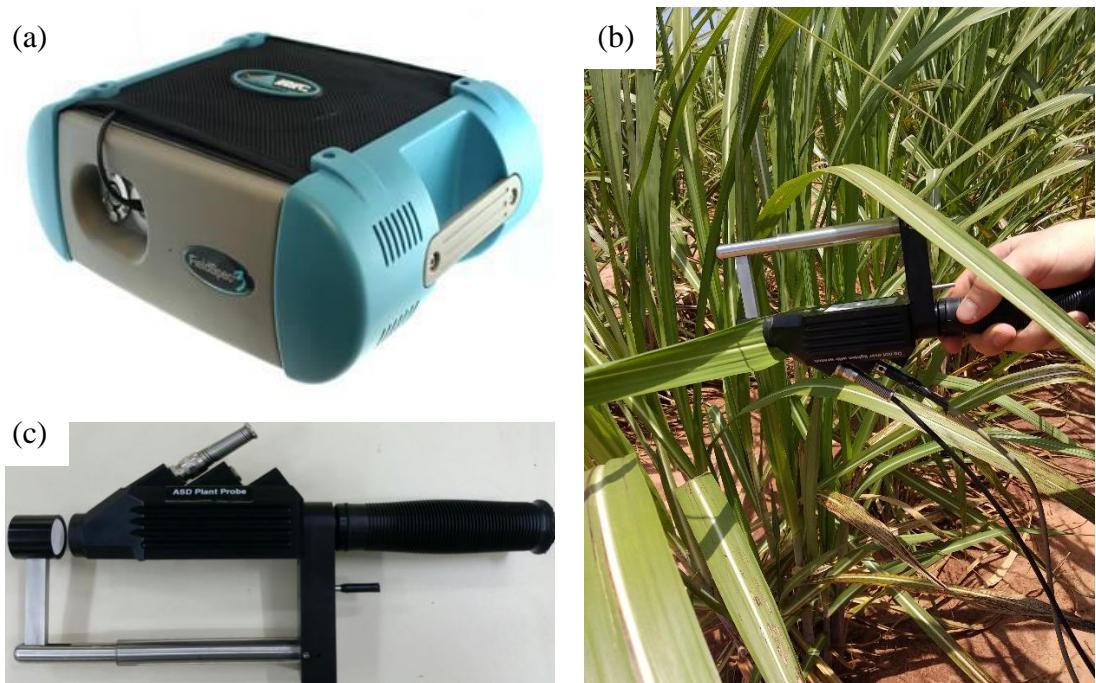


Figura 20. Fieldspiec 3 Jr. (a), coleta de dados de campo (b) e acessório *ASD Plant Probe* (c).

### 5.3.8. Índices de vegetação

Em relação aos dados obtidos pelas câmeras RGB/NIR, após a conversão dos números digitais em reflectância (item 5.3.6.), foram realizadas as relações de banda equivalentes aos IV's NDVI, GNDVI, GNIR, RNIR, RVI e GRVI (item 5.2.2.). Da mesma forma, foram determinados os mesmos IV's referentes aos dados coletados pelo espectrorradiômetro ASD Fieldspec 3 Jr. (item 5.3.7).

### 5.3.9. Análises tecnológicas e colheita da cana-de-açúcar

Dias antes da colheita foi realizada a amostragem de plantas para as determinações tecnológicas da cultura da cana-de-açúcar. Para isso, em cada parcela útil foram coletadas 10 plantas ao acaso que, posteriormente, foram homogeneizadas e moídas, retirando-se o caldo da cana que foi analisado em um laboratório da usina Coopcana onde foram determinados os seguintes parâmetros tecnológicos: quantidade de sólidos solúveis totais (Brix), Pol do caldo, Açúcares Totais Recuperáveis (ATR), Pureza e Litros de álcool estimados. Análises de Brix e Pol do caldo foram feitas pelo método da prensa hidráulica. A partir do caldo foi feita a análise

do Brix (refratométrico) e determinada por métodos sacarimétricos (polarímetros ou sacarímetros). O Pol% caldo foi obtido pela fórmula  $\text{Pol\% Caldo} = (\text{leit. sacar. } x (0,26065 - 0,000995 x \text{ brix}))$ . A massa do bagaço, também chamada de bolo úmido (P.B.U.), foi determinada em balança eletrônica. A partir dos resultados de leitura Sacarimétrica, Brix e PBU foram obtidos os resultados de Pol da cana, Fibra, Pureza, Açúcar Redutor (AR), Brix da cana, Umidade, Açúcar Total Recuperável (ATR) e Açúcar Redutor Total (ART). Os valores de tais variáveis foram obtidos com os seguintes cálculos: Fibra =  $(0,08 x \text{ PBU}) + 0,876$ , de acordo com Fernandes (2000),  $C = (1,0313 - 0,00575 x \text{ FIBRA})$ , e o coeficiente "C" representa a transformação em todo o caldo extraído; ou seja, todo caldo proveniente da prensa hidráulica.

Posteriormente, encontra-se o Brix% cana = Brix do caldo  $x (1 - 0,01) x C$  e Pol% cana = Pol no caldo  $x (1 - 0,01 x \text{ FIBRA}) x C$ . A pureza foi obtida pela fórmula:  $\text{PUREZA} = (\text{Pol\% cana}) / (\text{Brix\% cana}) \times 100$ . O cálculo dos açúcares redutores no caldo foi feito pela fórmula:  $\text{AR\% caldo} = (3,641 - 0,0343 x \text{ PUREZA})$ ; a AR% cana = AR no caldo  $x (1 - 0,01 x \text{ FIBRA}) x C$ .

Os açúcares redutores totais foram determinados pela seguinte equação:  $\text{ART\% caldo} = (\text{Pol no caldo}/0,95) + \text{AR}$  e  $\text{ART\% cana} = \text{ART do caldo} x (1 - 0,01 x \text{ FIBRA}) x C$ . Conhecendo-se a Pol da cana (PC) e os açúcares redutores da cana (ARC), o açúcar total recuperável é calculado pela equação:  $\text{ATR} = 10 x \text{ PC} x 1,05263 x 0,905 + 10 x \text{ ARC} x 0,905$ , em que:  $10 x \text{ PC} = \text{pol por tonelada de cana}$ ;  $1,05263 = \text{coeficiente estequiométrico para a conversão da sacarose em açúcares redutores}$ ; e  $0,905 = \text{coeficiente de recuperação, para uma perda industrial de 9,5\%}$  e  $10 x \text{ ARC} = \text{açúcares redutores por tonelada de cana}$ . A metodologia utilizada foi desenvolvida por CONSELHO (2006).

A colheita da cana planta foi realizada em 01/06/19 (425 DAP). Logo após, foi realizada a amostragem de solo (0-20 e 20-40 cm) para a determinação de pH ( $\text{CaCl}_2$ ), P e  $\text{K}^+$  (resina),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e Si seguindo a metodologia descrita no item 5.1.2 e Cu, Fe, Mn e Zn seguindo metodologia descrita pelo IAC (MONIZ et al., 2009), que consiste na complexação de metais utilizando a solução de DTPA pH 7,3. Em seguida, foi feita a adubação de manutenção da primeira soca com ureia como fonte de nitrogênio ( $70 \text{ kg ha}^{-1}$  de N), siltito argiloso e fonolito como fontes de potássio ( $140 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ ) e ritmito, Fidagran S05 e gesso agrícola como fontes de enxofre ( $91 \text{ kg ha}^{-1}$  de S) (item 5.3.3).

No decorrer do ciclo da cana soca foi realizado o controle de plantas daninhas e pragas de acordo com as recomendações da cultura. Aos 210 dias após o rebrote (DAR) foi realizada a amostragem foliar, retirando o terço mediano excluída a nervura principal de 20 folhas (+3)

por parcela para a determinação do N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn conforme metodologia descrita no item 5.2.1. Foi ainda obtido a produção de massa seca de folhas por hectare para o cálculo do acúmulo dos nutrientes, que foi alcançado pelo produto da multiplicação dos teores dos nutrientes pela produção de massa seca de folhas (210 DAP). A colheita da cana soca foi realizada em 30/05/20 (364 DAR).

Dias antes da colheita foi realizada a amostragem de plantas para as determinações tecnológicas conforme a metodologia descrita anteriormente para cana planta. Posteriormente a colheita da cana soca, foi realizada a amostragem de solo (0-20 e 20-40 cm) para a determinação de pH ( $\text{CaCl}_2$ ), P (resina),  $\text{K}^+$  (resina),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Si, Cu, Fe, Mn e Zn seguindo a metodologia descrita por MONIZ; JORGE; VALADARES (2009).

### **5.3.10. Análise estatística**

Os resultados das análises de solo, planta e IV's foram avaliados quanto a sua normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade da variância do erro (Bartlett). Atendido as pressuposições, foram posteriormente submetidos à análise de variância e quando as variáveis apresentarem efeito significativo para os fatores estudados (primário e secundário), foi realizado o teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. Os softwares utilizados foram o Excel - suplemento XLSTAT (ADDINSOFT, 2010) e SISVAR 5.6 (FERREIRA, 2011).

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1. Estudo I - Avaliação agronômica de coprodutos da mineração das Formações Iriti e Corumbataí incubados em duas classes de solo**

#### **6.1.1. Caracterização mineralógica e espectral dos solos e coprodutos**

Na Figura 21 estão descritos os picos de difratometria de raios X dos solos e coprodutos avaliados. Para o LVdf (Figura 21a), notam-se picos referentes a haloisita, caulinita, gibbsita, hematita e quartzo, esse último mineral, também identificado no RQo (Figura 21b).

Em relação aos minerais presentes nos coprodutos, observa-se para folhelho pirobetuminoso (Figura 21c), picos decorrentes ao quartzo, feldspato, albita, mica e pirita. Quanto ao ritmito (Figura 21d), foram observados picos referentes ao quartzo, esmectita, calcita, dolomita e pirita. Por último, para o siltito argiloso (Figura 21e), os picos identificados foram referentes a esmectita, ilita, quartzo, feldspato e mica. Esses resultados, na maioria dos casos, são corroborados com a mineralogia encontrada por outros trabalhos que avaliaram esses

materiais (GODOY; SARDINHA; MORENO, 2017; HOLANDA et al., 2019; ZANARDO et al., 2016).

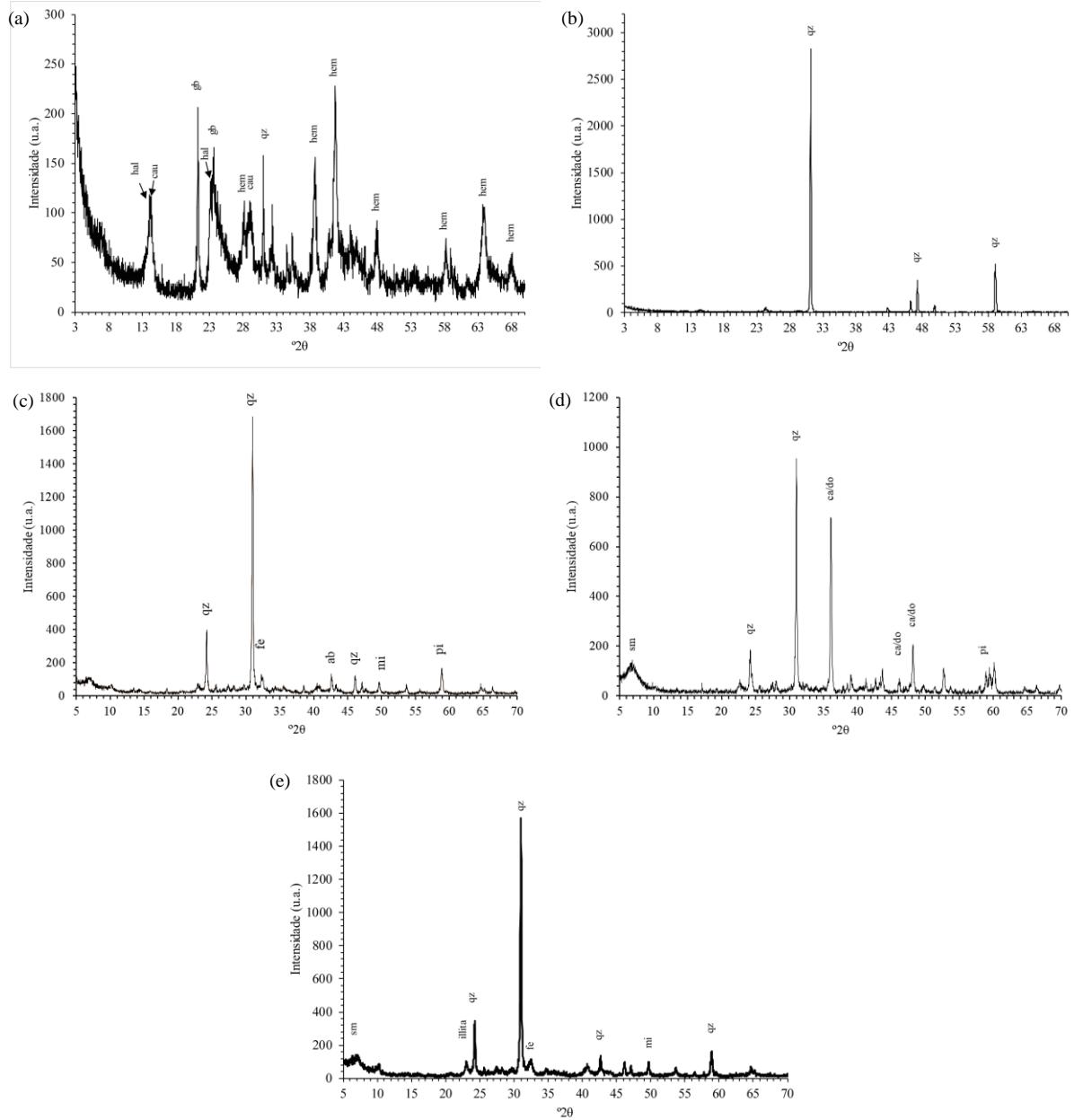


Figura 21. Difratometria de raio-X do LVdf (a), RQo (b), ritmito (c), folhelho (d) e siltito argiloso (e); \*ca/do = calcita e dolomita; sm = esmectita; qz = quartzo; pi = pirita; mi = mica; ab = albita; fe = feldspato; gb = gibbsita; hem = hematita; cau = caulinita; hal = haloisita.

As curvas espectrais (em fator de reflectância) dos solos e coprodutos utilizados no estudo variaram tanto em intensidade, quanto em inflexões, o que confirma a capacidade de sensores hiperespectrais em diferenciar diversos materiais rochosos (SUN et al., 2010) (Figura 22).

Para o LVdf, notam-se inflexões próximas a 400 a 550 nm e 800 a 900 nm devido aos óxidos de ferro (ISLAM; SINGH; MCBRATNEY, 2003); aos 1900 nm devido aos minerais 2:1 (VICENTE; DE SOUZA FILHO, 2011); e aos 2200 nm referentes aos minerais 2:1 e caulinita (MURPHY; SCHNEIDER; MONTEIRO, 2014). Já para o RQo, observa-se inflexões aos 1400 e 1900 nm devido à vibração de moléculas de água de minerais de argila 2:1 (BISHOP et al., 2011); e aos 2200 nm referentes aos minerais 2:1 e caulinita. Para o RQo, os resultados encontrados são corroborados pelo trabalho de Sallun et al. (2010), que ao estudar argilominerais da aloformação Paranavaí (região na qual foi coletado o RQo) encontraram argilominerais como caulinita, mica/illita + esmectita.

Em relação aos coprodutos, para o ritmito, notam-se inflexões próximas aos 1690 e 2330 nm referentes a calcita e dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) (ROSSEL; BEHRENS, 2010); aos 2200 nm referentes a caulinita e minerais 2:1 (MURPHY; SCHNEIDER; MONTEIRO, 2014); aos 2470 nm devido a albina e mica (MANZARI et al., 2016). Para o folhelho pirobetuminoso, houve inflexões aos 1400 e 1900 nm devido aos minerais 2:1 (VICENTE; DE SOUZA FILHO, 2011); aos 2200 nm referentes aos minerais 2:1 e caulinita; e aos 2470 nm devido a albina e mica. Ademais, esse último material apresentou reflectâncias médias menores, uma vez que possui coloração mais escura. Já para o siltito argiloso, observa-se inflexões aos: 400 a 550 nm e 800 a 900 nm, devidos aos óxidos de ferro (ISLAM; SINGH; MCBRATNEY, 2003); 1400 e 1900 nm, à vibração de moléculas de água nos minerais de argila 2:1 (BISHOP et al., 2011); 2200 devido a caulinita e minerais 2:1; 2334 nm devido ao feldspato (AHMAD; SHAH; KHAN, 2016) e 930 e 2350 nm referente à clorita (BISHOP et al., 2011; SHI et al., 2018).

Os resultados dos minerais encontrados de acordo com as inflexões das curvas espectrais dos solos e coprodutos coletadas pelo espectroradiômetro, na maioria dos casos, foram corroborados pela mineralogia desses materiais (Figura 21), o que demonstra a capacidade desse sensor em diferenciar diversos objetos de estudo, como solos e rochas. Já para minerais não silicatados, como a pirita (que não foi identificada), os sensores mais adequados para a sua identificação estão na faixa do mid-infrared (MIR) e termal (TIR) (AHMAD; SHAH; KHAN, 2016).

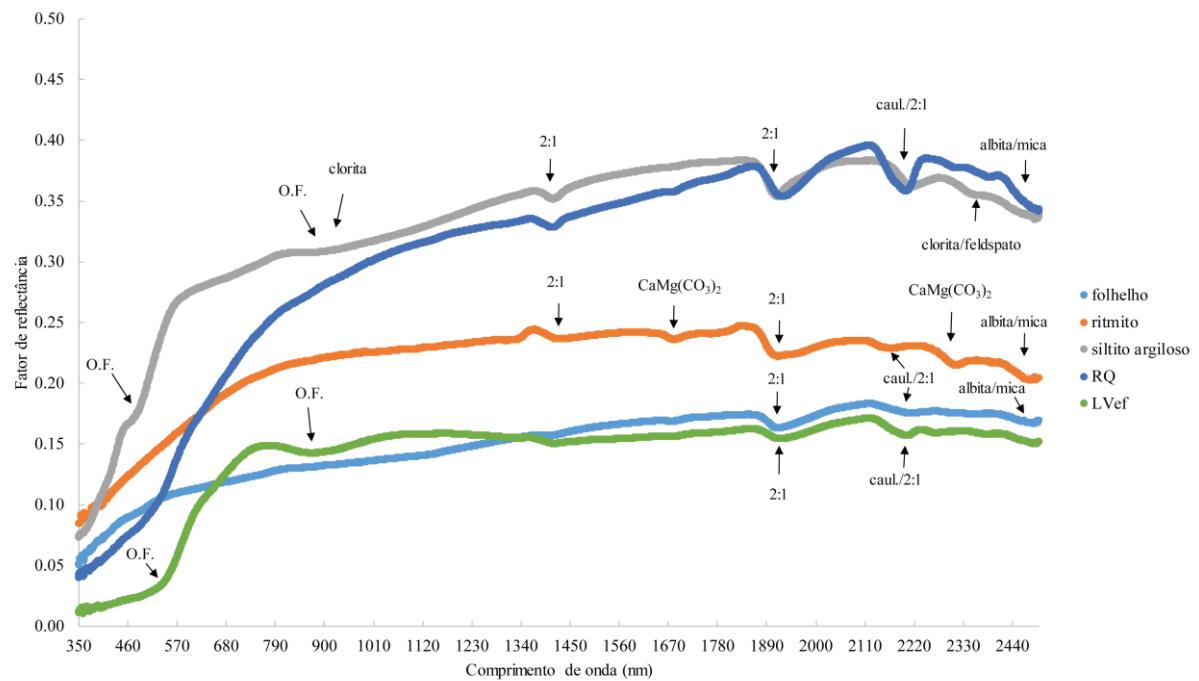


Figura 22. Caracterização espectral dos solos e coprodutos avaliados. O.F. = óxidos de ferro; caul = caulinita.

### 6.1.2. Atributos químicos do solo durante o período de incubação

#### 6.1.2.1. pH do solo

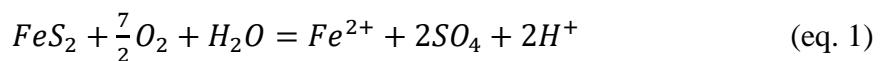
Na Tabela 9 estão descritas as médias da variável pH do solo aos 21, 60, 90 e 140 dias de incubação. Nota-se que o comportamento dos tratamentos entre as datas avaliadas (tempo de incubação) foi semelhante, o que denota a rápida solubilização dos minerais presentes nos coprodutos que contribuem para o aumento do pH.

Na primeira data de amostragem (21 dias), pôde-se observar que a aplicação dos coprodutos incrementou os valores de pH do solo, com destaque para os tratamentos T2, T4 e T6, que apresentaram os maiores valores. Esses tratamentos possuem pelo menos 50% de ritmito em sua composição, o qual, é o coproduto que possui os maiores valores de CaO e MgO (Tabela 1). Esses óxidos, ao serem aplicados no solo, liberam OH<sup>-</sup> e aumentam o pH (CASTRO; CRUSCIOL, 2015), assim como relatado por diversos estudos que trabalharam com rochas em pó constituídas de materiais corretivos, como calcita, dolomita (SALIU; SHEHU, 2012) e rochas silicáticas (MARTINS et al., 2015b; RAMOS et al., 2019). Nota-se ainda que os tratamentos T3 (RQo) e T7 (LVdf e RQo), mesmo apresentando menores teores de CaO e MgO, também aumentaram os valores de pH do solo.

Segundo Fageria (1998), a maioria das culturas pode produzir bem no solo com pH em torno de 6,0, valor, no geral, próximo ao encontrado com a aplicação dos coprodutos no RQo

aos 21 dias de incubação. Além disso, a rápida solubilização da calcita e dolomita presentes especialmente no ritmito demonstra que a prática da calagem, nas condições do presente estudo, poderia ser realizada próxima a semeadura da cultura.

Aos 60 dias de incubação, observa-se na Tabela 9 que o tratamento T5 proporcionou decréscimo nos valores de pH do RQo. Isso se deu, possivelmente, pelo efeito acidificante da oxidação da pirita presente no folhelho pirobetuminoso de acordo com a equação 1 (eq. 1) (Figura 21) (ANTONIJEVIĆ; MARIĆ, 2008; DOMÍNGUEZ et al., 2010), que se mostrou menos solúvel que a calcita e dolomita presentes nos coprodutos e, por isso, só a partir dessa data demonstrou efeito acidificante.



Na última data de amostragem (140 dias) houve comportamento semelhante ao ocorrido nas demais datas avaliadas. A aplicação dos coprodutos, com exceção do tratamento T5, aumentou os valores de pH do solo em ambas as classes de solo (Tabela 9). Nota-se ainda que o tratamento T4 foi o mais eficiente, contribuindo com um aumento nos valores de pH de 4 e 23% no LVdf e RQo, respectivamente (comparado a testemunha – T1). A maior efetividade em aumentar o pH do RQo (comparado ao LVdf) se deu em decorrência das maiores quantidades aplicadas dos coprodutos no RQo (Tabela 4), além do menor tamponamento desta classe de solo, devido aos seus menores teores de argila e C orgânico (Tabela 3).

Quanto ao fator classe de solo, de forma geral, para todas as datas avaliadas, a aplicação dos coprodutos possibilitou maiores valores de pH no RQo. Em média, essa classe apresentou, quando submetida a aplicação dos coprodutos, valores 12% superiores aos encontrados no LVdf. Como citado anteriormente, as maiores quantidades aplicadas dos coprodutos no RQo (Tabela 4), além de seu menor tamponamento (Tabela 3), possibilitaram os maiores valores de pH encontrados no RQo.

Esses resultados demonstram o potencial de utilização de diferentes tipos de rochas moídas (que apresentem CaO e MgO em sua composição), sedimentares e/ou silicáticas, isoladas ou em mistura para elevar o pH e consequentemente eliminar efeitos tóxicos do  $Al^{3+}$  e  $Mn^{2+}$  (MELO et al., 2012a; RODRIGUES, 2017).

Tabela 9. Valores médios do pH em água do solo após 21, 60, 90 e 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.

Solo	Tratamentos						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
pH ( $H_2O$ )							
21 dias							
LVdf	5,11 Db	5,32 Ab	5,17 CDb	5,32 Ab	5,19 Cb	5,30 ABb	5,23 BCb
RQo	5,22 Ea	6,12 Ba	5,43 Da	6,25 Aa	5,47 Da	6,28 Aa	5,98 Ca
60 dias							
LVdf	5,07 Cb	5,27 Ab	5,14 BCb	5,26 Ab	5,13 BCb	5,27 Ab	5,19 ABb
RQo	5,15 Da	6,17 Aa	5,32 Ca	6,25 Aa	5,04 Ea	6,21 Aa	5,95 Ba
90 dias							
LVdf	5,10 Ca	5,25 Ab	5,12 BCb	5,26 Ab	5,09 Ca	5,25 Ab	5,17 Bb
RQo	5,10 Ea	6,14 Ba	5,25 Da	6,24 Aa	5,05 Ea	6,19 ABa	5,92 Ca
140 dias							
LVdf	5,08 CDa	5,23 Ab	5,09 Cb	5,26 Ab	5,02 Da	5,22 ABa	5,15 BCa
RQo	5,04 Ea	6,10 Ba	5,17 Da	6,21 Aa	5,04 Ea	6,15 ABa	5,86 Ca

\* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator tipo de coproducto) e minúscula na coluna (fator classe de solo), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproduto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

#### 6.1.2.2. Teores de $K^+$

Na tabela 10 estão descritas as médias da variável  $K^+$  do solo aos 21, 60, 90 e 140 dias de incubação. Nota-se que o comportamento dos tratamentos entre as datas avaliadas utilizando o extrator o Mehlich-1 foi semelhante. Como exemplo, aos 60 dias de incubação houve aumento nos teores de  $K^+$  (Mehlich-1) entre 6 e 8 % com a aplicação nos tratamentos T2, T3, T5, T6 e T7, no LVdf (Tabela 10). Esses resultados demonstram que a aplicação de materiais que apresentam minerais fontes de K, como a ilita (argilomineral em maior proporção no coproduto siltito argiloso), pode disponibilizar esse elemento na forma trocável (VETTERLEIN et al., 2013). Já para o tratamento T4 (100% ritmito), em decorrência dos menores teores de  $K_2O$  em sua composição (Tabela 1), não houve incremento desse elemento. Nota-se ainda que para o RQo, mesmo com maiores teores de  $K_2O$  aplicados pelos coprodutos (Tabela 4), não houve incremento nos teores de  $K^+$  nessa classe. Embora não tenha sido quantificada, a presença de ácidos orgânicos em maiores quantidades no LVdf (dado seu maior teor de C orgânico – Tabela

3) possivelmente favoreceu a liberação de K<sup>+</sup> dos coprodutos, já que os íons H<sup>+</sup> dos ácidos orgânicos podem deslocar os íons K<sup>+</sup>, bem como desestabilizar a estrutura dos minerais pela sua incorporação aos oxigênios apicais da lâmina tetraedral, reduzindo a carga desta camada (CASTILHOS; MEURER, 2001).

Quanto ao fator classe de solo, observa-se para todas as datas avaliadas, que os maiores teores de K<sup>+</sup> ocorreram no LVdf, assim como na caracterização do solo (Tabela 3).

Já em relação aos teores de K<sup>+</sup> (resina), não houve diferença entre os coprodutos, apenas entre as classes de solo, em que o LVdf apresentou os maiores valores, os quais, segundo Silva et al. (2016), foram considerados ‘muito altos’. Já para o RQo, a mesma comissão considera os valores como ‘médios’.

Tabela 10. Teores médios de K<sup>+</sup> do solo após 21, 60, 90 e 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.

Solo	Tratamentos						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )							
21 dias (Mehlich-1)							
LVdf	0,54 Ba	0,58 Aa	0,57 Aa	0,58 Aa	0,59 Aa	0,58 Aa	0,59 Aa
RQo	0,11 Ab	0,11 Ab	0,12 Ab	0,10 Ab	0,10 Ab	0,11 Ab	0,12 Ab
60 dias (Mehlich-1)							
LVdf	0,52 Ba	0,55 Aa	0,55 Aa	0,52 Ba	0,55 Aa	0,55 Aa	0,56 Aa
RQo	0,11 Ab	0,12 Ab	0,12 Ab	0,11 Ab	0,13 Ab	0,11 Ab	0,12 Ab
90 dias (Mehlich-1)							
LVdf	0,52 Da	0,55 Ca	0,59 Aa	0,53 Da	0,58 Ba	0,55 Ca	0,58 ABa
RQo	0,12 Ab	0,13 Ab	0,13 Ab	0,12 Ab	0,13 Ab	0,13 Ab	0,13 Ab
140 dias (Mehlich-1)							
LVdf	0,50 Da	0,55 BCa	0,64 Aa	0,52 CDa	0,60 Aa	0,56 Ba	0,61 Aa
RQo	0,12 Ab	0,13 Ab	0,14 Ab	0,12 Ab	0,13 Ab	0,14 Ab	0,13 Ab
140 dias (resina)							
LVdf	0,41 Aa	0,45 Aa	0,48 Aa	0,46 Aa	0,47 Aa	0,44 Aa	0,44 Aa
RQo	0,09 Ab	0,11 Ab	0,11 Ab	0,10 Ab	0,11 Ab	0,10 Ab	0,10 Ab

\* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator tipo de coproducto) e minúscula na coluna (fator classe de solo), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproduto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

### **6.1.2.3. Teores de Ca<sup>2+</sup>**

Na tabela 11 estão descritas as médias da variável Ca<sup>2+</sup> do solo aos 21, 60, 90 e 140 dias de incubação. Na primeira data de avaliação (21 dias), observa-se que as aplicações dos tratamentos T4 no LVdf e RQo e T2, T4 e T6 no RQo proporcionaram os maiores teores de Ca<sup>2+</sup> no solo (Tabela 11). No RQo, a aplicação desses tratamentos ocasionou valores médios 2,1 vezes maiores aos obtidos no tratamento testemunha (T1). Assim como para o pH, os maiores teores de CaO do ritmito presente predominantemente nos tratamentos T2, T4 e T6 (Tabela 4) proporcionaram tais resultados. Diversos trabalhos demonstram o potencial do calcário da Formação Irati (mesma Formação do ritmito) como fonte de Ca<sup>2+</sup> para o solo (ANJOS, 2003; ASSMANN, 1995; RODRIGUES, 2017; SOUZA, 2003). Além disso, a aplicação dos demais coprodutos (com exceção do T3), em diferentes proporções, também aumentou os teores de Ca<sup>2+</sup> do solo, o que evidencia a possibilidade de utilização de tais materiais como fontes desse nutriente, assim como relatado por diversos autores que trabalharam com fontes alternativas de Ca<sup>2+</sup> para o solo (MELO et al., 2012b; YERMIYAHU et al., 2017). Em relação ao tratamento T3, a ineficácia em disponibilizar Ca<sup>2+</sup> ao solo já era esperada, já que esse material é proveniente de uma rocha (siltito argiloso) que possui baixos teores de CaO em sua composição (Tabela 1).

Aos 60, 90 e 140 dias de incubação, o comportamento quanto a diferença estatística encontrada entre os tratamentos foi semelhante. Quanto aos teores médios de Ca<sup>2+</sup> ao longo do período de incubação, nota-se progressivo aumento deste com o tempo de incubação. Como exemplo, aos 140 dias de incubação observa-se que a aplicação dos coprodutos possibilitou, em ambas as classes de solo, aumento médio dos teores de Ca<sup>2+</sup> de 27 % em relação a primeira data avaliada (21 dias), o que demonstra a gradual liberação desse nutriente ao longo do período de incubação e evidencia um dos maiores benefícios da utilização de rochas em pó, o efeito residual.

Para o fator classe de solo, assim como ocorreu para os teores de K<sup>+</sup> (resina e Mehlich-1), a classe LVdf apresentou os maiores valores, diferindo do RQo em todos os tratamentos para a variável teor de Ca<sup>2+</sup>. Esses resultados foram advindos do maior teor de Ca<sup>2+</sup> naturalmente encontrado no LVdf, devido ao material de origem desse solo (basalto), que apresenta piroxênios e anfibólios em sua constituição e liberam Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> quando intemperizado (MELO et al., 2012b). Segundo Silva et al. (2016), os teores desse nutriente foram considerados “médios” no LVdf e “baixos” no RQo.

Tabela 11. Teores médios de Ca<sup>2+</sup> do solo após 21, 60, 90 e 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.

Solo	Tratamentos						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )							
21 dias							
LVdf	2,36 Ea	2,70 BCa	2,39 Ea	2,86 Aa	2,57 CDa	2,74 ABa	2,55 Da
RQo	0,51 Cb	1,03 Ab	0,53 Cb	1,13 Ab	0,71 Bb	1,12 Ab	0,84 Bb
60 dias							
LVdf	2,40 Ea	2,88 ABa	2,50 DEa	3,00 Aa	2,63 CDa	2,84 Ba	2,76 BCa
RQo	0,62 Eb	1,46 ABb	0,87 Db	1,57 Ab	1,25 Cb	1,51 Ab	1,33 BCb
90 dias							
LVdf	2,51 Ea	2,99 Ba	2,62 Da	3,12 Aa	2,74 Ca	2,94 Ba	2,92 Ba
RQo	0,66 Eb	1,48 Bb	0,85 Db	1,77 Ab	1,31 Cb	1,54 Bb	1,45 Bb
140 dias							
LVdf	2,61 Da	3,10 Ba	2,74 Ca	3,24 Aa	2,85 Ca	3,09 Ba	3,08 Ba
RQo	0,58 Eb	1,50 BCb	0,84 Db	1,98 Ab	1,39 Cb	1,58 Bb	1,56 Bb

\* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator tipo de coproducto) e minúscula na coluna (fator classe de solo), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproduto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

#### 6.1.2.4. Teores de Mg<sup>2+</sup>

Na Tabela 12 estão descritas as médias da variável Mg<sup>2+</sup> do solo aos 21, 60, 90 e 140 dias de incubação. Aos 21 dias de incubação, nota-se que os teores de Mg<sup>2+</sup>, no geral, foram maiores com a aplicação dos coprodutos, com destaque para os tratamentos T2, T4 e T6 no RQo e T4 no LVdf. Os maiores teores de MgO presentes no ritmito (Tabela 1) possibilitaram que o tratamento T4 fosse o mais eficiente em incrementar os teores de Mg<sup>2+</sup> do solo (+36% no LVdf e +500% no RQo). Esses resultados demonstram o potencial de utilização de tais materiais como fontes alternativas de Mg<sup>2+</sup>, assim como reportado por outros pesquisadores que estudaram remineralizadores ou rochas em pó como fontes de Mg<sup>2+</sup> para o solo (MARTINS et al., 2015b; MELO et al., 2012a; SILVA; VIANA; CAVALCANTE, 2012; SILVA et al., 2012).

Aos 140 dias de incubação, assim como nas demais datas avaliadas, a aplicação dos coprodutos, de forma geral, também aumentou os teores de Mg<sup>2+</sup> do solo. Os tratamentos que possibilitaram os maiores teores desse nutriente foram: T2, T4, T6 e T7, que, comparado ao tratamento testemunha (T1), aumentaram em média os teores de Mg<sup>2+</sup> em 69 e 585% no LVdf e RQo, respectivamente. Tais tratamentos apresentam >30% de ritmito, material este que possui 13% de MgO em sua composição (Tabela 1), que ao reagir ao solo, liberou Mg<sup>2+</sup> e contribuiu para o aumento desse nutriente em ambas as classes de solos avaliadas.

Tabela 12. Teores médios de Mg<sup>2+</sup> do solo após 21, 60, 90 e 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.

Solo	Tratamentos						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )							
21 dias							
LVdf	1,47 Ca	1,82 Ba	1,53 Ca	2,00 Aa	1,70 Ba	1,77 Ba	1,77 Ba
RQo	0,19 Cb	1,04 Ab	0,22 Cb	1,14 Ab	0,26 Cb	1,10 Ab	0,49 Bb
60 dias							
LVdf	1,65 Fa	2,21 BCa	1,76 Ea	2,37 Aa	1,91 Da	2,27 ABa	2,11 Ca
RQo	0,22 Db	1,56 Ab	0,43 Cb	1,66 Ab	0,50 Cb	1,58 Ab	1,15 Bb
90 dias							
LVdf	1,50 Ea	2,20 BCa	1,78 Da	2,38 Aa	1,87 Da	2,32 ABa	2,14 Ca
RQo	0,23 Fb	1,63 Bb	0,47 Eb	1,89 Ab	0,72 Db	1,65 Bb	1,41 Cb
140 dias							
LVdf	1,35 Ca	2,22 Aa	1,80 Ba	2,39 Aa	1,90 Ba	2,36 Aa	2,19 Aa
RQo	0,27 Db	1,79 Bb	0,51 Db	2,22 Ab	0,94 Cb	1,71 Bb	1,68 Bb

\* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator tipo de coproducto) e minúscula na coluna (fator classe de solo), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproducto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

Quanto as datas avaliadas, pode-se observar que aos 140 dias os tratamentos em que houve aplicação dos coprodutos possibilitaram teores médios de Mg<sup>2+</sup> 46% superiores aos encontrados aos 21 dias. Esses resultados demonstram menor solubilidade da dolomita (fonte de Mg) frente a calcita (fonte de Ca) (RAUCH; WHITE, 1977), já que para o Ca<sup>2+</sup>, o menor incremento dos teores médios entre as datas avaliadas (+27%) se deu, possivelmente, pela

rápida solubilização da calcita que mesmo aos 21 dias de incubação, já disponibilizou boa parte do Ca<sup>2+</sup> de sua estrutura.

Entre as classes de solo, observa-se para todas as datas avaliadas que os teores de Mg<sup>2+</sup> foram maiores no LVdf, assim como na caracterização dos solos (Tabela 3). Ademais, segundo Silva et al. (2016), os teores foram considerados ‘altos’ em todos os tratamentos do LVdf e nos tratamentos T2, T4 e T6 no RQo, além de ‘baixos’ na testemunha (T1) e nos tratamentos T3, T5 e T7 nessa última classe.

#### 6.1.2.5. Teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

Na tabela 13 estão descritas as médias da variável S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> do solo aos 21, 60, 90 e 140 dias de incubação. Aos 21 dias de incubação, pôde-se observar que a aplicação dos coprodutos, com exceção do tratamento T3, aumentou os teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> em ambas as classes de solo avaliadas. Observa-se ainda que o tratamento T5 foi o mais eficiente em disponibilizar esse nutriente e, comparado aos tratamentos testemunhas nas duas classes de solos, possibilitou incremento de 26 e 118 % para o LVdf e RQo, respectivamente. Isso se deu em decorrência da pirita presente no folhelho pirobetuminoso (Figura 21), que, ao reagir com o solo, libera S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (USHER et al., 2004). No mesmo sentido, o aumento dos teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> com a aplicação dos demais coprodutos contendo ritmito (T2, T4, T6 e T7), mesmo em menores proporções, ocorreu, também em decorrência da pirita presente nessa rocha (Figura 21). Ademais, outros efeitos, como a elevação do pH, também promoveram aumento na disponibilidade de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo pelo aumento da mineralização do S-orgânico e redução da adsorção de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (CASAGRANDE et al., 2003).

Aos 140 dias de incubação, observa-se aumento dos teores médios de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, principalmente em relação a primeira avaliação (21 dias). Para o tratamento T5, os valores desse nutriente aumentaram em 72 e 427 % no LVdf e RQo, respectivamente, quando comparado ao tratamento testemunha. Quanto ao tratamento T3, assim como nas demais datas avaliadas, esse coproducto não se mostrou eficiente em disponibilizar S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ao solo. Isso se deu em decorrência dos baixos teores de S presentes no siltito argiloso (Tabela 1).

Quanto as datas avaliadas, nota-se que aos 140 dias, os tratamentos em que houve aplicação dos coprodutos possibilitaram teores médios (em ambas as classes de solo) de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 88% superiores aos encontrados aos 21 dias. Esse aumento foi maior ao encontrado para o Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, o que demonstra que o mineral pirita apresenta menor solubilidade que a calcita e dolomita (BIDARI; AGHAZADEH, 2018). A presença de calcita e dolomita nos coprodutos

também pode ter influenciado negativamente na oxidação da pirita e consequente liberação de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ao solo (BIDARI; AGHAZADEH, 2018).

Horowitz; Meurer (2006) ao avaliar um experimento de incubação com doses de S elementar em dois solos, encontraram oxidação desse elemento somente a partir do 22º dia de incubação. Os mesmos autores afirmam que esse resultado está relacionado ao tempo de crescimento da população microbiana oxidante e da colonização das partículas do S elementar por estes, tal qual observado por Chapman (1989). Esses indícios corroboram o presente trabalho, que também encontrou ligeiro aumento nos teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no 21º dia de incubação e máximos teores aos 140 dias de incubação. Além disso, Horowitz; Meurer (2006) encontraram maior eficiência em oxidação do S elementar no solo mais arenoso, tal qual no presente trabalho. Os autores comentam que a conversão de S elementar a S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> é inversamente relacionada ao teor de argila do solo, o que se deve, principalmente, ao estado de aeração/umidade do solo, como relatado por Janzen; Bettany (1987).

Esses resultados demonstram que para o S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> há necessidade de maiores períodos de tempo entre a incorporação dos coprodutos no solo e a semeadura da cultura, do que para incrementar os teores de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>.

Para o fator classe de solo, exceto aos 21 dias de incubação, nas demais datas avaliadas, de forma geral, os maiores teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ocorreram no RQo, uma vez que a quantidade aplicada de S foi maior nessa classe (Tabela 4). Ademais, o menor tamponamento do solo arenoso, além da limitação de solos oxídicos (como o LVdf) na dinâmica de oxidação da pirita (TABELIN et al., 2017) proporcionaram que o S aplicado tornasse mais facilmente disponível no RQo. Segundo Silva et al. (2016), os teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> foram considerados suficientes em todos os tratamentos.

Tabela 13. Teores médios de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> do solo após 21, 60, 90 e 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.

Solo	Tratamentos						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg dm <sup>-3</sup> )							
21 dias							
LVdf	11,91 Ba	14,44 Aa	10,89 Ba	14,54 Aa	15,01 Aa	14,64 Aa	14,22 Aa
RQo	6,64 Cb	11,69 Bb	7,07 Cb	11,70 Bb	14,49 Aa	11,63 Bb	10,97 Bb
60 dias							
LVdf	12,73 Da	17,29 Bb	12,89 Da	17,59 Bb	19,34 Ab	17,49 Bb	16,04 Cb
RQo	8,84 Fb	19,71 Da	8,92 Fb	21,38 Ca	47,73 Aa	23,70 Ba	18,27 Ea
90 dias							
LVdf	13,99 Fa	18,50 Cb	15,11 Ea	20,60 Bb	22,90 Ab	19,21 Cb	17,24 Db
RQo	9,30 Db	22,66 Ca	9,96 Db	24,78 Ba	49,24 Aa	25,63 Ba	22,22 Ca
140 dias							
LVdf	14,68 Fa	19,06 CDb	16,55 Ea	22,55 Bb	25,24 Ab	20,16 Cb	17,82 DEb
RQo	9,46 Db	24,26 Ca	10,58 Db	26,94 Ba	49,87 Aa	26,60 Ba	24,88 Ca

\* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator tipo de coproducto) e minúscula na coluna (fator classe de solo), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproduto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

#### 6.1.2.6. Teores de P

Na Tabela 14 estão descritas as médias da variável teor de P do solo aos 140 dias de incubação. Nota-se que a aplicação dos coprodutos promoveu aumento nos teores de P em ambas as classes de solo, chegando a valores de 13,09 mg kg<sup>-1</sup> quando foi aplicado o tratamento T5 no RQo. O tratamento T5 foi também o que possibilitou os maiores teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> em ambas classes de solo avaliadas. Embora a seletividade de adsorção de fosfato seja maior do que a do sulfato, esse último pode substituí-lo das ligações por meio de troca de ligantes, mesmo que este processo não seja o dominante (SPOSITO, 1984). Segundo Araújo; Salcedo (1997), a adição de sulfato ao solo diminui o número de sítios disponíveis para a adsorção do P, o que, possivelmente, aumentou os teores de P disponíveis no tratamento T5 no RQo. Para o LVdf, em virtude dos maiores teores de argila e, consequente, maior fixação do P (MACHADO; DE SOUZA, 2012), o incremento de P foi menor com a aplicação dos insumos.

Ademais, embora os coprodutos não apresentem quantidades significativas de P em sua composição, fatores indiretos, como aumento de pH e diminuição da fixação de P, podem ter incrementado os teores de P (SAVINI; KOALA; KIHARA, 2015). Além disso, os insumos aplicados possuem silicatos em sua constituição, que, através da competição entre Si e P pelos mesmos locais de adsorção em colóides do solo, permite a maior disponibilidade dos teores de P (CASTRO; CRUSCIOL, 2015).

Embora os teores de P foram maiores no RQo, segundo Silva et al. (2016), de acordo com os teores de argila dos solos utilizados, os valores de P foram considerados ‘médios’ para o tratamento testemunha no LVdf e ‘altos’ com a aplicação dos coprodutos nessa classe. Já no RQo, os teores foram considerados ‘baixos’ em todos os tratamentos.

Tabela 14. Teores médios de P do solo após 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.

Solo	Tratamentos						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
P ( $\text{mg dm}^{-3}$ )							
LVdf	5,10 Bb	6,89 Ab	6,63 Ab	6,82 Ab	6,56 Ab	6,62 Ab	6,60 Ab
RQo	7,28 Da	12,30 ABa	11,11 Ca	11,68 BCa	13,09 Aa	12,00 BCa	12,53 ABa

\* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator tipo de coproducto) e minúscula na coluna (fator classe de solo), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproduto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

#### 6.1.2.7. Teores de Si

Na tabela 15 estão descritas as médias da variável teor de Si solúvel do solo aos 140 dias de incubação. Nota-se que no RQo as aplicações dos tratamentos T2, T4 e T6 proporcionaram aumento nos teores de Si entre 152 e 173 % em relação ao tratamento testemunha (T1) dessa classe. Esses tratamentos possuem ritmito, que possui 35,7% de  $\text{SiO}_2$  em sua constituição que, ao reagir no solo, possibilitou aporte de Si. Já para o fator classe de solo, o LVdf apresentou os maiores valores desse elemento. Isso se deu pelos maiores teores de argila dessa classe (TAVAKKOLI et al., 2011). Ademais, diversos trabalhos utilizando rochas silicáticas e coprodutos da industrial siderúrgica demonstram o potencial de uso desses materiais como fontes de Si (CRISTINA FERNANDES DEUS et al., 2019; DEUS et al., 2014;

MARTINS et al., 2015b). Segundo Korndörfer (2002), solos que apresentam concentrações de Si abaixo de 20 mg dm<sup>-3</sup> (como foi o caso) necessitam ser fertilizados com esse elemento.

Tabela 15. Teores médios de Si solúvel do solo após 140 dias de incubação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.

Solo	Tratamentos						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Si (mg dm <sup>-3</sup> )							
LVdf	13,17 Aa	12,69 Aa	12,55 Aa	13,08 Aa	11,84 Aa	12,02 Aa	12,37 Aa
RQo	2,01 Bb	5,07 Ab	2,23 Bb	5,49 Ab	2,33 Bb	5,13 Ab	3,34 Bb

\* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator tipo de coproducto) e minúscula na coluna (fator classe de solo), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproduto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

### 6.1.3. Discussão geral do estudo I

Diante dos resultados, observou-se que o uso do sensoriamento remoto como técnica para a caracterização dos coprodutos se mostrou eficiente, uma vez que foi possível obter a assinatura espectral desses materiais, os identificando visualmente por meio de suas inflexões. Além disso, os minerais identificados, foram, na maioria das situações, os mesmos minerais identificados pela análise de raios-X.

De forma geral, a aplicação dos coprodutos aumentou os teores de íons disponíveis do solo, demonstrando o potencial de uso destes insumos como fontes de nutrientes. Isso foi possível devido a efeitos diretos da liberação dos nutrientes presentes em minerais constituintes dos coprodutos como as micas/feldspatos para o K<sup>+</sup>, dolomita para o Mg<sup>2+</sup>, calcita e dolomita para o Ca<sup>2+</sup>, pirita para o S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, minerais siliciclásticos para o Si. Por sua vez, efeitos indiretos como o aumento do pH do solo em decorrência do poder de neutralização dos materiais, bem como o aumento nos teores de sulfato e silicato, proporcionaram incremento de íons como o P. Outro importante fator foi a granulometria dos coprodutos, que caracterizada como filler (< 0,300 mm), apresenta elevada área superficial específica (ASE), o que possibilitou a rápida liberação dos elementos para a solução do solo (BRANDÃO, 2012).

Quanto as datas avaliadas (21, 60, 90 e 140 dias de incubação), nota-se, de forma geral, que não houve grandes diferenças nos valores de pH, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> entre as datas avaliadas. Assim, a alta solubilidade dos carbonatos de Ca e Mg presentes nos coprodutos permitiu que

mesmo aos 21 dias de incubação, houvesse rápida dissolução desses minerais e, consequentemente, aumento nos valores de pH, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> do solo. Quanto ao S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, aos 140 dias houve incremento dos teores em relação as datas anteriores (principalmente 21 e 60 dias de incubação), o que evidencia a menor solubilidade da pirita em comparação aos carbonatos, bem como o efeito negativo da calcita e dolomita presente nos coprodutos (principalmente para o ritmito) na oxidação da pirita e consequente liberação de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (BIDARI; AGHAZADEH, 2018).

## **6.2. Estudo II - Avaliação por meio de análise química de rotina e índices de vegetação dos coprodutos da mineração das Formações Iriti e Corumbataí como fonte de nutrientes para as culturas da braquiária e soja após o período de incubação**

No estudo I foi discutido a caracterização dos coprodutos bem como o efeito de suas aplicações nos teores de macronutrientes do solo durante um período de incubação de 140 dias. O estudo II é uma continuação do estudo I, onde é apresentado e discutido os efeitos dos coprodutos aplicados no acúmulo de nutrientes e produtividade de dois cultivos de brachiária e um de soja que foram cultivadas após o período de incubação. Além disso, são apresentados os índices de vegetação da brachiária e soja que foram submetidas a aplicação dos coprodutos, como forma complementar de avaliação do efeito desses materiais no desenvolvimento das plantas.

### **6.2.1. Produção de massa seca da parte aérea do primeiro cultivo da brachiária e seus acúmulos e teores de macro e micronutrientes**

Encontra-se na Figura 23 os resultados médios da produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e os acúmulos de N, P, K, Ca, Mg e S do primeiro corte da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração.

Observa-se que a aplicação dos coprodutos aumentou a MSPA da brachiária nas duas classes de solos avaliadas. No LVdf, o tratamento T4 foi o mais eficiente em incrementar os valores de MSPA, sendo responsável por 31% de aumento para essa variável quando comparado ao tratamento testemunha (T1). Tal fato deve-se a maior efetividade desse insumo em aumentar o pH, bem como disponibilizar Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e P para o LVdf (Tabelas 11, 12 e 14). Para os demais coprodutos, o incremento se deu pela disponibilização de grande parte dos demais nutrientes avaliados.

Já no RQo, os tratamentos T3 e T7, compostos predominantemente de siltito argiloso, foram os mais eficientes em aumentar a produção de MSPA da brachiária, sendo responsáveis pelo ganho de 20% em relação ao tratamento testemunha (T1) dessa classe. Embora não houve diferença entre os tratamentos T3 e T7 quanto aos teores de K<sup>+</sup> trocável no RQo (Tabela 10), a presença da brachiária possivelmente aumentou a taxa de liberação do K<sup>+</sup> não trocável dos minerais potássicos presentes no siltito argiloso, o que possibilitou maior produção de MSPA pela melhor nutrição da planta, assim como relatado por Garcia et al. (2008). Segundo Britzke et al. (2012), quando a solução e o K<sup>+</sup> trocável são reduzidos a níveis baixos pela absorção da planta e/ou lixiviação do solo, o K<sup>+</sup> não trocável pode ser liberado das camadas intermediárias de argila, o que permite melhores condições nutricionais e, consequentemente, maior produtividade. Ademais, esses resultados são corroborados por diversos estudos que demonstram o potencial de utilização de rochas silicáticas e/ou coprodutos da mineração na produtividade de culturas, como: brachiária (MARTINS et al., 2015b), milho (ABOU-EL-SEoud; ABDEL-MEGEED, 2012) e cana-de-açúcar (BEERLING et al., 2018).

Já para o fator classe de solo, observa-se que as plantas cultivadas no LVdf apresentaram valores menores de MSPA. Por ser um solo muito argiloso, que foi inicialmente desestruturado para a disposição nos vasos, o LVdf apresentava-se visualmente bastante adensado, o que pode ter ocasionado impedimento físico para o desenvolvimento de raízes e, consequentemente, prejudicado a absorção de nutrientes e produção de MSPA nessa classe. Nesse sentido, Medeiros; Soares; Guimarães (2005) ao avaliar o efeito de níveis de compactação no desenvolvimento do arroz, em condições de vaso, encontraram decréscimo na produção de MSPA dessa planta em condições de aumento da compactação.

Nota-se na Figura 23 que no LVdf não houve diferença entre os insumos para a variável acúmulo de N na parte aérea da brachiária. Já no RQo, embora os insumos utilizados não sejam fontes de N, a aplicação do tratamento T4 foi responsável por aumento de 23% do N acumulado em relação ao tratamento testemunha (T1) dessa classe. Tais resultados podem ter ocorrido pelo maior valor de pH encontrado no tratamento T4 no RQo, o que possibilitou, possivelmente, melhores condições de mineralização da matéria orgânica do solo, que é responsável pela maior parte do nitrogênio disponível para as plantas (GOULDING, 2016). Quanto ao fator classe de solo, a maior produção de MSPA da brachiária no RQo, proporcionou os maiores valores acumulados de N nessa classe.

Para a variável acúmulo de P (Figura 23), nota-se que somente no RQo houve diferença entre os coprodutos. Observa-se ainda que a aplicação do tratamento T4 apresentou os maiores

valores, diferindo dos tratamentos T5 e T6 em 26 e 37%, respectivamente. Esses resultados se devem, possivelmente, da interação sinérgica entre P e N (SHUMAN, 2000), já que no RQo, a aplicação do tratamento T4 também possibilitou os maiores acúmulos de N, comparado aos tratamentos T5 e T6 (Figura 23). A absorção de  $\text{NO}_3^-$  é um processo ativo, que requer energia metabólica para o transporte contra o gradiente de potencial eletroquímico, necessitando de substâncias redutoras e de ATP (KLEINHOFS; WARNER, 1990). Quanto ao fator classe de solo, nota-se que o RQo apresentou os maiores valores de acúmulo de P, corroborando aos maiores teores de P disponíveis nessa classe (Tabela 14).

Para a variável K acumulado (Figura 23), a aplicação dos tratamentos T3, T5 e T6 no LVdf apresentou os maiores valores, em média, 28 % superiores aos encontrados no tratamento testemunha (T1) dessa classe. Para os dois primeiros tratamentos, os resultados se devem, possivelmente, aos maiores teores disponíveis de  $\text{K}^+$  (Mehlich-1) advindos da aplicação desses insumos (Tabela 10). Quanto ao fator classe de solo, nota-se que os valores de K acumulados pela brachiária foram maiores no LVdf, corroborando aos maiores teores disponíveis de  $\text{K}^+$  nessa classe (Tabela 10).

Para o acúmulo de Ca pela brachiária, somente no RQo houve diferença entre os coprodutos aplicados (Figura 23). Nesse solo, as aplicações dos tratamentos T2, T3, T4 e T7 apresentaram os maiores valores, diferindo do tratamento testemunha (T1), na média, em 35%. Para os tratamentos T2 e T4, esses resultados eram esperados, já que esses insumos foram posicionados como fontes de  $\text{Ca}^{2+}$  (Tabela 4) para as plantas. Já os tratamentos T3 e T7, mesmo não sendo caracterizados majoritariamente como fontes de  $\text{Ca}^{2+}$ , a maior produção de massa seca da parte aérea nesses tratamentos (Figura 23) contribuiu para tais resultados, já que o acúmulo se dá pelo produto da multiplicação do teor do nutriente pela produção de massa seca da parte aérea. Nesse sentido, de Melo Silva et al. (2017) ao estudar resíduo da mineração de gipsita em Pernambuco encontraram quantidades significativas de CaO e concluíram que tais materiais podem ser aproveitados na agricultura, aumentando a sustentabilidade local. Martins et al. (2015b) ao avaliar a aplicação de pós de rochas ultramáficas no solo encontraram aumento significativos nos teores de  $\text{Ca}^{2+}$  do solo.

Quanto ao fator classe de solo, foi observado que os acúmulos de Ca pela brachiária foram maiores no RQo, mesmo com menores teores de  $\text{Ca}^{2+}$  disponíveis nessa classe (Tabela 11). Esses resultados se devem, possivelmente, da interação antagônica entre absorção de K e Ca, já que no LVdf ocorreram os maiores acúmulo de K, o que prejudicou o acúmulo de Ca pelas plantas (NGUYEN; MANEEPONG; SURANINPONG, 2017).

Para a variável acúmulo de Mg (Figura 23), observa-se que somente no RQo houve diferença entre os insumos, em que as aplicações dos tratamentos T2, T4, T6 e T7 apresentaram os maiores valores, aproximadamente 200% maiores aos obtidos no tratamento testemunha (T1) dessa classe. Esses resultados são corroborados pelos maiores teores disponíveis de Mg<sup>2+</sup> com a aplicação desses coprodutos no RQo (Tabela 12). Além disso, trabalhos demonstram o potencial da aplicação de materiais, como pós de rochas ultramáficas (MARTINS et al., 2015b) e basalto (MELO et al., 2012b) como fontes de Mg<sup>2+</sup>.

Quanto ao fator classe de solo, de forma semelhante ao ocorrido para o Ca, nota-se que a aplicação dos coprodutos no RQo apresentou os maiores acúmulos de Mg, mesmo com menores teores disponíveis de Mg<sup>2+</sup> nessa classe. Tal fato ocorreu, provavelmente, pela interação antagônica entre absorção de K e Mg, já que no LVdf ocorreu os maiores acúmulo de K, o que interferiu negativamente no acúmulo de Mg (NGUYEN; MANEEPONG; SURANINPONG, 2017). Além disso, esperava-se que a brachiária acumulasse maiores quantidades de Ca do que Mg, assim como reportado por outros autores (BRAZ et al., 2004; SILVA et al., 2009). No entanto, pôde-se observar, principalmente no RQo, que as plantas cultivadas nessa classe acumularam maiores quantidades de Mg, o que demonstra que o K interferiu mais negativamente na absorção de Ca, ao contrário do que ocorreu no trabalho de Veloso et al. (2001) ao estudarem o efeito de doses de potássio no acúmulo de cálcio e magnésio pelo milho.

Para o acúmulo de S (Figura 23) na parte aérea da brachiária cultivada no LVdf, a aplicação dos tratamentos T3 e T4 apresentaram os maiores valores acumulados de S, os quais, foram responsáveis por ganho de aproximadamente 50% de S acumulado em relação a testemunha (T1) dessa classe. Para o tratamento T4, isso era esperado, já que esse insumo foi um dos mais eficientes em fornecer S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ao solo (Tabela 13). Já no RQo, a aplicação dos tratamentos T4, T5, T6 e T7 proporcionaram os maiores valores e foram responsáveis por um incremento entre 63 e 78 % no S acumulado quando comparado ao tratamento testemunha (T1) dessa classe, o que evidencia o potencial de utilização de rochas em pó como fontes alternativas de S (NORTON; MIKKELSEN; JENSEN, 2013).

Quanto ao fator classe de solo, com exceção dos tratamentos T1 e T3, o RQo foi a classe que apresentou os maiores valores acumulados de S, diferindo estatisticamente dos demais. Isso ocorreu, principalmente pela maior produção de MSPA no RQo (Figura 23).

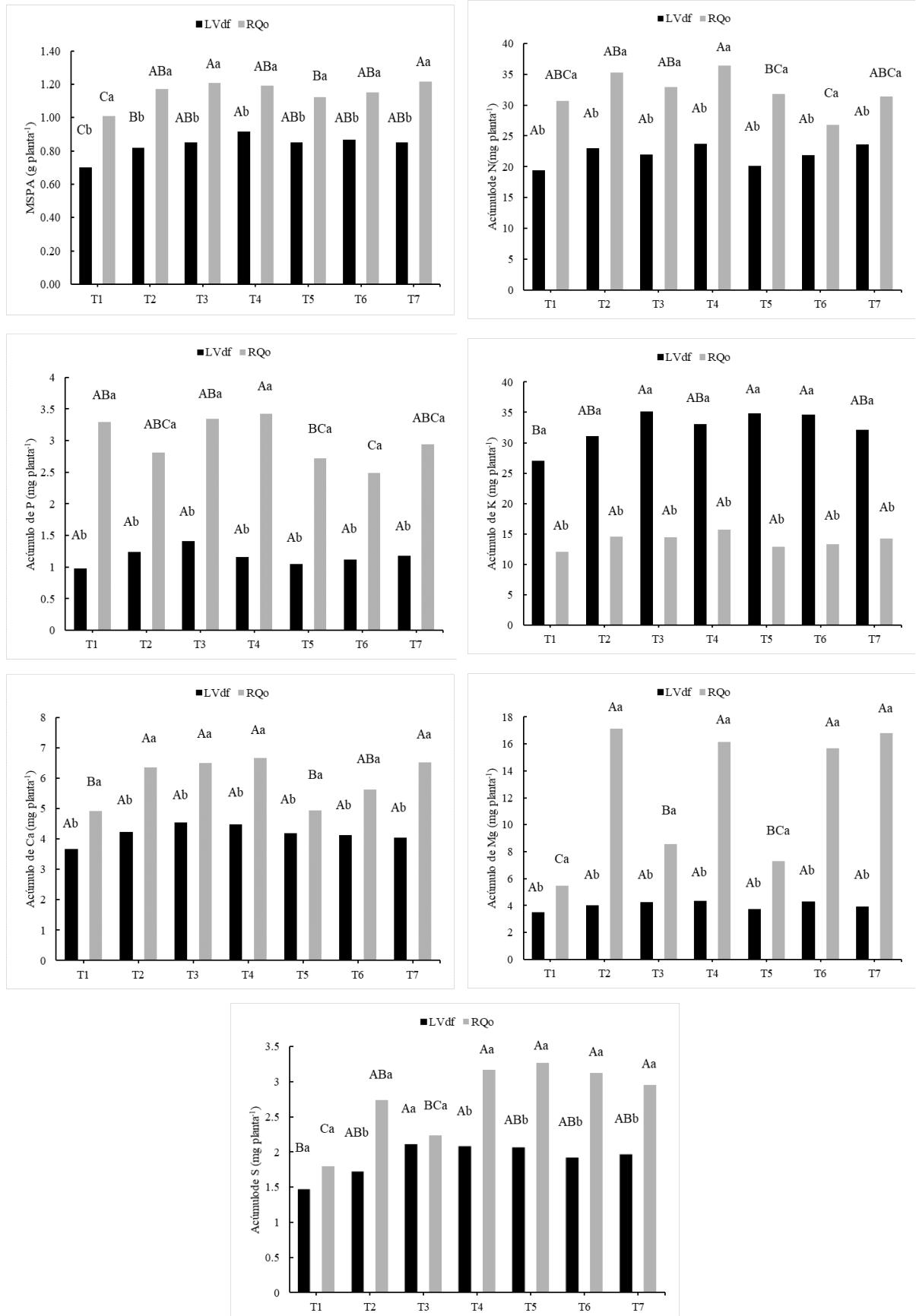


Figura 23. Produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S na parte aérea do primeiro cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da

mineração em duas classes de solo. \*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula para fator tipo de coproduto e minúscula para fator classe de solo, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproduto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

Na Figura 24 encontram-se os acúmulos de micronutrientes da parte aérea das plantas de brachiária (primeiro cultivo) cultivadas após a aplicação dos coprodutos da mineração. Para a variável acúmulo de Cu, nota-se, no LVdf, que a aplicação do tratamento T5, comparado ao tratamento testemunha (T1), possibilitou aumento de 62% nos valores acumulados de Cu. Sabe-se que o aumento do pH promove condições para que o Cu se adsorva especificamente na fase sólida do solo, diminuindo a sua disponibilidade para as plantas e acúmulo na parte aérea (ABREU et al., 2007). Essa menor capacidade de elevar o pH do solo do tratamento T5 (Tabela 9), além do aporte de micronutrientes presentes no folhelho pirobetuminoso (ASSMANN, 1995; RODRIGUES, 2017), proporcionaram maiores acúmulos de Cu com a aplicação do tratamento T5. Nesse sentido, Wallace et al. (1980) encontraram maiores acúmulos de Cu em plantas de soja submetidas a aplicação de materiais contendo pirita. Quanto ao fator classe de solo, nota-se, de forma geral, que as plantas cultivadas no RQo obtiveram maiores acúmulos de Cu, muito em função da maior produção de MSPA nessa classe.

Para a variável acúmulo de Fe, observa-se (Figura 24) que a aplicação dos coprodutos, de forma geral, aumentou os valores acumulados de Fe. No LVdf e RQo, comparado ao tratamento testemunha (T1), os coprodutos contribuíram, respectivamente, com um acréscimo de 76 e 66%. No caso dos coprodutos constituídos de folhelho pirobetuminoso e ritmito, esses resultados eram esperados, já que tais rochas apresentam pirita em sua constituição (Figura 21), que, quando oxidada no solo, libera  $\text{Fe}^{2+}$  (PEREIRA et al., 2016a). Quanto ao fator classe de solo, na maioria das situações, observa-se que as plantas cultivadas no RQo obtiveram maiores acúmulos de Fe, principalmente pela maior produção de MSPA nessa classe (Figura 23).

Em relação ao acúmulo de Mn pela parte aérea da brachiária, observa-se na Figura 24, de forma geral, que a aplicação dos coprodutos diminuiu os valores acumulados desse nutriente nas plantas cultivadas no RQo. Isso se deu, possivelmente, pelo aumento do pH do solo submetido a aplicação dos coprodutos, principalmente os que apresentam ritmito em sua constituição (T2, T4, T6 e T7) (Tabela 9). Desse modo, a elevação do pH do solo promoveu a precipitação do Mn no solo na forma de oxi-hidróxidos, diminuindo a disponibilidade para as

plantas (VAN RAIJ, 2011). Para o fator classe de solo, as plantas cultivadas no RQo apresentaram, na maioria das situações, os maiores valores acumulados desse nutriente.

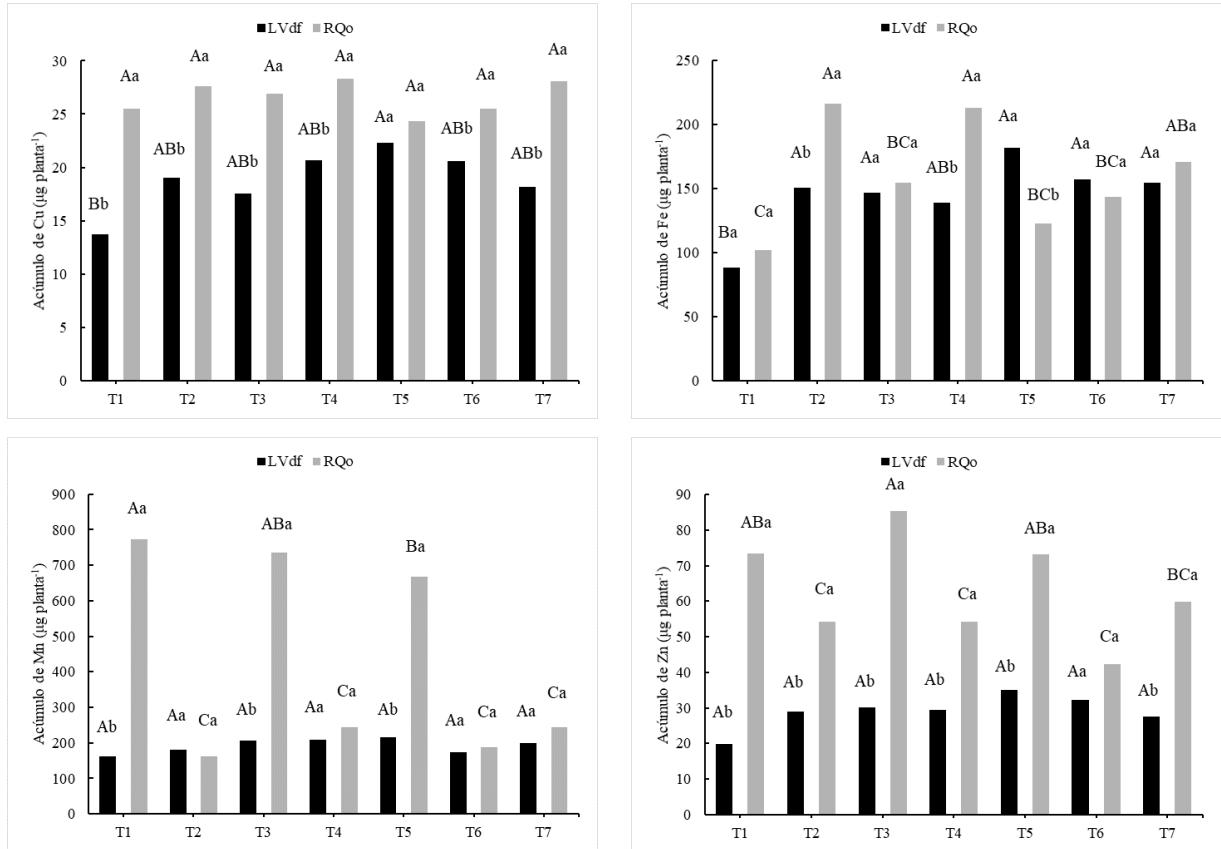


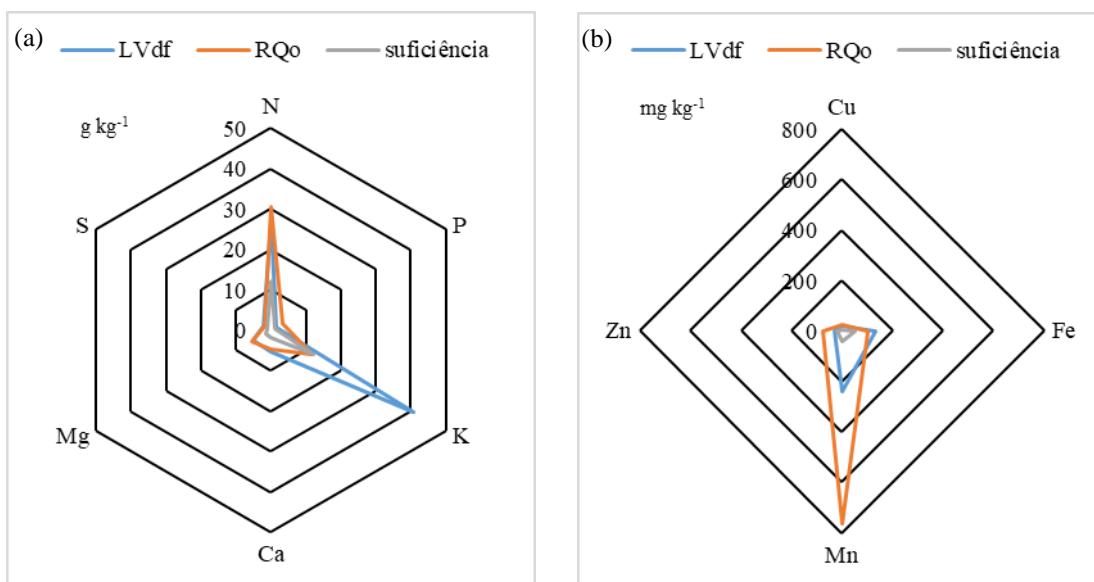
Figura 24. Acúmulo de Cu, Fe, Mn e Zn pela parte aérea do primeiro cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. \*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula para fator tipo de coproducto e minúscula para fator classe de solo, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproducto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

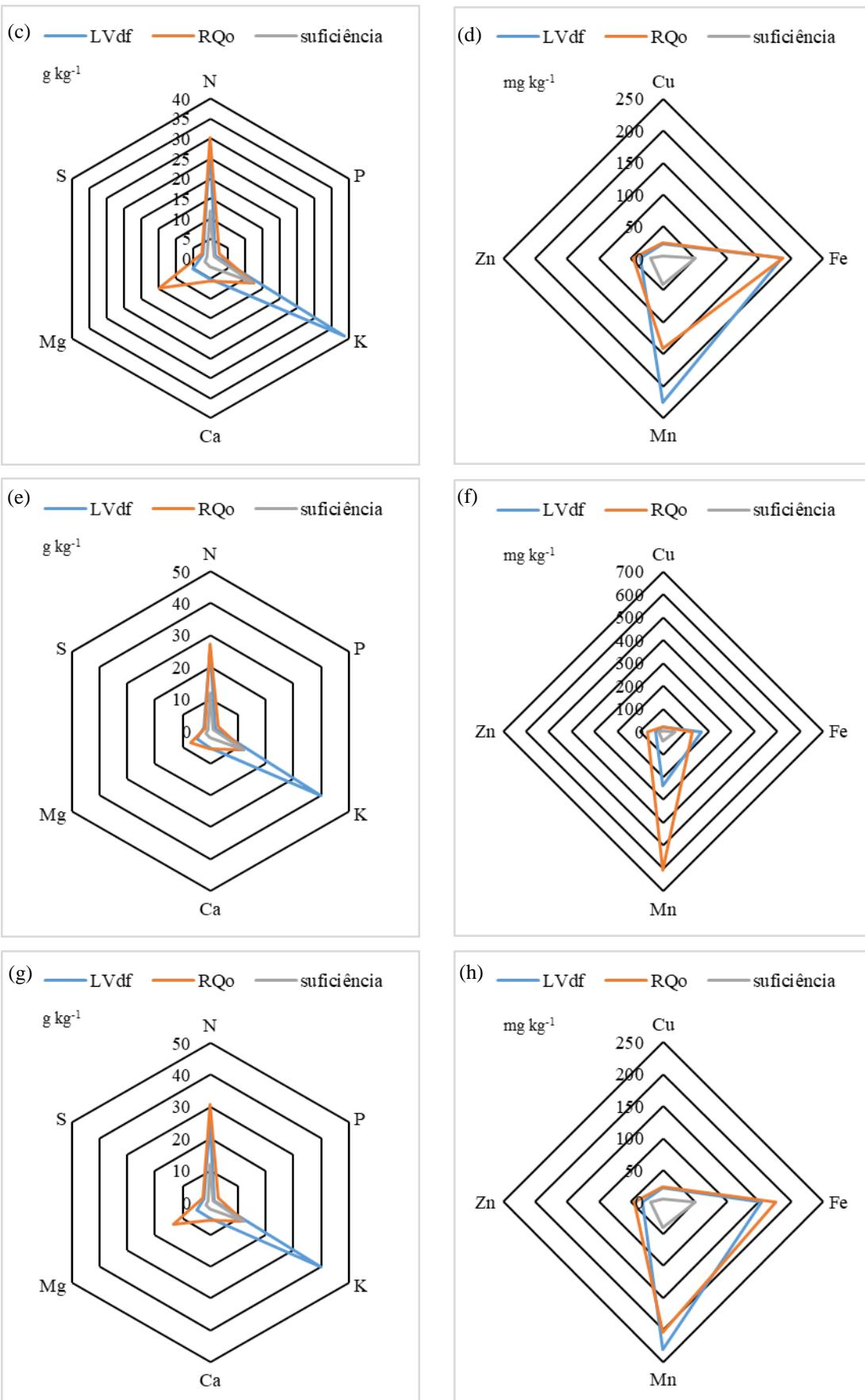
Para a variável acúmulo de Zn, nota-se (Figura 24) que a aplicação dos coprodutos, no geral, diminuiu os valores acumulados desse nutriente no RQo. De forma semelhante ao ocorrido para a variável acúmulo de Mn, o aumento do pH ocasionado com a aplicação dos tratamentos que continham ritmito em sua constituição (T2, T4, T6 e T7) diminuiu a disponibilidade de Zn no solo através da adsorção específica desse nutriente no solo (ABREU et al., 2007). Ademais, pode ter ocorrido interação antagônica entre Fe e Zn, uma vez que trabalhos demonstram redução na concentração de Zn em arroz (VERMA; TRIPATHI, 1983) e trigo (GHASEMI-FASAEI; RONAGHI, 2008) devido a aplicação de Fe no solo, resultados semelhantes aos obtidos no presente trabalho, já que as plantas cultivadas após a aplicação dos

coprodutos contendo ritmito (T2, T4, T6 e T7) apresentaram maiores acúmulo de Fe e menores acúmulos de Zn (no RQo). Quanto ao fator classe de solo, assim como para o acúmulo de Cu, Fe e Mn, as plantas cultivadas no RQo apresentaram maiores valores acumulados de Zn.

A utilização do fertigrama é uma forma simples de demonstrar a condição nutricional da planta quanto aos seus níveis de suficiências (FAQUIN, 2005). A interpretação é feita pela comparação entre o polígono regular formado pela ligação dos pontos dos níveis de suficiência e o formado pelos dados dos tratamentos. No presente estudo, optou-se por demonstrar e discutir mais profundamente o efeito dos tratamentos somente quanto ao acúmulo dos nutrientes (Figuras 23 e 24), que é o resultado da multiplicação dos teores pela produção de massa seca. Ou seja, o comportamento entre os tratamentos para as variáveis acúmulo e teor, na maioria das situações, são semelhantes.

Na Figura 25 estão descritos os fertigramas referentes aos teores de macro e micronutrientes do primeiro corte da brachiária cultivada após a aplicação dos coprodutos em duas classes de solo (RQo e LVdf). A interpretação do status nutricional das plantas por meio de seus teores nas plantas pode ser equivocada quando existe efeito de concentração e/ou diluição dos nutrientes pela baixa e/ou alta relação crescimento da planta/absorção do nutriente, respectivamente (MAIA et al., 2005). Contudo, desprezando esses possíveis efeitos, pode-se notar, para todos os tratamentos, níveis de macro e micronutrientes considerados suficientes para essa cultura (WERNER; PAULINO; CANTARELLA, 1996), o que demonstra que a adubação realizada se mostrou eficiente para o bom desenvolvimento da cultura, o que é confirmado com a alta produção de biomassa (Figura 26).





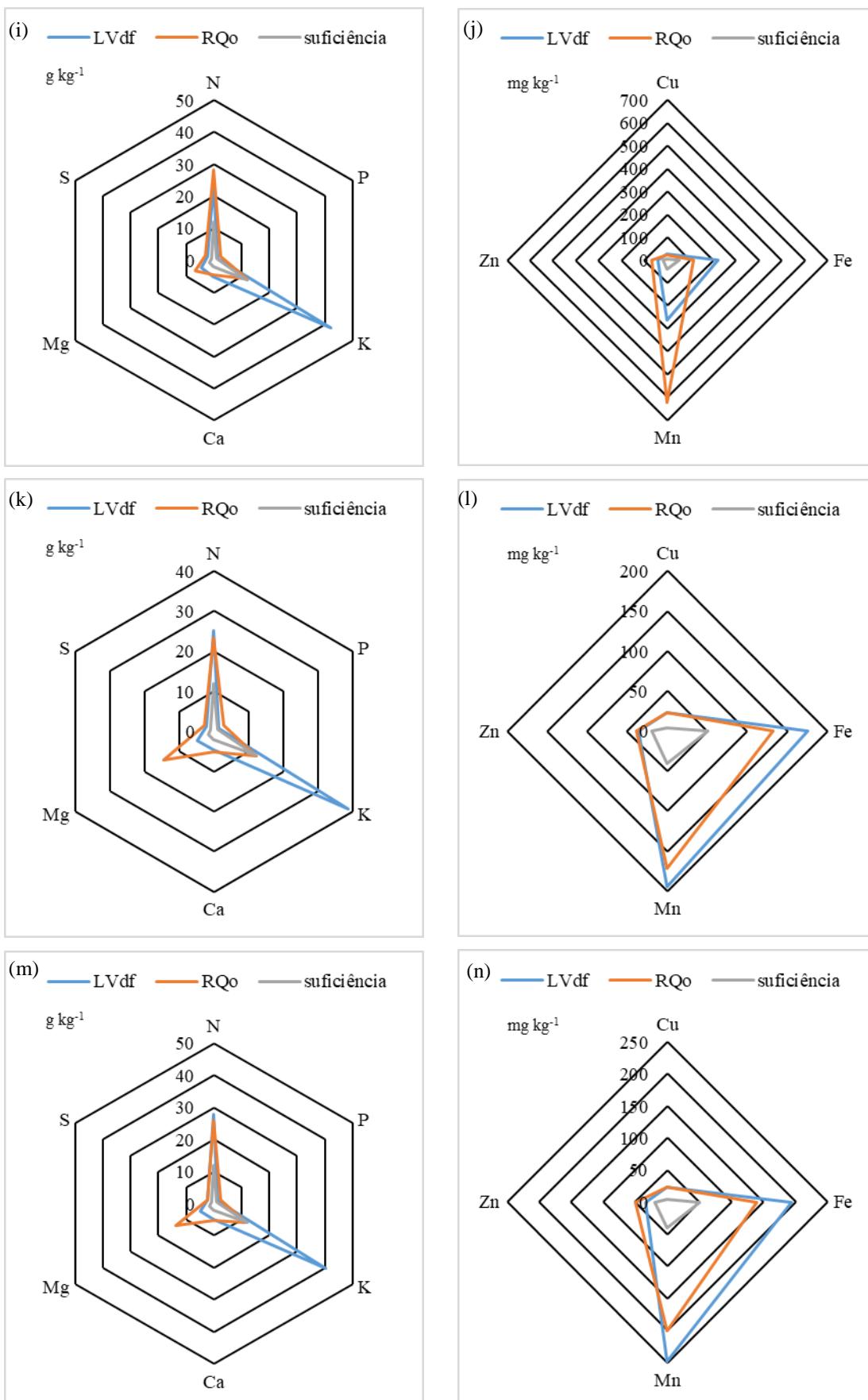


Figura 25. Fertigrama com os teores médios de nutrientes da parte aérea do primeiro cultivo da brachiária cultivada no LVdf e RQo com seus respectivos níveis de suficiência (folha recém expandida) para os tratamentos: T1 (a-b), T2 (c-d), T3 (e-f), T4 (g-h), T5 (i-j), T6 (k-l) e T7 (m-n).



Figura 26. Desenvolvimento vegetativo do primeiro cultivo da brachiária (30 DAS) submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.

### 6.2.2. Índices de vegetação do primeiro corte da brachiária

Observa-se na Tabela 16 os índices de vegetação da cultura da brachiária 40 dias após a semeadura. Nota-se que a comparação entre as médias dos tratamentos demonstrou pouca variação dos IV's entre os tratamentos. Esses resultados podem estar relacionados ao status nutricional das plantas, que estiveram, na maioria das situações, em condições de suficiência quanto aos teores dos nutrientes avaliados (WERNER; PAULINO; CANTARELLA, 1996) (Figura 25), o que dificulta a geração de IV's que captam a pequena variabilidade existente entre as plantas que possuem alta capacidade fotossintética (YENGOH et al., 2015).

Para o NDVI, pôde-se observar que somente para o fator classe de solo houve diferença estatística entre os tratamentos, em que a aplicação do T6 e T7 no RQo possibilitou os maiores

valores de NDVI (0,71). Esses resultados ocorreram, possivelmente, devido as melhores condições de desenvolvimento da brachiária, haja visto os maiores acúmulos de N, P, Ca, Mg, S, Cu e as maiores MSPA obtidas por tais tratamentos (Figura 24). Assim, embora as plantas estivessem em condições de suficiência nutricional, o maior desenvolvimento das plantas pela maior produção de MSPA permitiram alterações no comportamento espectral dessas, o que ocasionou maiores valores desse IV (KUCKENBERG; TARTACHNYK; NOGA, 2009).

Para a variável GNDVI (Tabela 16), observa-se para o fator tipo de coproduto que a aplicação do tratamento T2 no LVdf apresentou os maiores valores (0,68), diferindo do tratamento T5 (0,63). Já no RQo, os maiores valores de GNDVI ocorreram com a aplicação dos tratamentos T3 e T7 (0,69) que diferiram dos tratamentos T4 e T5 (0,64). Assim como para o NDVI, os maiores valores de GNDVI em tais tratamentos ocorreram, possivelmente, pelo melhor vigor vegetativo das plantas submetidas a esses coprodutos, uma vez que em tais tratamentos as plantas apresentaram maior MSPA. Quanto ao fator classe de solo, nota-se que a aplicação do tratamento T7 no RQo, assim como ocorreu para o NDVI, apresentou os maiores valores (0,69), diferindo do LVdf (0,64), o que demonstra a sensibilidade desse IV em captar alterações no desenvolvimento da planta, como a produtividade (MORENO-GARCÍA et al., 2018). Ademais, esses resultados sugerem que o GNDVI é mais sensível que o NDVI para captar as diferenças no comportamento espectral das plantas, como citado por Gitelson; Kaufman; Merzlyak (1996). Tal fato se dá pela banda do verde, que é utilizada pelo GNDVI, ser mais sensível em identificar a clorofila das plantas do que a banda do vermelho (NDVI).

Em relação a variável RVI (Tabela 16), pôde-se observar efeito isolado do fator classe de solo, em que a aplicação dos tratamentos T6 e T7 no RQo apresentaram os maiores valores (6,07 e 5,98, respectivamente), diferindo estatisticamente nesses tratamentos do LVdf (5,17 e 5,27, respectivamente). Assim como para o NDVI, tais resultados ocorreram, possivelmente, em função das melhores condições de desenvolvimento da brachiária, haja visto os maiores acúmulos de N, P, Ca, Mg, S, Cu e as maiores MSPA obtidas nos tratamentos T6 e T7 no RQo (Figuras 24 e 25). Nesse sentido, Simões et al. (2005) estudando RVI coletado pelo sensor ETM+/LANDSAT encontraram correlação de 84% desse IV com a variável produção de biomassa da cana-de-açúcar. Já Patil; Patil; Al-Gaadi (2010), utilizando espectroradiômetro terrestre, encontraram correlação de 89% entre o RVI e a produtividade de trigo.

Para o GRVI (Tabela 16), pode-se notar, no RQo, que a aplicação do tratamento T3 apresentou os maiores valores (5,63), diferindo estatisticamente dos tratamentos T4 e T5, o que pode estar relacionado as maiores produções de MSPA no tratamento T3 e confirma a relação

desse IV com aspectos nutricionais (MARESMA et al., 2016), os quais, são diretamente relacionados a produtividade. Quanto ao fator classe de solo, pode-se observar que as plantas cultivadas com a aplicação dos tratamentos T6 e T7 apresentaram, no RQo, os maiores valores de GRVI, em média, 16% maiores aos obtidos no LVdf, o que evidencia a capacidade desse IV em captar diferenças relacionadas a maior MSPA no RQo, como foi o caso da aplicação dos tratamentos T6 e T7 nessa classe (Figura 24).

Tabela 16. Valores médios de IV's de folhas da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.

Solo	Tratamentos						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
NDVI							
LVdf	0,70 Aa	0,69 Aa	0,69 Aa	0,70 Aa	0,67 Aa	0,67 Ab	0,68 Ab
RQo	0,71 Aa	0,71 Aa	0,72 Aa	0,68 Aa	0,68 Aa	0,71 Aa	0,71 Aa
GNDVI							
LVdf	0,67 ABa	0,68 Aa	0,67 ABa	0,67 ABa	0,63 Ba	0,64 ABa	0,64 ABb
RQo	0,68 ABa	0,68 ABa	0,69 Aa	0,64 Ba	0,64 Ba	0,67 ABa	0,69 Aa
RVI							
LVdf	5,84 Aa	5,58 Aa	5,60 Aa	5,69 Aa	5,18 Aa	5,17 Ab	5,27 Ab
RQo	6,03 Aa	5,87 Aa	6,11 Aa	5,24 Aa	5,18 Aa	6,07 Aa	5,98 Aa
GRVI							
LVdf	5,21 Aa	5,05 Aa	5,02 Aa	5,16 Aa	4,47 Aa	4,57 Ab	4,62 Ab
RQo	5,32 ABa	5,26 ABa	5,63 Aa	4,61 Ba	4,65 Ba	5,26 ABa	5,44 ABa
GNIR							
LVdf	0,20 Aa	0,20 Aa	0,21 Aa	0,20 Aa	0,23 Aa	0,22 Aa	0,22 Aa
RQo	0,19 ABa	0,19 ABa	0,18 Bb	0,22 Aa	0,22 ABa	0,20 ABa	0,19 ABb
RNIR							
LVdf	0,17 Aa	0,18 Aa	0,18 Aa	0,18 Aa	0,20 Aa	0,19 Aa	0,19 Aa
RQo	0,17 Aa	0,18 Aa	0,17 Aa	0,19 Aa	0,20 Aa	0,17 Aa	0,17 Aa
IRVI							
LVdf	0,10 ABa	0,11 ABa	0,11 ABa	0,12 ABa	0,13 Aa	0,09 Bb	0,11 ABa
RQo	0,10 Aa	0,11 Aa	0,11 Aa	0,11 Aa	0,12 Aa	0,12 Aa	0,12 Aa

\* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator tipo de coproducto) e minúscula na coluna (fator classe de solo), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproduto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

Em relação ao GNIR (Tabela 16), a aplicação do tratamento T4 no RQo apresentou os maiores valores (0,22), que diferiram do tratamento T3 (0,18). Esses resultados podem estar relacionados aos menores valores encontrados de acúmulo de Mn e Zn no tratamento T4 (RQo) (Figura 25), uma vez que maiores valores desse IV estão relacionados a déficits nutricionais das plantas, conforme discutido por Carvalho Gasparotto et al. (2015). Quanto ao fator classe de solo, nota-se que as plantas cultivadas com a aplicação dos tratamentos T3 e T7 no LVdf apresentaram valores de GNIR 16% maiores em relação ao RQo, o que demonstra a relação inversa desse IV com a produtividade e com o acúmulo de N, P, Ca, Mg e Zn, já que as plantas cultivadas no LVdf apresentaram menores valores dessas variáveis (Figura 24 e 25).

Para o RNIR (Tabela 16) não foi observado efeito dos fatores classe de solo e tipo de coproducto nos índices de vegetação. Já para o IRVI, nota-se que a aplicação do tratamento T5 no LVdf possibilitou que as plantas de brachiária apresentassem valores desse IV 44% superiores aos encontrados com a aplicação do tratamento T6. Esses resultados não demonstram a relação desse IV com a produção de MSPA e os acúmulos de macro e micronutrientes avaliados em tais tratamentos, diferentemente do reportado por outros autores (CARNEIRO et al., 2019a; COELHO; ROSALEN; FARIA, 2018). Em relação a classe de solo, a aplicação do tratamento T6, no RQo, proporcionou que as plantas cultivadas nessa classe apresentassem valores de IRVI 33% maiores aos do LVdf, o que é corroborado com a maior produção de MSPA da brachiária cultivada nesse tratamento (Figura 24).

#### **6.2.3. Produção de massa seca da parte aérea do segundo cultivo da brachiária e seus acúmulos e teores de macro e micronutrientes**

Encontra-se na Figura 27 os valores médios de produção de MSPA e acúmulos de N, P, K, Ca, Mg e S do segundo cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração.

Para a variável produção de MSPA, pôde-se observar que as aplicações dos coprodutos no LVdf (exceto tratamentos T6 e T7) proporcionaram aumento de 36% na produtividade do segundo cultivo da brachiária. Já no RQo, todos os coprodutos possibilitaram aumento na produção da brachiária (+86%). Os efeitos benéficos da aplicação dos coprodutos no aumento de nutrientes no solo e na planta possibilitaram melhor nutrição dessas e, consequentemente, maior potencial produtivo.

Comparado ao primeiro cultivo (Figura 24), percebe-se que a efetividade dos coprodutos no incremento da produção de MSPA da brachiária foi ainda maior no segundo corte, já que o esgotamento das reservas de nutrientes no tratamento testemunha decorrente da

exportação pela parte aérea no primeiro corte ficou ainda mais evidente. No mesmo sentido, tais resultados demonstram que a liberação gradual de nutrientes pelas fontes pouco solúveis, como os coprodutos, se mostrou bastante eficaz, o que reforça a ideia do efeito residual do uso de pós de rocha discutido na literatura por diversos autores como Martins et al. (2010) e Souza (2014).

Para o fator classe de solo, de forma geral, as plantas cultivadas no LVdf apresentaram maiores produções de MSPA, ao contrário do que ocorreu no primeiro cultivo (Figura 24). O maior tamponamento do LVdf contribuiu para menor esgotamento dos nutrientes ocasionados pela exportação dos dois cultivos da brachiária, permitindo que as plantas cultivadas nessa classe se mostrassem melhores nutridas, o que é confirmado pela suficiência nos teores de todos os nutrientes avaliados (Figura 30).

Para o acúmulo de N pela parte aérea da brachiária (Figura 27), de forma geral, não foram observadas diferenças entre os tratamentos, o que era esperado, já que os coprodutos aplicados não se caracterizam como fontes desse nutriente.

Em relação a variável acúmulo de P (Figura 27), somente houve efeito do fator classe de solo, no qual, as plantas cultivadas no RQo, assim como no primeiro cultivo, apresentaram maiores acúmulos desse nutriente. A maior disponibilidade de P no RQo (Tabela 14) possibilitou esses resultados.

Para o acúmulo de K pela parte aérea da brachiária (Figura 27), somente no LVdf houve diferença entre os coprodutos. Nessa classe, as aplicações dos tratamentos T3, T6 e T7 proporcionaram incremento médio de 59% no acúmulo desse nutriente. Os tratamentos T3 e T7 também possibilitaram maiores teores de  $K^+$  (Mehlich-1) no solo (Tabela 10), o que pode ter colaborado para maior absorção de K pelas plantas e, consequentemente, acúmulo na parte aérea. Além disso, o cultivo de plantas como a brachiária, com elevada capacidade de absorver  $K^+$ , pode influenciar positivamente na relação entre as reservas de  $K^+$  dos coprodutos, causando liberação de minerais potássicos considerados inicialmente não disponíveis (ROSOLEM; VICENTINI; STEINER, 2012; SIMONSSON; HILLIER; ÖBORN, 2009). Hinsinger; Jaillard (1993) verificaram a formação de vermiculita, em detrimento de ilita no solo da região da rizosfera das raízes de azevém. Segundo os autores, nessas condições, a liberação de  $K^+$  não trocável das entrecamadas da ilita induzida pela ação das raízes das plantas foi quase completa. Desse modo, a ilita presente no siltito argiloso, mesmo inicialmente ser considerada uma fonte de  $K^+$  não trocável, pode ter contribuído no acúmulo de K nas plantas cultivadas após a aplicação desse material. Entre as classes de solo, tal qual no primeiro cultivo, as plantas

cultivadas no LVdf apresentaram maiores acúmulo de K, principalmente pela maior disponibilidade desse nutriente no LVdf (Tabela 10).

Para a variável acúmulo de Ca pela parte aérea do segundo cultivo da brachiária (Figura 27), houve efeito isolado do fator tipo de coproduto. Para esse fator, na classe RQo, pôde-se observar que as aplicações dos tratamentos T2, T4, T5 e T6 proporcionaram incremento de 122% no acúmulo de Ca. Esses resultados foram análogos aos obtidos no primeiro cultivo (Figura 24) e foram decorrentes dos maiores teores de  $\text{Ca}^{2+}$  (Tabela 11) do solo após a aplicação de tais insumos.

Em relação ao acúmulo de Mg (Figura 27), houve efeito tanto do fator tipo de coproduto, quanto do fator classe de solo. Para o primeiro, na classe RQo, pôde-se observar que as aplicações dos coprodutos (exceto T3) possibilitaram aumento no acúmulo de Mg, com destaque para o tratamento T4, que foi o mais eficiente em disponibilizar Mg (+489% em relação a testemunha – T1). Esses resultados foram semelhantes aos obtidos no primeiro cultivo (Figura 24) e foram influenciados pela maior disponibilização de Mg por parte dos coprodutos, como pôde ser notado pelos maiores teores de  $\text{Mg}^{2+}$  do solo (Tabela 12) após a aplicação de tais materiais. Quanto ao fator classe de solo, assim como o ocorrido no primeiro cultivo (Figura 24), as plantas cultivadas após a aplicação dos coprodutos no RQo apresentaram maiores acúmulos de Mg, resultados esses influenciados principalmente pela interação antagônica entre absorção de K e Mg (NGUYEN; MANEEPONG; SURANINPONG, 2017), já que no LVdf houve maiores acúmulos de K.

Quanto ao acúmulo de S pela parte aérea da brachiária, nota-se que somente no RQo houve diferença entre os tratamentos (Figura 27). Nessa classe, as aplicações dos coprodutos T2, T4, T5, T6 e T7 permitiram incremento médio de 220% no acúmulo de S. Tais resultados estão relacionados a pirita presente nesses coprodutos (ritmito e folhelho pirobetuminoso). Quanto ao fator classe de solo, de forma geral, a aplicação dos coprodutos possibilitou maiores acúmulos de S nas plantas cultivadas no RQo, assim como o apresentado no primeiro cultivo (Figura 24).

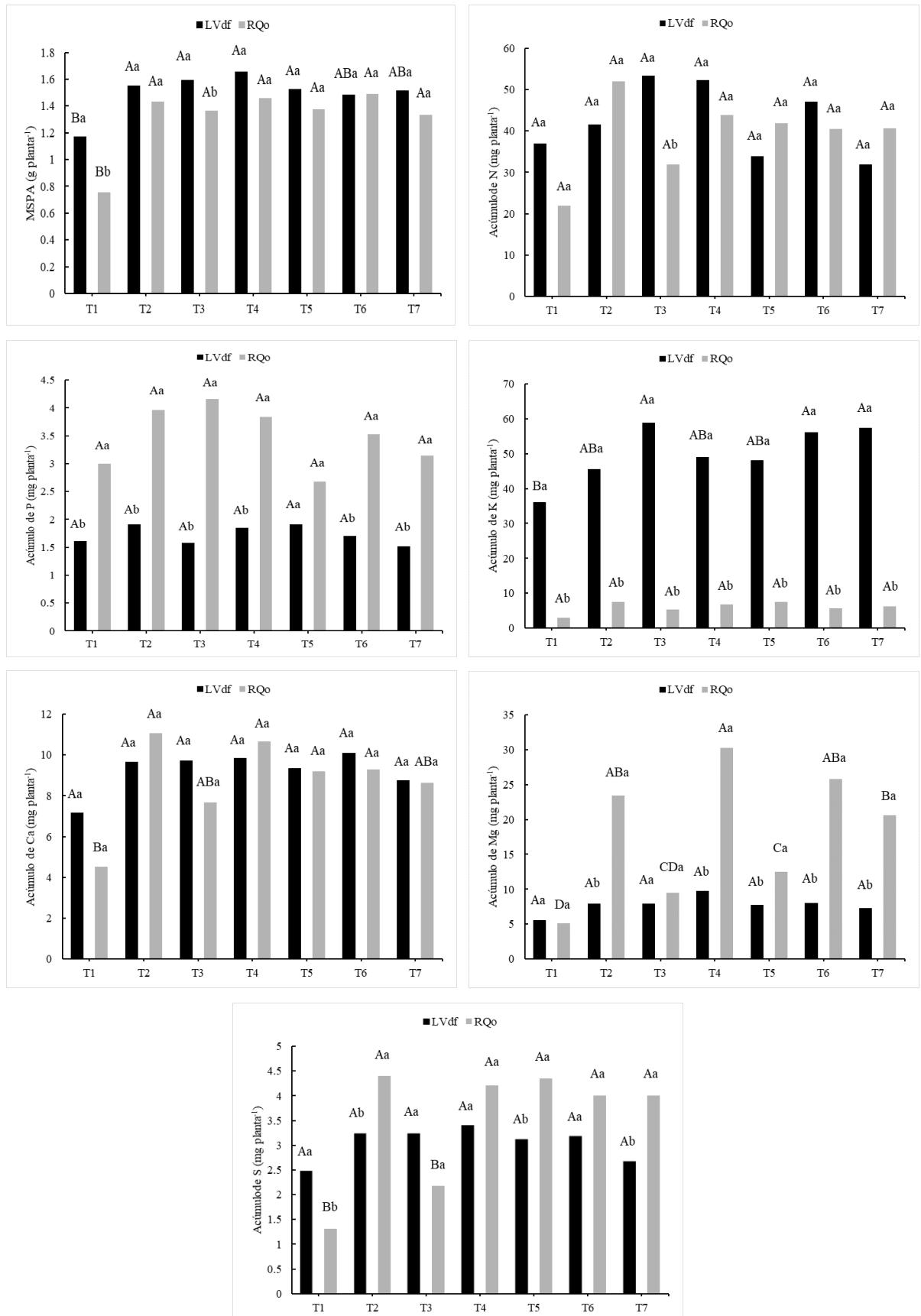
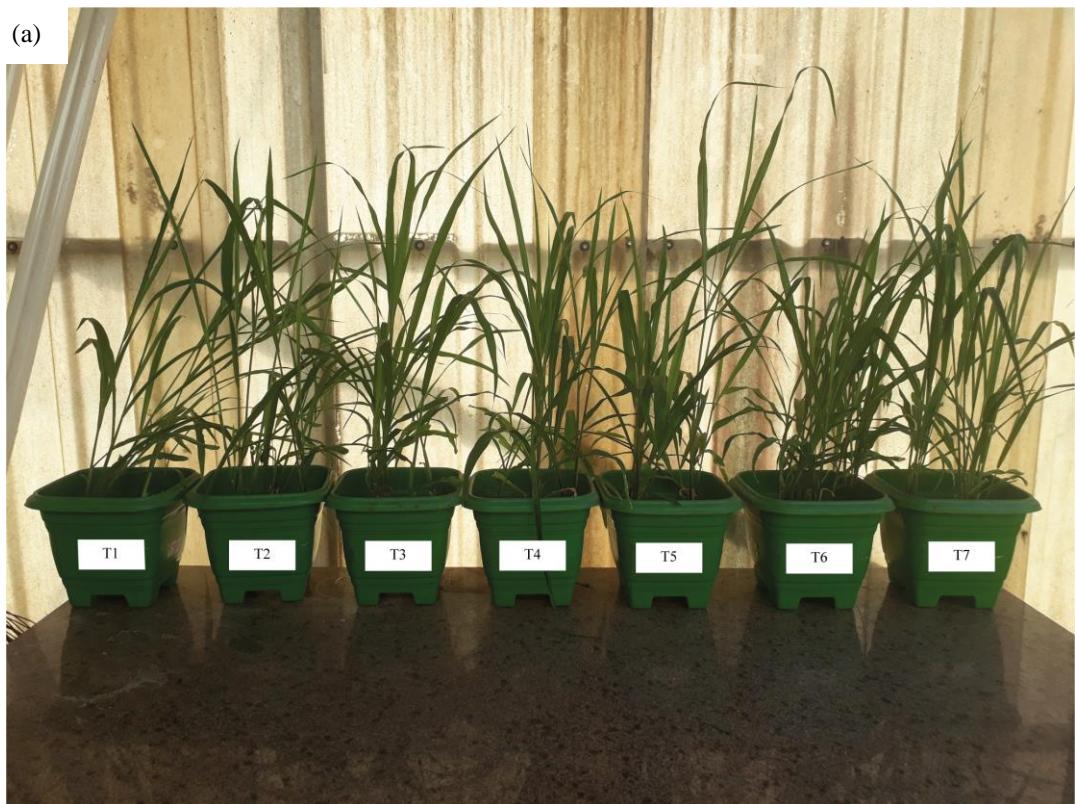


Figura 27. Produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S na parte aérea do segundo cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da

mineração em duas classes de solo. \*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula para fator tipo de coproduto e minúscula para fator classe de solo, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproduto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.



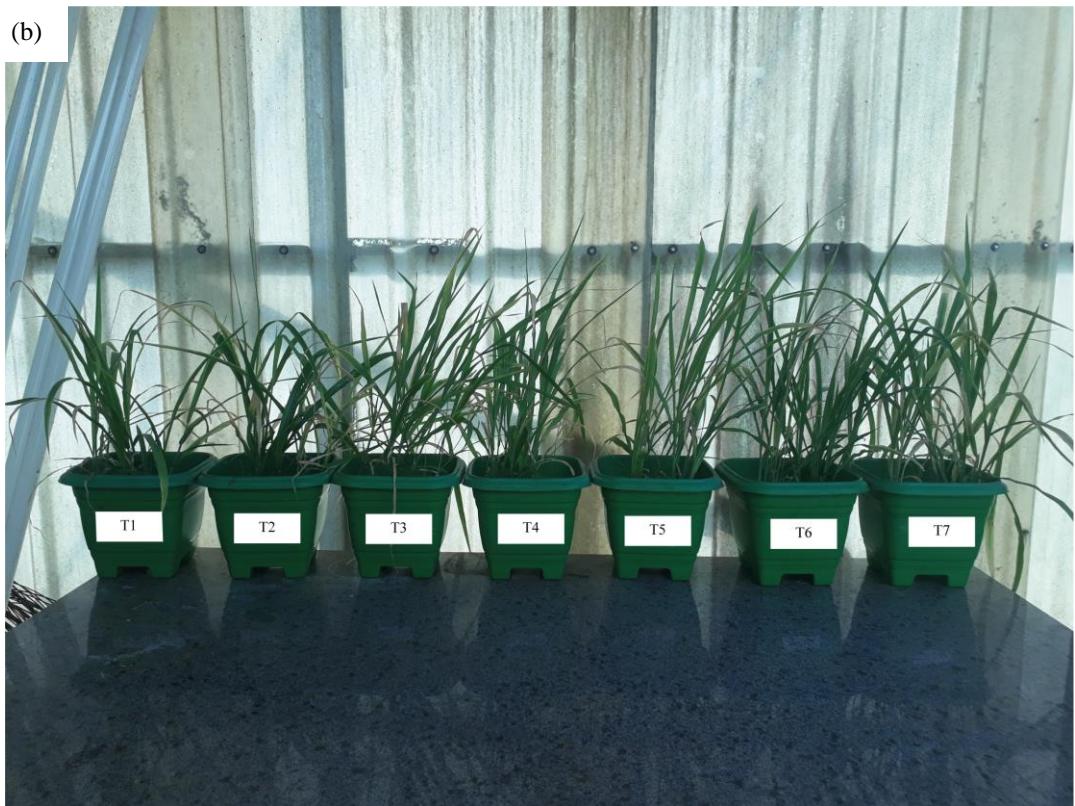


Figura 28. Produção de massa verde da parte aérea do 2º cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração no LVdf (a) e RQo (b). T1 = testemunha (sem aplicação de coproducto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

Para a variável acúmulo de Cu pela parte aérea da brachiária (Figura 29), no LVdf, as aplicações dos tratamentos T2, T3 e T5 possibilitaram aumento médio de 127%. Já no RQo, os tratamentos que permitiram incremento no acúmulo de Cu foram o T2 e T7 (+146%). No caso dos tratamentos T3 e T7, esses resultados ocorreram, possivelmente, pela menor capacidade desses tratamentos em elevar o pH do solo (Tabela 9), já que o aumento do pH promove condições para que o Cu se adsorva especificamente na fase sólida do solo, diminuindo a sua disponibilidade para as plantas e acúmulo na parte aérea (ABREU et al., 2007). No caso do tratamento T2, a maior produção de MSPA nesse tratamento (Figura 27) pode ter contribuído com o maior acúmulo de Cu.

Quanto ao acúmulo de Fe, nota-se que somente no RQo houve diferença entre os tratamentos (Figura 29). Nessa classe, o tratamento T2 permitiu incremento de 98% no acúmulo de Fe. Infere-se que isso ocorreu em virtude da pirita presente nesse coproduto (Figura 21), que ao ser oxidada no solo, libera  $\text{Fe}^{2+}$  (PEREIRA et al., 2016a). Para o LVdf, o efeito nulo da

aplicação dos coprodutos no acúmulo de Fe era esperado, já que essa classe apresenta altos teores naturais desse nutriente em sua composição.

Para o acúmulo de Mn (Figura 29), observa-se que a aplicação dos tratamentos T3 e T5 no RQo possibilitou aumento médio de 184% para essa variável. Esses resultados ocorreram em função do aumento da produção de MSPA com a aplicação dos coprodutos e da menor capacidade dos tratamentos T3 e T5 em elevar o pH do solo (Tabela 9), uma vez que a elevação do pH do solo promove a precipitação do Mn no solo na forma de oxi-hidróxidos, diminuindo a disponibilidade desse nutriente para as plantas (VAN RAIJ, 2011).

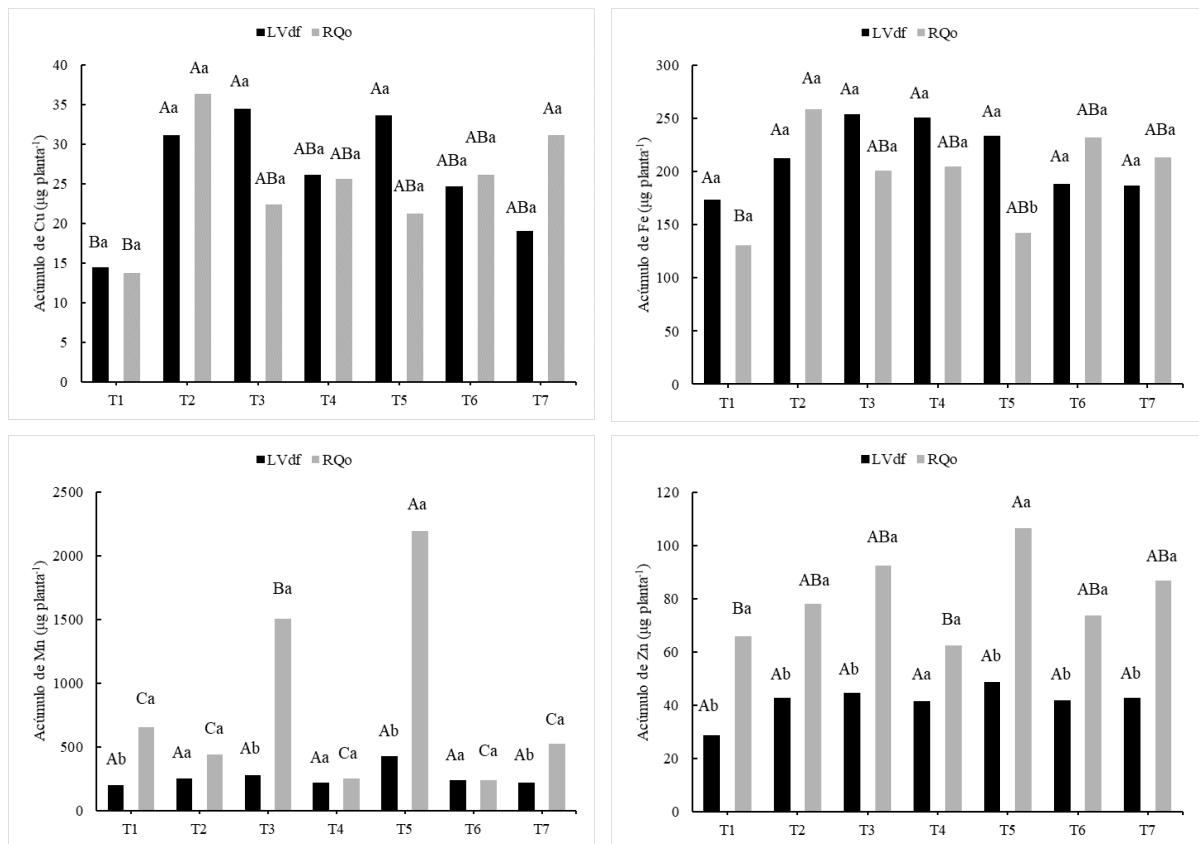
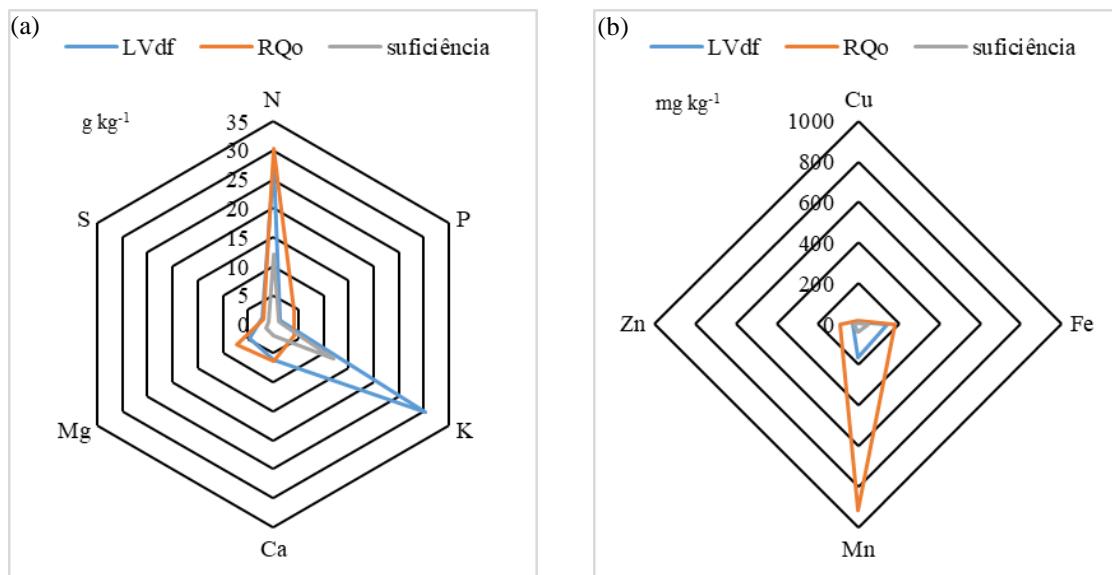


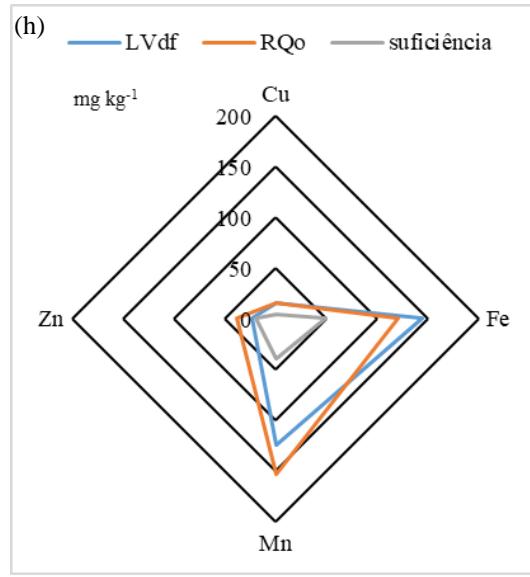
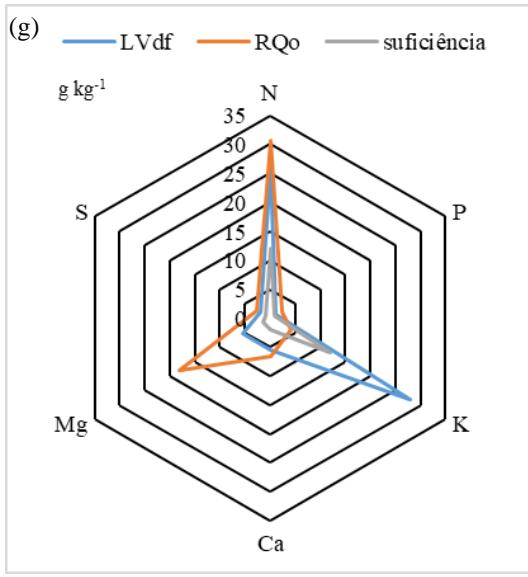
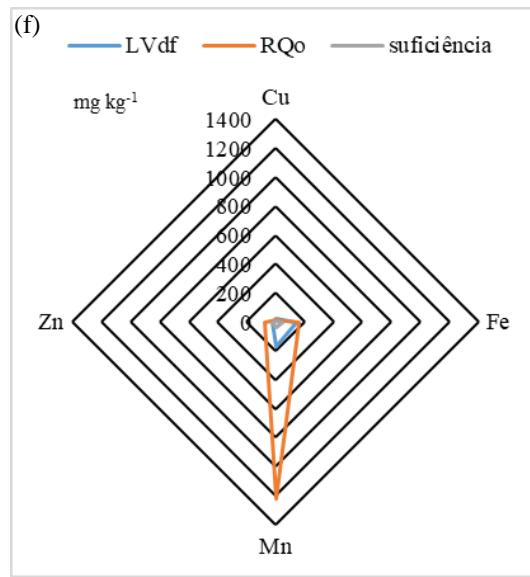
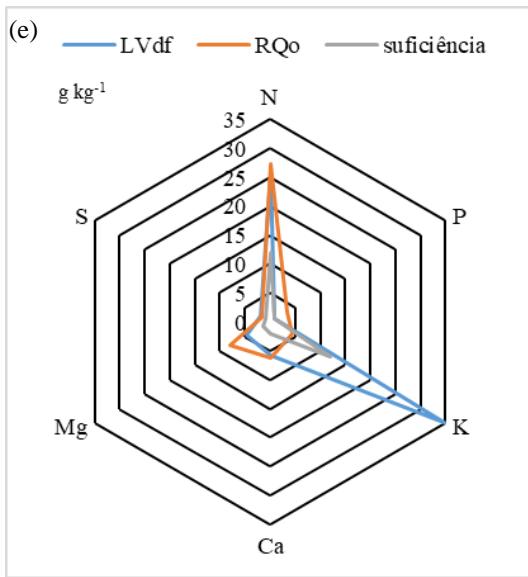
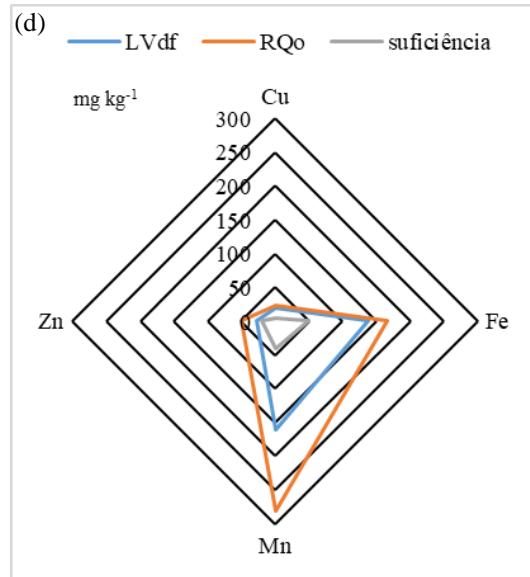
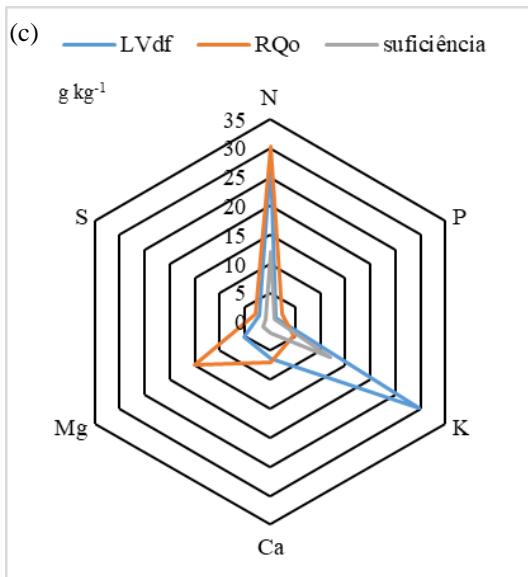
Figura 29. Acúmulo de Cu, Fe, Mn e Zn pela parte aérea do segundo cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. \*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula para fator tipo de coproducto e minúscula para fator classe de solo, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproduto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

Por último, em relação ao acúmulo de Zn pela parte aérea da brachiária (Figura 29), nota-se no RQo que a aplicação do tratamento T5 possibilitou incremento dessa variável em 62%. Infere-se que isso tenha ocorrido pela maior produção de MSPA pela brachiária cultivada

com a aplicação dos coprodutos, além da ausência de efeito do tratamento T5 no aumento do pH do solo (Tabela 9), já que o aumento do pH diminuiu a disponibilidade de Zn no solo através da adsorção específica desse nutriente no solo (ABREU et al., 2007).

Na figura 30 estão descritos os fertigramas referentes aos teores de macro e micronutrientes do segundo cultivo da brachiária cultivada após a aplicação dos coprodutos em duas classes de solo (RQo e LVdf). Pôde-se observar, para todos os tratamentos, níveis de macro (exceto K no RQo) e micronutrientes considerados suficientes para essa cultura (WERNER; PAULINO; CANTARELLA, 1996), o que demonstra que a adubação realizada se mostrou eficiente para o bom desenvolvimento da cultura, o que é confirmado pela a alta produção de biomassa (Figura 31). No caso do K, a condição de insuficiência nos teores desse nutriente no RQo é confirmada pela avaliação visual do sintoma típico de deficiência do K, que é a clorose na borda das folhas, avançando em direção à nervura principal na forma de um "V" invertido (MATTOS; MONTEIRO, 1998) (Figura 31).





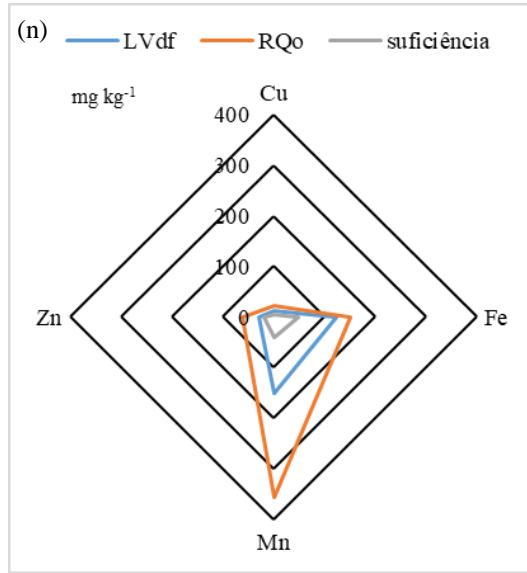
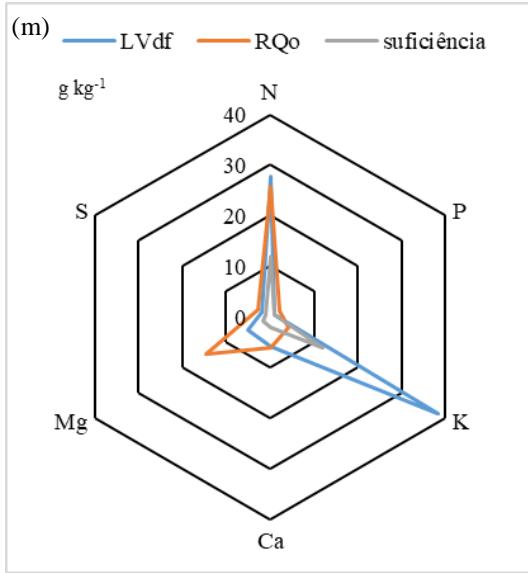
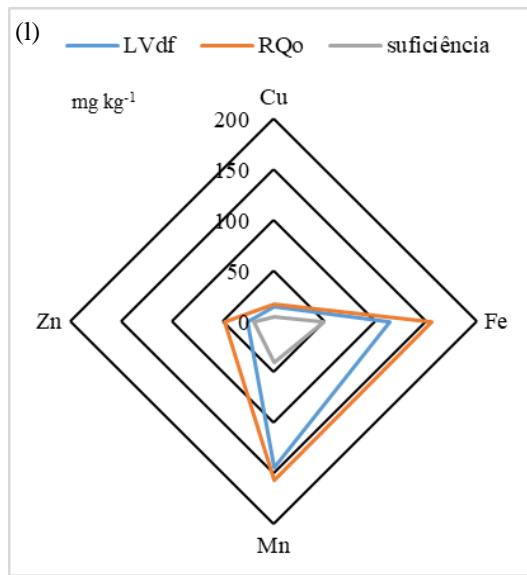
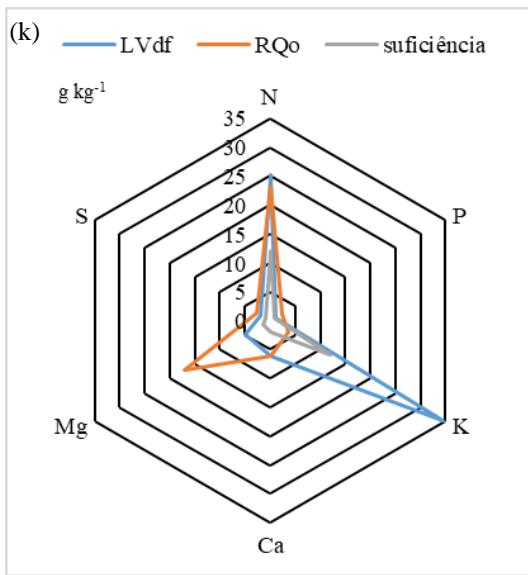
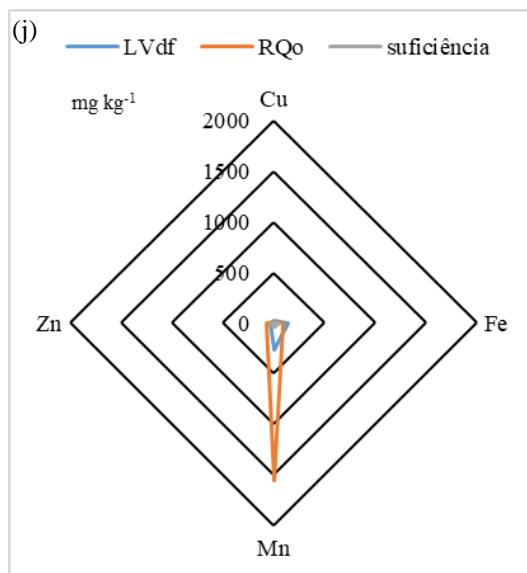
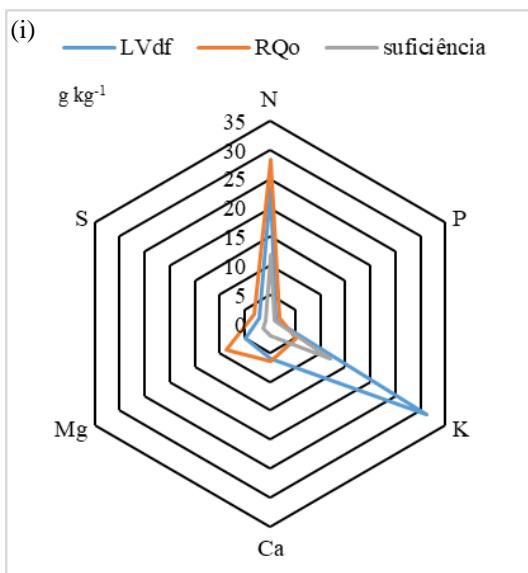


Figura 30. Fertigrama com os teores médios de nutrientes da parte aérea do segundo cultivo da brachiária cultivada no LVdf e RQo com seus respectivos níveis de suficiência (folha recém expandida) para os tratamentos: T1 (a-b), T2 (c-d), T3 (e-f), T4 (g-h), T5 (i-j), T6 (k-l) e T7 (m-n).



Figura 31. Desenvolvimento vegetativo do segundo cultivo da brachiária (21 dias após o 1º corte) submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.

#### 6.2.4. Índices de vegetação do segundo cultivo da brachiária

Observa-se na Tabela 17 os índices de vegetação de folhas do segundo cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. Para as variáveis NDVI, GNDVI e GRVI, nota-se que as plantas cultivadas sob o tratamento T7 no LVdf apresentaram maiores valores desses IV's. Do mesmo modo, as plantas cultivadas nesse tratamento também apresentaram maior acúmulo de K (Figura 27), o que pode ter ocasionado maiores valores desses IV's, uma vez que esse elemento é importante no processo fotossintético e pela composição do tecido das plantas e, portanto, relacionados às bandas de absorção do visível (SALISBURY; ROSS, 1985) e IV's, como o NDVI (ALBAYRAK, 2008).

Já nas plantas cultivadas no RQo, pode-se observar que os maiores valores de NDVI ocorreram com a aplicação dos tratamentos T2, T4, T6 e T7, contudo, não houve diferença para com o tratamento testemunha (T1).

Para o fator classe de solo, nota-se, de forma geral, maiores valores de NDVI nas plantas cultivadas no LVdf. Esses resultados se relacionam, na maioria das vezes, a maior produção de MSPA encontrada no LVdf (Figura 27), já que trabalhos demonstram haver relação entre produção de biomassa e NDVI (EPSTEIN et al., 2012; JOHANSEN; TØMMERVIK, 2014), principalmente pelo efeito da clorofila, que é mais presente em plantas com melhor vigor (JOHANSEN; TØMMERVIK, 2014).

Para o GNIR e RNIR observa-se que as plantas cultivadas no LVdf sob o tratamento T7 apresentaram os menores valores desses IV's e diferiram da testemunha (T1). Esses IV's apresentam correlação negativa com o vigor das plantas e produção de biomassa (DE CARVALHO GASPAROTTO et al., 2015). Desse modo, as melhores condições nutricionais das plantas submetidas a aplicação do tratamento T7, como maiores acúmulos de K (Figura 27), possivelmente proporcionaram os menores valores de GNIR e RNIR. Além disso, esses resultados são corroborados aos maiores valores de NDVI, GNDVI, RVI encontrados no tratamento T7 no LVdf. Já no RQo, as plantas cultivadas no tratamento T3 exibiram maiores valores de GNIR e RNIR, contudo, não foi observado relação desses IV's com a produção de MSPA e acúmulo de nutrientes nesse tratamento. Para o fator classe de solo, de forma geral, as plantas cultivadas no LVdf apresentaram os menores valores de GNIR e RNIR, o que pode estar relacionado a maior produção de MSPA da brachiária nessa classe (Figura 27).

Quanto ao RVI, nota-se no LVdf que as plantas submetidas ao tratamento T2 e T7 exibiram maiores valores desse IV's e diferiram da testemunha (T1). Já no RQo, os tratamentos T2, T4 e T6 possibilitaram maiores valores de RVI. Na maioria das situações, esses resultados se devem a maior produção de MSPA em tais tratamentos (Figura 27). Para o fator classe de solo, assim como o ocorrido para o NDVI, GNDVI e GRVI, de forma geral, as plantas cultivadas no LVdf apresentaram maiores valores de RVI.

Em relação ao IRVI, não foram observadas diferenças estatísticas entre os tratamentos.

Tabela 17. Valores médios de IV's de folhas da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.

Solo	Tratamentos						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
NDVI							
LVdf	0,66 Ba	0,70 ABa	0,68 ABa	0,69 ABa	0,70 ABa	0,69 ABa	0,72 Aa
RQo	0,66 ABa	0,68 Aa	0,61 Bb	0,68 Aa	0,66 ABb	0,68 Aa	0,67 Ab
GNDVI							
LVdf	0,65 Ba	0,66 ABa	0,65 Ba	0,67 ABa	0,68 ABa	0,67 ABa	0,70 Aa
RQo	0,64 ABa	0,66 Aa	0,61 Bb	0,65 Aa	0,65 Aa	0,65 Aa	0,64 ABb
GNIR							
LVdf	0,21 Aa	0,19 ABa	0,20 ABb	0,20 ABa	0,19 ABa	0,20 ABa	0,18 Bb
RQo	0,22 ABa	0,21 Ba	0,25 Aa	0,21 Ba	0,21 Ba	0,21 Ba	0,22 ABa
RNIR							
LVdf	0,21 Aa	0,18 ABa	0,19 ABb	0,18 ABa	0,18 ABb	0,18 ABa	0,16 Bb
RQo	0,20 Ba	0,19 Ba	0,24 Aa	0,19 Ba	0,20 Ba	0,19 Ba	0,20 Ba
RVI							
LVdf	4,88 Ba	5,82 Aa	5,29 ABa	5,54 ABa	5,68 ABa	5,66 ABa	6,21 Aa
RQo	5,05 ABa	5,29 Aa	4,29 Bb	5,28 Aa	5,02 ABb	5,26 Aa	5,13 ABb
GRVI							
LVdf	4,70 Ba	5,21 ABa	4,92 ABa	5,04 ABa	5,22 ABa	5,20 ABa	5,65 Aa
RQo	4,62 Aa	4,93 Aa	4,17 Ab	4,87 Aa	4,81 Aa	4,80 Aa	4,66 Ab
IRVI							
LVdf	0,10 Aa	0,11 Aa	0,11 Aa	0,12 Aa	0,13 Aa	0,09 Aa	0,11 Aa
RQo	0,10 Aa	0,11 Aa	0,11 Aa	0,11 Aa	0,12 Aa	0,12 Aa	0,12 Aa

\* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, minúscula na coluna e maiúscula na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproducto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

#### 6.2.5. Atributos químicos do solo após dois cultivos da brachiária

Na Tabela 18 estão descritos os valores médios dos atributos químicos do solo após o segundo cultivo da brachiária. Pode-se observar grandes mudanças em relação a análise anterior (140 dias de incubação – Tabelas 9-13). Esses resultados foram decorrentes da exportação de nutrientes ocasionadas pela colheita da parte aérea de dois cultivos da brachiária, além das diferentes solubilidades dos coprodutos, o que possibilitou diferentes taxas de liberação dos

nutrientes por esses materiais ao longo dos períodos de incubação (estudo I) e de dois cultivos da brachiária (estudo II).

Para o pH ( $H_2O$ ), pode-se observar na Tabela 18, comparada a avaliação anterior (140 dias – Tabela 9), que houve ligeira diminuição de seus valores no LVdf e pequeno aumento no RQo após o segundo cultivo da brachiária. Os maiores teores de C do LVdf (Tabela 3) e a maior acidez potencial, possivelmente, proporcionaram maior velocidade na dissolução dos óxidos de Ca e Mg presentes nos coprodutos, o que permitiu rápida reação desses óxidos com o solo. Esses resultados são corroborados pelo trabalho de Liu et al. (2010) que encontraram aumento na dissolução do calcário na presença de ácidos orgânicos. Já para o RQo, que possui menores teores de C e acidez potencial, provavelmente, mesmo após o cultivo da brachiária, ainda houve liberação de CaO e MgO por parte dos coprodutos proporcionando, assim, aumento nos valores de pH nessa classe. Em relação ao fator tipo de coprodutos, assim como aos 140 dias de incubação, os materiais constituídos de ritmito (T2, T4, T6 e T7) se mostraram os mais eficientes no aumento do pH do RQo. Comparado ao tratamento testemunha, os materiais contendo ritmito proporcionaram aumento médio de 20% nos valores do pH do RQo. Além disso, o RQo, de forma geral, apresentou os maiores valores de pH, em média, 15% superior aos encontrados no LVdf. Segundo Fageria (1998), a maioria das culturas pode produzir bem no solo com pH em torno de 6,0, valor próximo ao encontrado com a aplicação dos coprodutos no RQo.

Em relação aos teores de  $K^+$  após o segundo cultivo da brachiária (Tabela 18), comparado aos 140 dias de incubação (Tabela 10), para os tratamentos com aplicação dos coprodutos, houve decréscimo médio de aproximadamente 443 e 558% nos teores desse nutriente no LVdf e RQo, respectivamente, o que demonstra a grande exportação dos nutrientes pelos dois cultivos da brachiária e a pouca reposição por parte dos coprodutos. Quanto a diferença entre os tratamentos, no LVdf, o T2 foi responsável pelos maiores valores ( $0.13\text{ cmol}_c\text{ dm}^{-3}$ ), diferindo do tratamento T4 nessa classe. Para o fator classe de solo, assim como nas avaliações anteriores (Tabela 10), os tratamentos relacionados ao LVdf apresentaram os maiores valores desse nutriente.

Em relação aos teores de  $Ca^{2+}$  após cultivo da brachiária (Tabela 18), tanto no LVdf quanto no RQo, os teores médios desse nutriente foram aproximadamente 30% maiores aos encontrados aos 140 dias de incubação (Tabela 11), o que demonstra que os óxidos de Ca associados a calcita presentes nos coprodutos (Figura 21) continuaram a apresentar liberação de Ca mesmo após o cultivo da brachiária. Quanto a diferença entre os tratamentos, no LVdf,

nota-se que somente a aplicação do ritmito (T4) incrementou os teores desse nutriente (+22%). Já no RQo, a aplicação dos coprodutos T2, T4, T5, T6 e T7 proporcionaram aumento médio de 144% nos teores de Ca<sup>2+</sup>. Para o fator classe de solo, o LVdf apresentou teores de Ca<sup>2+</sup> 117 % superiores aos encontrados no RQo, tal qual na caracterização inicial dos solos (Tabela 3).

Para os teores de Mg<sup>2+</sup> após o segundo cultivo da brachiária (Tabela 18), ao contrário do que ocorreu para o Ca<sup>2+</sup>, comparado aos resultados da análise do solo aos 140 dias de incubação (Tabela 12), pode-se observar estabilidade nos teores de Mg<sup>2+</sup> no LVdf e diminuição no RQo. Isso ocorreu devido a maior extração de Mg por parte das plantas de brachiária cultivadas no RQo (Figura 27). No que se refere a diferença entre os insumos, exceto para os tratamentos T3 e T5, os coprodutos aplicados permitiram incremento de 293% nos teores de Mg<sup>2+</sup> no RQo. Em relação ao fator classe de solo, o LVdf apresentou teores de Mg<sup>2+</sup> 114% superiores aos encontrados no RQo, assim como na caracterização inicial desses solos (Tabela 3).

Para os teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Tabela 18), comparado aos resultados obtidos aos 140 dias de incubação (Tabela 13), pôde-se observar aumento médio nos valores desse nutriente após o cultivo da brachiária no LVdf (+200%). Isso ocorreu, possivelmente, pelos efeitos dos maiores teores de C nessa classe (Tabela 3), uma vez que trabalhos demonstram (KANTAR, 2016; LIN; HUANG, 2008) que a presença de ácidos orgânicos contribui com aumento da velocidade de liberação de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> por parte da pirita. Já no RQo, os menores teores de C retardaram a liberação de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> pela pirita presente nos coprodutos. Quanto a diferença entre os coprodutos, nota-se que no LVdf a aplicação dos tratamentos T5 e T7 proporcionaram, em média, valores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 57% superiores aos encontrados no tratamento testemunha (T1) dessa classe. Já no RQo, somente o tratamento T5 diferiu do T1, proporcionando valores 416% superiores aos encontrados nesse último tratamento. A presença do folhelho pirobetuminoso nos tratamentos T5 e T7 contribuiu para tais resultados, haja visto que esse material é rico em pirita. Entre as classes de solo, observa-se que o LVdf apresentou os maiores valores, em média, 152% superiores aos obtidos no RQo, tal qual na caracterização inicial desses solos (Tabela 3).

Tabela 18. Valores médios de pH e teores de  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $S-SO_4^{2-}$  após o cultivo da brachiária submetida a aplicação de coprodutos da mineração.

Solo	Tratamentos						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
pH ( $H_2O$ )							
LVdf	4,88 Aa	5,02 Ab	5,00 Ab	5,04 Ab	4,98 Ab	5,10 Ab	5,00 Ab
RQo	5,10 Ba	6,08 Aa	5,38 Ba	6,10 Aa	5,36 Ba	6,36 Aa	6,00 Aa
$K^+$ ( $cmol_c\ dm^{-3}$ )							
LVdf	0,09 ABa	0,13 Aa	0,10 ABa	0,08 Ba	0,10 ABa	0,12 ABa	0,11 ABa
RQo	0,01 Ab	0,02 Ab	0,02 Ab	0,02 Ab	0,02 Ab	0,02 Ab	0,02 Ab
$Ca^{2+}$ ( $cmol_c\ dm^{-3}$ )							
LVdf	3,40 Ba	3,90 ABa	3,55 ABa	4,16 Aa	3,96 ABa	3,72 ABa	4,00 ABa
RQo	0,84 Cb	2,14 Ab	1,16 BCb	2,34 Ab	1,72 ABb	2,28 Ab	1,80 Ab
$Mg^{2+}$ ( $cmol_c\ dm^{-3}$ )							
LVdf	1,76 Aa	2,24 Aa	1,98 Aa	2,34 Aa	1,94 Aa	2,34 Aa	2,26 Aa
RQo	0,36 Bb	1,52 Ab	0,44 Bb	1,46 Ab	0,48 Bb	1,46 Ab	1,22 Ab
$S-SO_4^{2-}$ ( $mg\ dm^{-3}$ )							
LVdf	44,00 Ca	54,80 ABCa	49,20 BCa	60,40 ABCa	73,40 Aa	63,20 ABCa	65,00 ABa
RQo	10,00 Bb	19,20 Bb	10,20 Bb	29,20 Bb	51,60 Ab	20,60 Bb	21,60 Bb

\* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator tipo de coproducto) e minúscula na coluna (fator classe de solo), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproduto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

Com os resultados da análise de solo após os dois cultivos da brachiária foi realizado o cálculo da adubação necessária para a cultura da soja, que foi semeada após o segundo cultivo da brachiária. Para isso, foi necessário conhecer os teores dos nutrientes referentes ao nível crítico para a soja, que é importante para a compreensão se a condição nutricional do solo está adequada para a cultura de interesse (QUEZADA-CRESPO et al., 2017). Desse modo, com os resultados da análise de solo após o segundo cultivo da brachiária (Tabela 18) avaliaram-se os níveis críticos dos nutrientes predominantes nos coprodutos ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $S-SO_4^{2-}$ ) para o desenvolvimento da soja. Segundo Silva et al. (2016), no LVdf os teores de  $Mg^{2+}$  e  $S-SO_4^{2-}$  estiveram acima do nível crítico. Já no RQo, somente os teores de  $Mg^{2+}$  (T2, T4, T6 e T7) e  $S-SO_4^{2-}$  estiveram acima do nível crítico da soja. Esses resultados demonstram que os coprodutos aplicados funcionaram como fontes de nutrientes, o que possibilitou atingir níveis considerados adequados para a cultura da soja, especialmente para o  $Mg^{2+}$  e  $S-SO_4^{2-}$ . Para o  $Ca^{2+}$ , seus teores

estiveram próximo ao nível crítico no LVdf e abaixo no RQo. No caso do K<sup>+</sup>, os seus teores abaixo dos níveis críticos para a soja ocorreram, principalmente, em função do cultivo prévio de dois ciclos da brachiária, que exportou grande parte desse nutriente via colheita da parte aérea, tendo em vista a grande diminuição dos teores de K<sup>+</sup> ao longo do experimento.

#### **6.2.6. Produção de massa seca da parte aérea da soja e seus acúmulos e teores de macro e micronutrientes**

Encontram-se na Figura 32 os gráficos de MSPA da soja e seus acúmulos de macronutrientes após a aplicação de coprodutos da mineração e dois cultivos da brachiária.

Para a MSPA, pode-se observar que a aplicação dos coprodutos, em as ambas classes de solo, possibilitou maior produção dessa variável. Em média, no LVdf, os coprodutos apresentaram valores de MSPA 13% maiores aos encontrados no tratamento testemunha (T1). Já no RQo, os coprodutos foram mais eficientes e, comparado ao T1, possibilitaram aumento de 52%. A maior eficiência dos coprodutos no RQo era esperada, já que no planejamento do experimento buscou-se solos contrastantes entre os teores de argila e nutrientes disponíveis, sendo o RQo o solo considerado com deficiências nutricionais (Tabela 3) e, por isso, mais responsável a aplicação de fertilizantes. Assim, os benefícios dos coprodutos na produção de MSPA foram decorrentes dos efeitos indiretos na disponibilização de nutrientes como aumento do pH do solo, bem como efeitos diretos da liberação de diversos nutrientes, como Ca, Mg e S presentes nos coprodutos. Outros efeitos como os maiores teores de Si nos tratamentos submetidos a aplicação da maioria dos coprodutos no RQo (Tabela 15) também podem ser considerados, já que esse elemento é benéfico, uma vez que é capaz de proteger as plantas contra estresses bióticos e abióticos (MA; YAMAJI, 2006), entre eles a toxidez por Al<sup>3+</sup> através da diminuição na concentração de Al na solução do solo por meio da formação de complexos Al-Si (FREITAS; FERNANDES; MAIA, 2015). Esses resultados são corroborados por diversos trabalhos que demonstram o potencial de utilização de rochas em pó e/ou coprodutos e subprodutos da mineração como fonte de nutrientes para as plantas, permitindo maiores produtividades (RAMOS et al., 2019; TETSOPGANG; FONYUY, 2019; THEODORO et al., 2013).

Quanto ao fator classe de solo, notam-se resultados contrastantes entre as classes para a variável produção de MSPA da soja. Nos tratamentos T1, T3 e T5 os maiores valores de MSPA foram obtidos em plantas cultivadas no LVdf. Esses resultados podem estar relacionados aos teores de Mg<sup>2+</sup> encontrados nesses tratamentos no RQo, que foram considerados abaixo do

nível crítico para a cultura ( $<1,00 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) (Tabela 18), o que proporcionou menores acúmulos de Mg (Figura 32). Já para os demais tratamentos, a maior produção de MSPA foi encontrada em plantas cultivadas no RQo. Como os coprodutos aplicados são multielementares e apresentam diferentes aportes de nutrientes, cada qual possibilitou nos diferentes solos, comportamentos distintos.

Para a variável acúmulo de N pela parte aérea da soja (Figura 32), a aplicação dos coprodutos T4 e T6, comparada ao tratamento testemunha, proporcionou, em média, aumento de 55% no acúmulo desse nutriente na soja cultivada no RQo. Embora os coprodutos não sejam fontes de N, os efeitos dos coprodutos no pH do solo e, consequentemente, na nodulação da soja (MIGUEL; MOREIRA, 2001), juntamente com a liberação de nutrientes por parte dos coprodutos, permitiram que houvesse maior produção de folhas e, por conseguinte, maiores acúmulos de N em tratamentos como o T4 e T6 no RQo. Ademais, a interação entre os íons absorvidos através de efeitos sinérgicos encontrados entre o N e P (RESENDE et al., 2012) e N e Mg também pode ter contribuído para os maiores acúmulos encontrados nos tratamentos T4 e T6, haja visto que também apresentaram maior acúmulo de P e Mg no RQo. Em uma associação próxima, tanto o N quanto o Mg são componentes estruturais das moléculas de clorofila (MARSCHNER, 2011). A captação e assimilação de N são processos consumidores de energia que requerem a participação de Mg-ATP (BRISKEN; BLOOM, 2012). Assim, o P e Mg podem afetar indiretamente a absorção e a assimilação de N por meio de efeitos no metabolismo energético (PENG et al., 2019).

Nota-se na Figura 32 que somente no RQo houve diferença estatística para o fator tipo de coproducto para a variável acúmulo de P. Nessa classe, com exceção dos tratamentos T2 e T3, a aplicação dos coprodutos contribuiu para maiores valores acumulados de P, em média, 50% superiores aos obtidos no tratamento testemunha (T1). Os efeitos indiretos de tais coprodutos no aumento do P disponível do solo (Tabela 14) contribuíram para o aumento do P acumulado pelas plantas. Além disso, efeitos sinérgicos encontrados entre Mg e P (MALAVOLTA, 2006) e N e P (RESENDE et al., 2012), possivelmente beneficiaram o acúmulo de P em plantas submetidas a aplicação dos coprodutos, especialmente no tratamento T6, que apresentou os maiores acúmulos de Mg, N e P. Quanto ao fator classe de solo, pode-se observar maiores valores acumulados de P no RQo, em média, 233% superiores aos encontrados no LVdf, assim como o encontrado para seus teores disponíveis (Tabela 14).

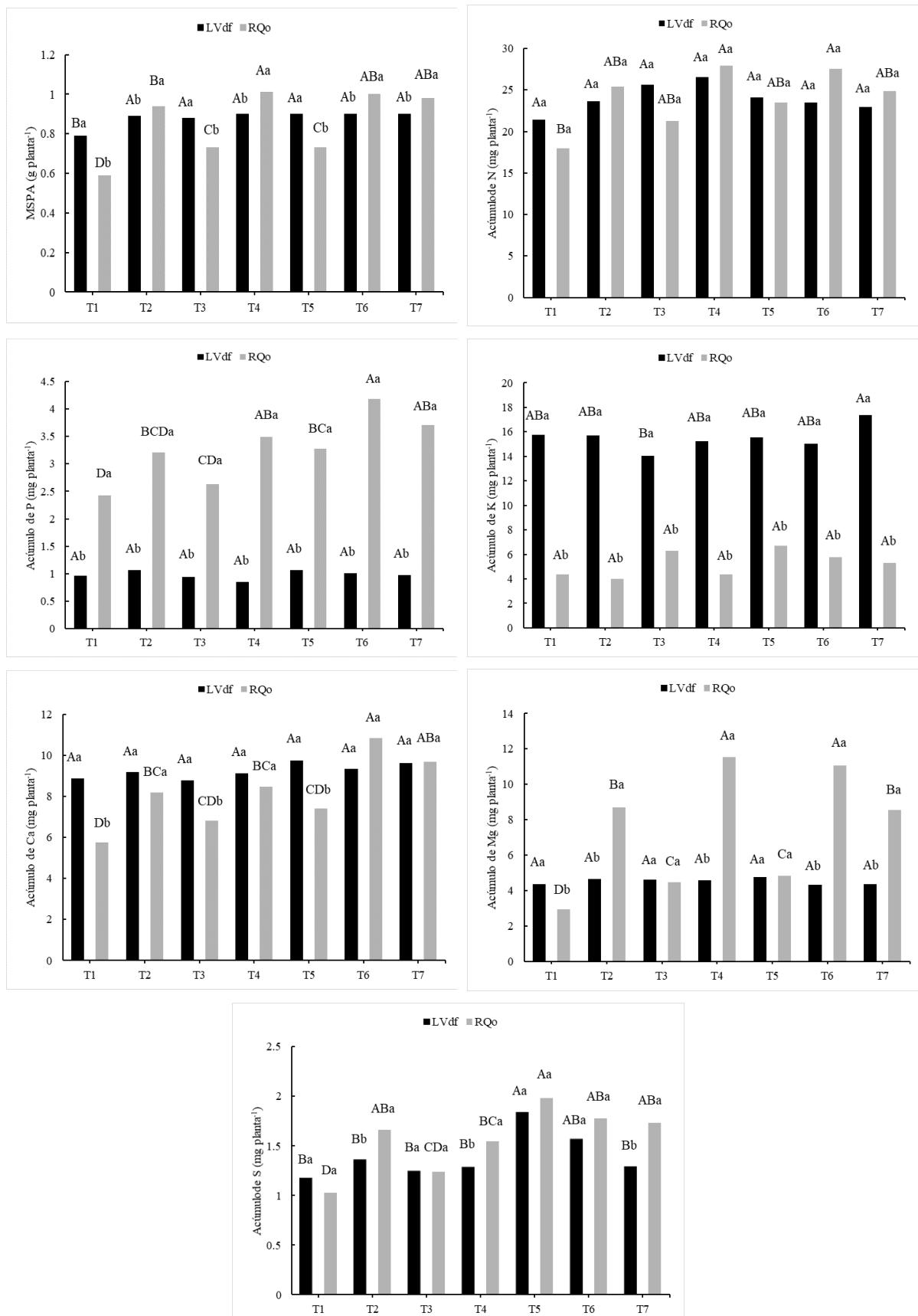


Figura 32. Produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S na parte aérea da soja submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de

solo. \*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula para fator tipo de coproduto e minúscula para fator classe de solo, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproduto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

Para a variável acúmulo de K, para o fator tipo de coproduto, observa-se que a aplicação do tratamento T7 proporcionou, no LVdf, maiores valores acumulados de K (+23% em relação ao T3). Embora o tratamento T7 não tenha proporcionado maiores teores de K<sup>+</sup> no solo (Tabela 18), diversos trabalhos conduzidos em solos do Brasil têm demonstrado quantidades de potássio extraídas pelas plantas cultivadas superiores às quantidades deste elemento obtidas pelos extractores de rotina, como o Mehlich-1, o que sugere que parte do potássio não-trocável pode ser absorvida pelas plantas (DA SILVA et al., 1995; KAMINSKI et al., 2007; ROSOLEM; MACHADO; RIBEIRO, 1988). Esse fenômeno é especialmente relevante em casos de aplicação de rochas em pó constituintes de minerais potássicos, como a ilita presente no siltito argiloso.

Segundo Kaminski et al. (2007), a absorção de potássio pelas plantas desencadeia um processo contínuo de depleção de formas não-trocáveis ocorrentes no solo, sobretudo quando os teores de potássio disponíveis são baixos (como foi o caso da análise de solo antecedente ao cultivo da soja - Tabela 18). A lei do equilíbrio químico sugere que solos com baixos teores de nutrientes em solução apresentam alta transferência da forma não-trocável e estrutural para a solução do solo, já que a concentração do nutriente em solução é muito inferior a constante de estabilidade do mineral (BENITES et al., 2010). Assim, o aproveitamento do K<sup>+</sup> presentes em formas inicialmente não disponíveis pode ser obtido pela utilização de plantas com sistema radicular agressivo e em condições de baixa disponibilidade do nutriente. Já para o fator classe de solo, o cultivo das plantas no LVdf possibilitou maiores valores acumulados de K, em média, 195% superiores aos obtidos no RQo. Isso se deu em decorrência dos maiores teores de K<sup>+</sup> disponíveis no LVdf (Tabela 18).

A aplicação dos coprodutos T2, T4, T6 e T7 proporcionou maiores valores acumulados de Ca pelas plantas cultivadas no RQo (Figura 32). Em média, nessa classe, esses coprodutos contribuíram com aumento de 61% em relação ao tratamento testemunha (T1). Os maiores teores de Ca<sup>2+</sup> do solo (Tabela 18) com a aplicação dos coprodutos permitiram tais resultados. Quanto ao fator classe de solo, nos tratamentos T1, T3 e T5, as plantas cultivadas no LVdf

apresentaram maiores valores acumulados de Ca, principalmente devido a maior produção de MSPA da soja submetida a tais tratamentos no LVdf (Figura 32).

Para o acúmulo de Mg, nota-se na Figura 32 que somente no RQo houve diferença para o fator tipo de coproduto. Nessa classe, a aplicação dos coprodutos proporcionou, em média, valores 177% superiores aos obtidos no tratamento testemunha (T1). Esses resultados foram decorrentes dos maiores teores de  $Mg^{2+}$  no solo com a aplicação dos coprodutos (Tabela 18), que permitiram que as plantas produzissem maior MSPA e acumulassem maiores quantidades desse nutriente na parte aérea. Em relação ao fator classe de solo, embora o RQo apresentasse menores teores de  $Mg^{2+}$ , de forma geral, a aplicação dos coprodutos possibilitou nessa classe maiores valores acumulados de Mg, em média, 79% superiores aos acúmulos encontrados no LVdf. Tal fato se deve aos efeitos antagônicos do  $K^+$  e  $Mg^{2+}$ , o que demonstra que o aumento dos teores de  $K^+$  no solo causa diminuição da absorção de  $Mg^{2+}$  pelas plantas (ERNANI et al., 2006; ROSOLEM, 2005).

Para a variável acúmulo de S pela parte aérea da soja (Figura 32), observa-se no LVdf que a aplicação do tratamento T5 possibilitou valores 56% superiores aos encontrados no tratamento testemunha (T1). Já no RQo, com exceção do tratamento T3, todos os demais tratamentos contribuíram com aumento nos valores acumulados de S pelas plantas e apresentaram, em média, valores 68% superiores aos obtidos no tratamento T1. Esses efeitos, no caso do tratamento T5, foram decorrentes dos maiores teores de  $S-SO_4^{2-}$  do solo submetido a aplicação desse coproduto (Tabela 18). Para o fator classe de solo, notam-se, de forma geral, maiores valores acumulados de S pelas plantas cultivadas no RQo, em média, 12% maiores aos encontrados no LVdf. Tais resultados se devem a maior produção de MSPA da soja cultivada no RQo.

Observa-se na Figura 33 os acúmulos de micronutrientes pela parte aérea da soja submetida a aplicação de coprodutos da mineração. Para a variável acúmulo de Cu, nota-se que não houve efeito dos fatores tipos de coprodutos e classe de solo. Já para o acúmulo de Fe, pôde-se observar que as aplicações dos tratamentos T5 e T6 no LVdf e T2, T4, T5, T6 e T7 no RQo possibilitaram maiores valores acumulados desse nutriente. Tais efeitos ocorreram em função da maior produção de MSPA com a aplicação dos coprodutos (Figura 32), além, possivelmente, do aporte de Fe por meio da pirita presente nos coprodutos, assim como relatado por Purakayastha; Singh; Chhonkar (1998) em cultivo de brócolis. Quanto ao fator classe de solo, de forma geral, as plantas cultivadas no LVdf apresentaram maiores valores acumulados

de Fe. Isso era esperado, já que os solos derivados de basalto (rocha de origem do LVdf) apresentam altos teores de Fe em sua constituição (MELO et al., 2012a).

Para a variável acúmulo de Mn, nota-se na Figura 33 que somente a aplicação do coproduto T5 no RQo contribuiu para o aumento dos valores desse nutriente acumulado pela parte aérea da soja. Tal fato deve-se a dois fatores: o primeiro está relacionado ao pH, já que a aplicação desse tratamento não ocasionou elevação dos níveis de pH do solo (Tabela 18) e, por isso, não proporcionou que o Mn se precipitasse no solo na forma de oxi-hidróxidos, diminuindo a disponibilidade para as plantas (RAIJ, 2011); o segundo fator está relacionado ao aporte de Mn por parte do folhelho pirobetuminoso da Formação Iratí, já que trabalhos demonstram que essa rocha pode disponibilizar tal nutriente ao solo (ASSMANN et al., 1999; RODRIGUES, 2017). Quanto a diferença entre classes de solo, foi observado, de forma geral, que as plantas cultivadas no RQo apresentaram maiores acúmulos de Mn (+93% em relação ao LVdf). A maior produção de MSPA no RQo permitiu tais resultados (Figura 32).

Para a variável acúmulo de Zn, assim como ocorreu para o acúmulo de Mn, nota-se (Figura 33) que somente a aplicação do coproduto T5 no RQo possibilitou maiores valores acumulados de Zn (+34% em relação ao T1). A aplicação do tratamento T5 não alterou os valores de pH do solo (Tabela 18) e, assim, não ocasionou efeitos do aumento do pH nos processos de adsorção específica de Zn no solo (ABREU et al., 2007), como ocorreu para os demais coprodutos. Além disso, trabalhos demonstram que a utilização de materiais contendo pirita, como o folhelho pirobetuminoso presente no tratamento T5, pode aumentar a absorção de Zn pelas plantas (ORTAS; KAYA; ERCAN, 2015; TIWARI; PATHAK; UPADHYAY, 1982), tal como no presente estudo. Ademais, os efeitos antagônicos entre a absorção de Fe e Zn (KABATA-PENDIAS, 2010), podem ter contribuído para a diminuição do acúmulo desse último em tratamentos como o T4 no RQo, que apresentou os maiores acúmulos de Fe e os menores de Zn. Quanto ao fator classe de solo, no geral, as plantas cultivadas no RQo apresentaram maiores acúmulos de Zn (+22% em relação ao LVdf). A interação antagônica entre o Fe e Zn também pode ter ocasionado tais resultados, já que as plantas cultivadas no LVdf apresentaram maiores acúmulos de Fe.

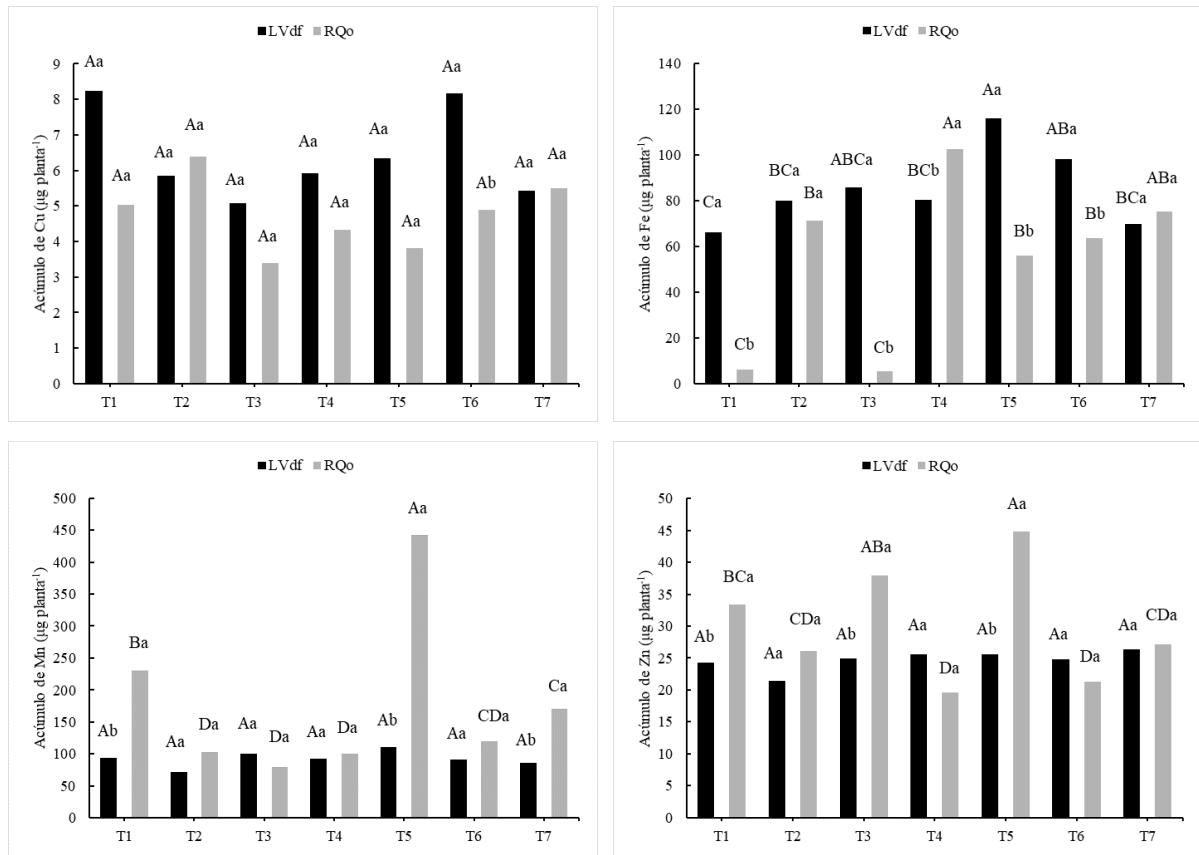
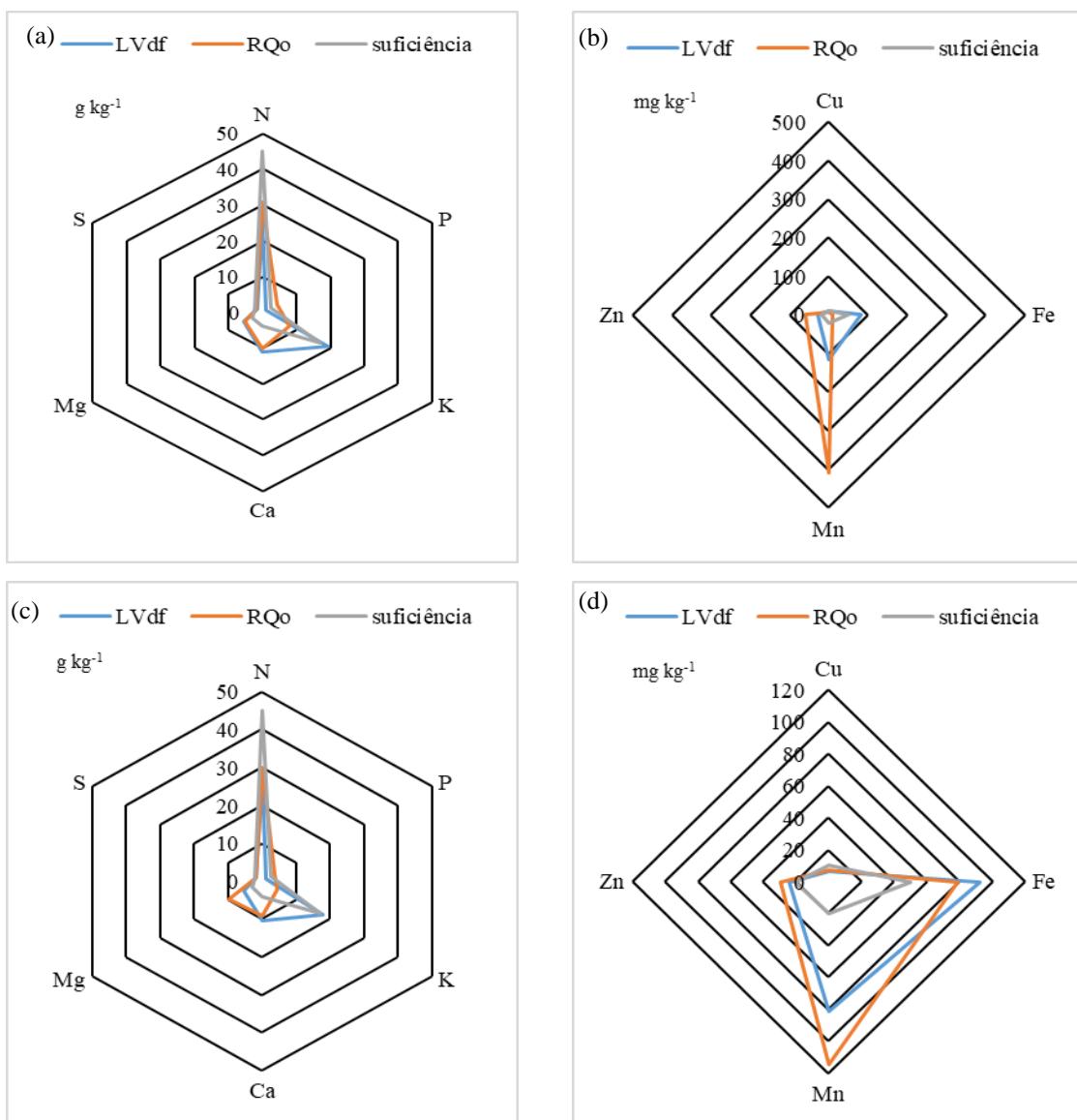
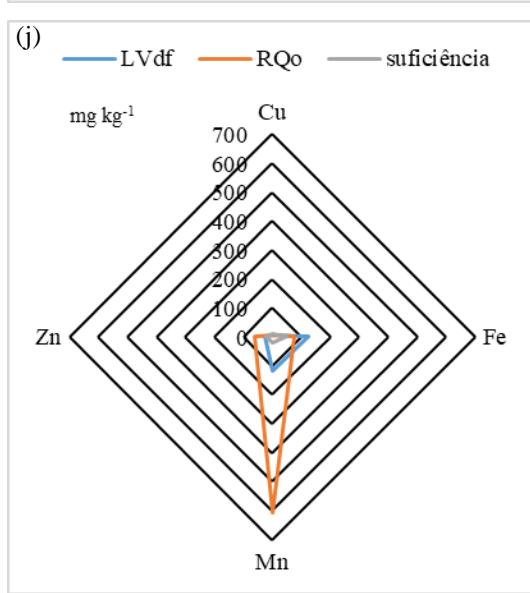
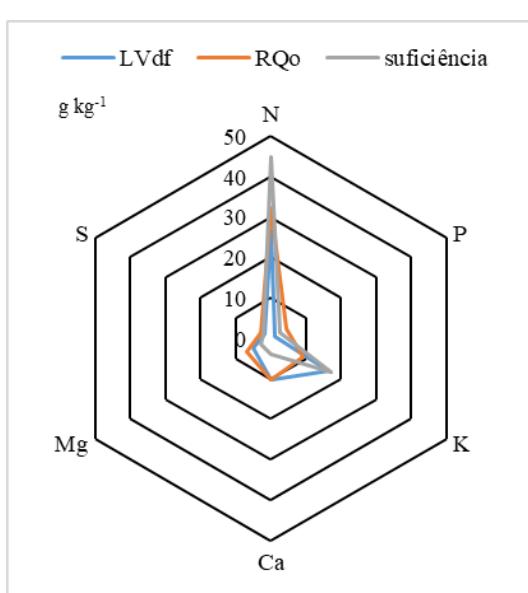
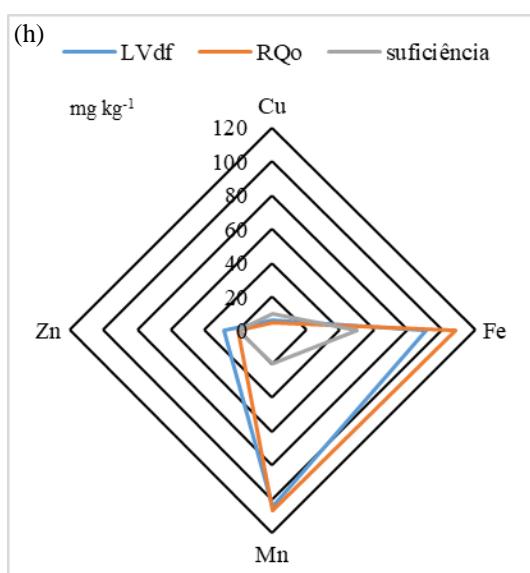
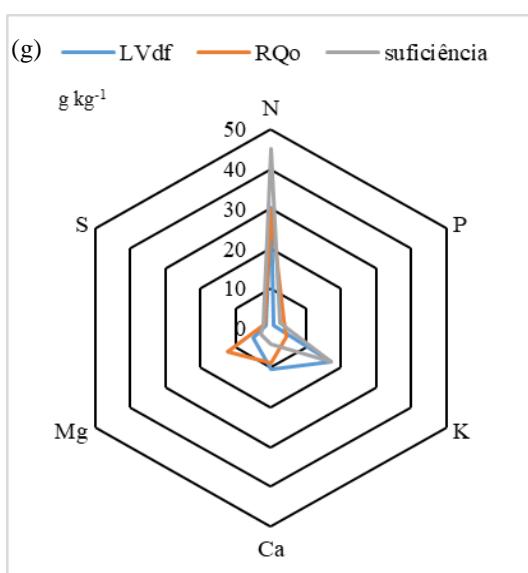
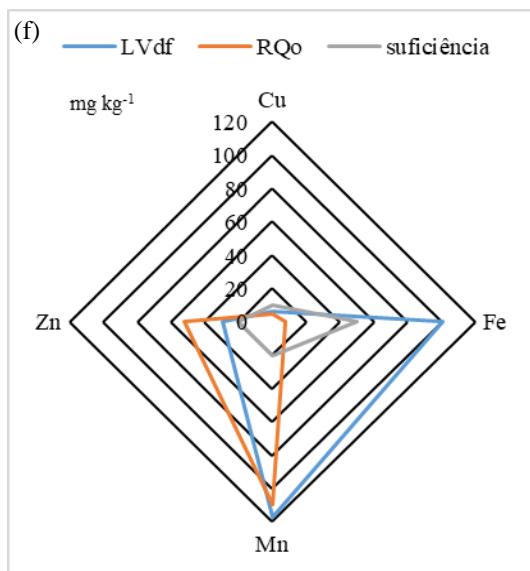
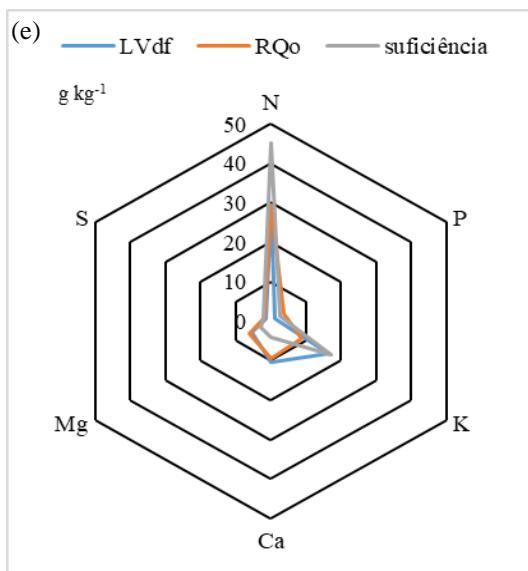


Figura 33. Acúmulo de Cu, Fe, Mn e Zn pela parte aérea da soja submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. \*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula para fator tipo de coproduto e minúscula para fator classe de solo, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. T1 = testemunha (sem aplicação de coproduto); T2 = 50% siltito argiloso + 50% ritmito; T3 = 100% siltito argiloso; T4 = 100% ritmito; T5 = 100% folhelho pirobetuminoso; T6 = 30% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 55% ritmito; T7 = 55% siltito argiloso + 15% folhelho pirobetuminoso + 30% ritmito.

Na Figura 34 estão descritos os fertigramas referentes aos teores de macro e micronutrientes da soja cultivada após a aplicação dos coprodutos em duas classes de solo (RQo e LVdf) e dois cultivos de brachiária. Para o P, nota-se para todos os tratamentos que a suficiência (RAIJ et al., 1997) ocorreu somente na classe RQo. Já para o K, foi observado teores suficientes em todos tratamentos (exceto T5) nas plantas cultivadas no LVdf. Para os nutrientes Ca, Mg, Mn e Zn houve teores suficientes para todos os tratamentos avaliados. Para o S, os teores foram suficientes somente no tratamento T5 no RQo. Para o Cu, os teores foram suficientes no tratamento T6 no LVdf. Para o Fe, com exceção dos tratamentos T1 e T3 no RQo, nos demais, houve teores suficientes para as plantas. Por último, para o N não houve teores considerados suficientes para as plantas. Esses resultados sugerem, na maioria das

situações, que a adubação supriu a demanda necessária para o desenvolvimento da soja. Para o N, embora as sementes tenham sido inoculadas com *Bradyrhizobium* spp., as bactérias se mostraram pouco eficientes na nodulação, principalmente pelas baixas temperaturas registradas ao longo do cultivo (inverno) e o curto período de desenvolvimento da planta (42 DAS – estádio V7).





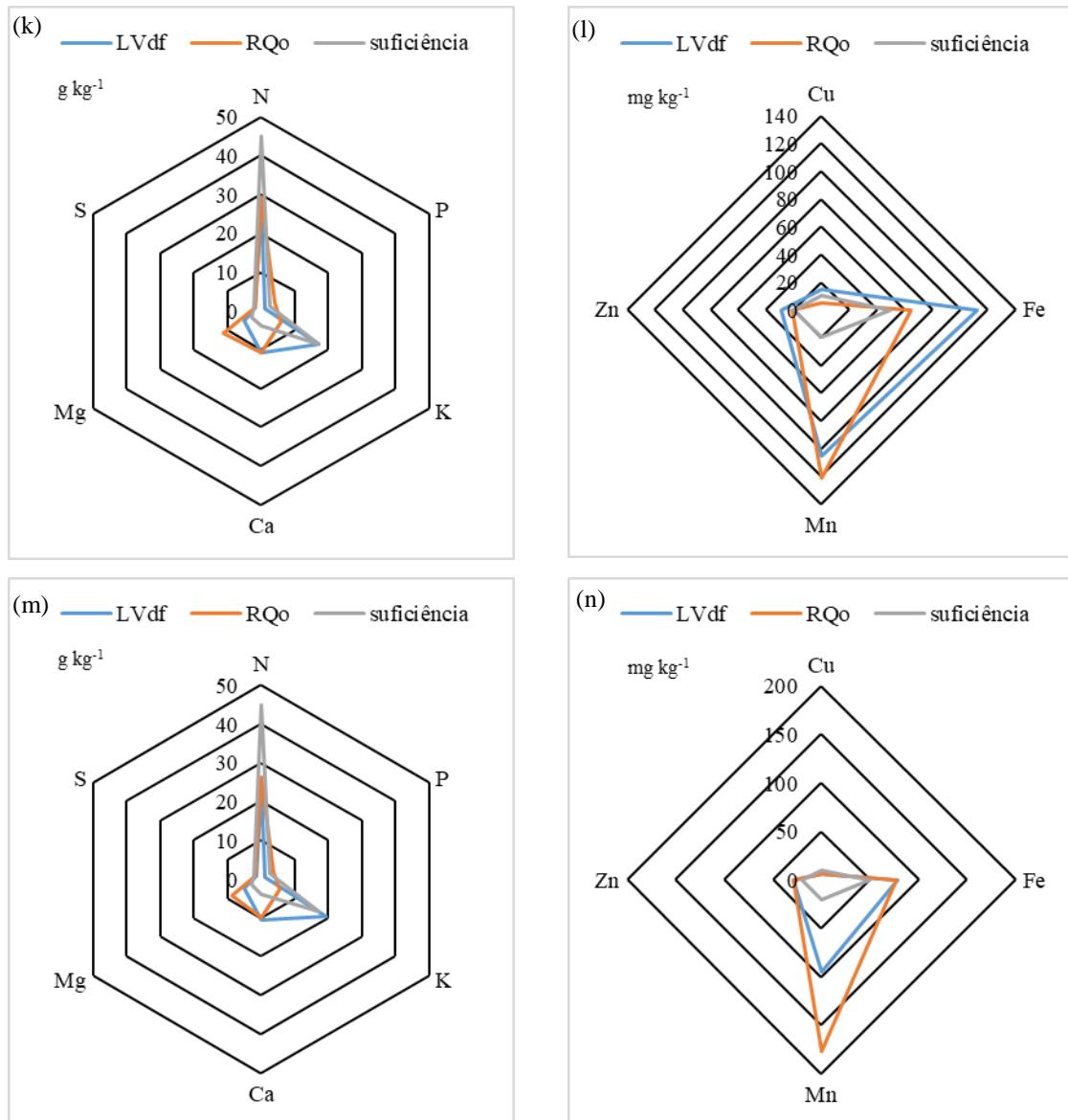


Figura 34. Fertigrama com os teores médios de nutrientes da soja cultivada no LVdf e RQo com seus respectivos níveis de suficiência para os tratamentos: T1 (a-b), T2 (c-d), T3 (e-f), T4 (g-h), T5 (i-j), T6 (k-l) e T7 (m-n).



Figura 35. Desenvolvimento vegetativo da soja cultivada após a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo. Estadio V6.

#### 6.2.7. Índices de vegetação da soja

Observa-se na Tabela 19 os índices de vegetação de folhas de soja submetida a aplicação de coprodutos da mineração de calcário. Nota-se efeito isolado do fator classe de solo, em que somente para os IV's RVI, GRVI, GNIR e RNIR houve diferença estatística entre os solos. Para o RVI e GRVI, observa-se que as plantas cultivadas no tratamento T5 no LVdf apresentaram maiores valores, diferindo do RQo. Trabalhos demonstram que o RVI e GRVI, estão diretamente relacionados a melhores condições nutricionais e de produtividade das plantas (COELHO; ROSALEN; FARIA, 2018; MORENO-GARCÍA et al., 2018). Segundo Xue; Su (2017), IV's extraídos da faixa do Vis-NIR, como o RVI e GRVI, podem estar relacionados a diversas características das plantas, como vigor, teor de água, pigmentos, teor de açúcar e carboidratos, teor de proteína e compostos aromáticos, entre outros. Desse modo, tais resultados são corroborados com os dados obtidos no presente estudo, já que as plantas cultivadas após a aplicação do tratamento T5 no LVdf obtiveram maiores acúmulos de nutrientes como K, Ca e Fe e, consequentemente, maior vigor e produtividade (Figuras 32 e 33).

Já para o GNIR e RNIR, foi observado que as plantas cultivadas no tratamento T5 no RQo apresentaram os valores mais elevados desses IV's. Trabalhos demonstram correlação negativa entre os IV's GNIR e RNIR para com a produtividade e condições nutricionais (DE CARVALHO GASPAROTTO et al., 2015). Isso ocorre porque esses índices de vegetação estão relacionados a componentes estruturais das folhas (PIMSTEIN et al., 2011) que estão diretamente relacionados a condição nutricional das plantas. Desse modo, as plantas cultivadas no tratamento T5 no RQo ao produzir menores quantidades de MSPA (decorrentes de características nutricionais – Figura 32 e 33) apresentaram menor reflectância na faixa do NIR e, consequentemente, maiores valores de GNIR e RNIR.

Tabela 19. Valores médios de IV's de folhas de soja submetida a aplicação de coprodutos da mineração em duas classes de solo.

Solo	Tratamentos						
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
NDVI							
LVdf	0,65 Aa	0,65 Aa	0,66 Aa	0,66 Aa	0,66 Aa	0,65 Aa	0,66 Aa
RQo	0,64 Aa	0,66 Aa	0,66 Aa	0,66 Aa	0,64 Aa	0,66 Aa	0,66 Aa
GNDVI							
LVdf	0,61 Aa	0,62 Aa	0,61 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	0,62 Aa	0,63 Aa
RQo	0,61 Aa	0,62 Aa	0,63 Aa	0,62 Aa	0,60 Aa	0,61 Aa	0,62 Aa
RVI							
LVdf	4,68 Aa	4,78 Aa	4,86 Aa	4,87 Aa	4,93 Aa	4,78 Aa	4,89 Aa
RQo	4,69 Aa	4,83 Aa	4,93 Aa	4,90 Aa	4,57 Ab	4,81 Aa	4,84 Aa
GRVI							
LVdf	4,10 Aa	4,27 Aa	4,26 Aa	4,35 Aa	4,42 Aa	4,27 Aa	4,40 Aa
RQo	4,18 Aa	4,22 Aa	4,44 Aa	4,30 Aa	4,04 Ab	4,17 Aa	4,21 Aa
GNIR							
LVdf	0,25 Aa	0,23 Aa	0,24 Aa	0,23 Aa	0,23 Ab	0,24 Aa	0,23 Aa
RQo	0,24 Aa	0,24 Aa	0,23 Aa	0,23 Aa	0,25 Aa	0,24 Aa	0,24 Aa
RNIR							
LVdf	0,21 Aa	0,21 Aa	0,21 Aa	0,21 Aa	0,20 Ab	0,21 Aa	0,20 Aa
RQo	0,22 Aa	0,21 Aa	0,20 Aa	0,20 Aa	0,22 Aa	0,21 Aa	0,21 Aa
IRVI							
LVdf	0,11 Aa	0,11 Aa	0,11 Aa	0,11 Aa	0,12 Aa	0,12 Aa	0,12 Aa
RQo	0,11 Aa	0,11 Aa	0,12 Aa	0,11 Aa	0,11 Aa	0,11 Aa	0,11 Aa

\* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, minúscula na coluna e maiúscula na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para os índices NDVI, GNDVI e IRVI, tendo em vista a diferença entre os tratamentos no que se refere ao acúmulo dos nutrientes e produção de MSPA da soja, a não significância estatística para esses índices não era esperada, já que trabalhos demonstram a relação desses índices com aspectos nutricionais e de produtividade das plantas (COELHO; ROSALEN; FARIA, 2018; WANG et al., 2014).

#### **6.2.8. Discussão geral do estudo II**

Os resultados demonstram que os coprodutos da mineração de calcário das Formações Irati e Corumbataí possuem potencial agronômico como fontes de nutrientes para as culturas da brachiária e soja (plantas teste). Para o primeiro cultivo da brachiária, de forma geral, tais insumos possibilitaram, em diferentes proporções, maiores acúmulos de: K, S e Fe no LVdf e Ca, Mg, S e Fe no RQo. No segundo cultivo da brachiária, os coprodutos proporcionaram maiores acúmulos de K e Cu no LVdf e S, Ca, Mg, Cu e Fe no RQo. Para a soja, os coprodutos incrementaram o acúmulo de Fe no LVdf e N, P, Ca, Mg e S e Fe no RQo. Além disso, em ambas classes de solo, os dois cultivos da brachiária e o cultivo da soja produziram maior MSPA com a aplicação dos coprodutos, principalmente devido a melhores condições nutricionais.

Quanto aos solos avaliados, o principal objetivo da escolha de duas classes de solos contrastantes foi demonstrar que os coprodutos avaliados geralmente têm potencial agronômico em solos com baixa capacidade de fornecer nutrientes, como o RQo e, por outro lado, são pouco eficientes em solos com alta capacidade de suprimento de nutrientes, como o LVdf. Assim, estudos que demonstram a ineficiência de rochas em pó como fonte de nutrientes podem frequentemente estar relacionados à baixa capacidade de resposta de solos com um bom suprimento de nutrientes, como no presente trabalho para o LVdf. Outras propriedades como o teor dos nutrientes e a solubilidade dos minerais presentes na rocha são fundamentais para o sucesso da utilização de tais materiais como fonte de nutrientes para as plantas.

Ademais, pesquisas que objetivam encontrar culturas (PEREZ et al., 2007; ZHANG; KONG, 2014) e microorganismos (GUNDALA; CHINTHALA; SREENIVASULU, 2013; ZHANG; KONG, 2014) que visam aumentar a solubilização de materiais com baixa solubilidade, como a ilita presente no siltito argiloso (T3), são necessárias para viabilizar a utilização desses insumos.

Por outro lado, embora tenha havido certa variabilidade entre os tratamentos quanto ao acúmulo de nutrientes e produtividade das plantas de brachiária e soja, para os índices de

vegetação, não foi possível observar grandes diferenças entre os tratamentos (principalmente para a soja). Isso demonstra a limitação da utilização desses índices em captar a variabilidade existente em condições de plantas consideradas com suficiência nutricional, como foi o caso dos dois cultivos da brachiária. No caso da soja, a utilização de fontes multinutrientes permitiu que as plantas cultivadas após aplicação desses materiais apresentem ampla condição nutricional (Figura 34). Assim, determinados tratamentos apresentaram suficiência de determinado nutriente e deficiência de outro (conforme fertigrama), o que dificulta a geração de um índice que consiga captar tais diferenças.

Diversos estudos demonstram os potenciais (ALBAYRAK, 2008; OLIVEIRA et al., 2017) e as limitações (MAHAJAN et al., 2014; XUE; SU, 2017) da utilização de índices de vegetação e suas correlações com absorção de determinados nutrientes pelas plantas. No presente trabalho, os resultados obtidos demonstraram também essas potencialidades e dificuldades nas correlações com determinados nutrientes. Mesmo assim, dentre os IV's, o GNDVI se mostrou o com a maior capacidade de distinção entre os tratamentos.

### **6.3. Estudo III - Avaliação por meio de análise química de rotina e sensoriamento remoto de insumos fontes de K, Ca, Mg e S aplicados na cultura da cana-de-açúcar**

#### **6.3.1. Caracterização mineralógica e espectral dos insumos**

Na Figura 36 estão descritos os reflexos de difratometria de raios-X dos pós de rocha estudados. Para o ritmito, foi possível identificar picos referentes a esmectita, quartzo, calcita, dolomita e pirita. Para o siltito argiloso, os picos identificados foram referentes ao quartzo, esmectita, ilita, feldspato e mica. Quanto ao calcário, os picos descritos foram indicativos de calcita, dolomita e quartzo. Já para o fonolito, os picos identificados foram devido aos minerais quartzo, sanidina, analcima, ortoclásio, nefelina e microclina. Os resultados são corroborados com o espectro de reflectância desses minerais (Figura 37) e a literatura disponível da mineralogia dos mesmos (DOS SANTOS TEIXEIRA et al., 2012; GODOY; SARDINHA; MORENO, 2017; HOLANDA et al., 2018, 2019; ZANARDO et al., 2016).

O resumo dos valores 2theta das espécies minerais identificadas nos pós de rocha avaliados é demonstrado na Tabela 19.

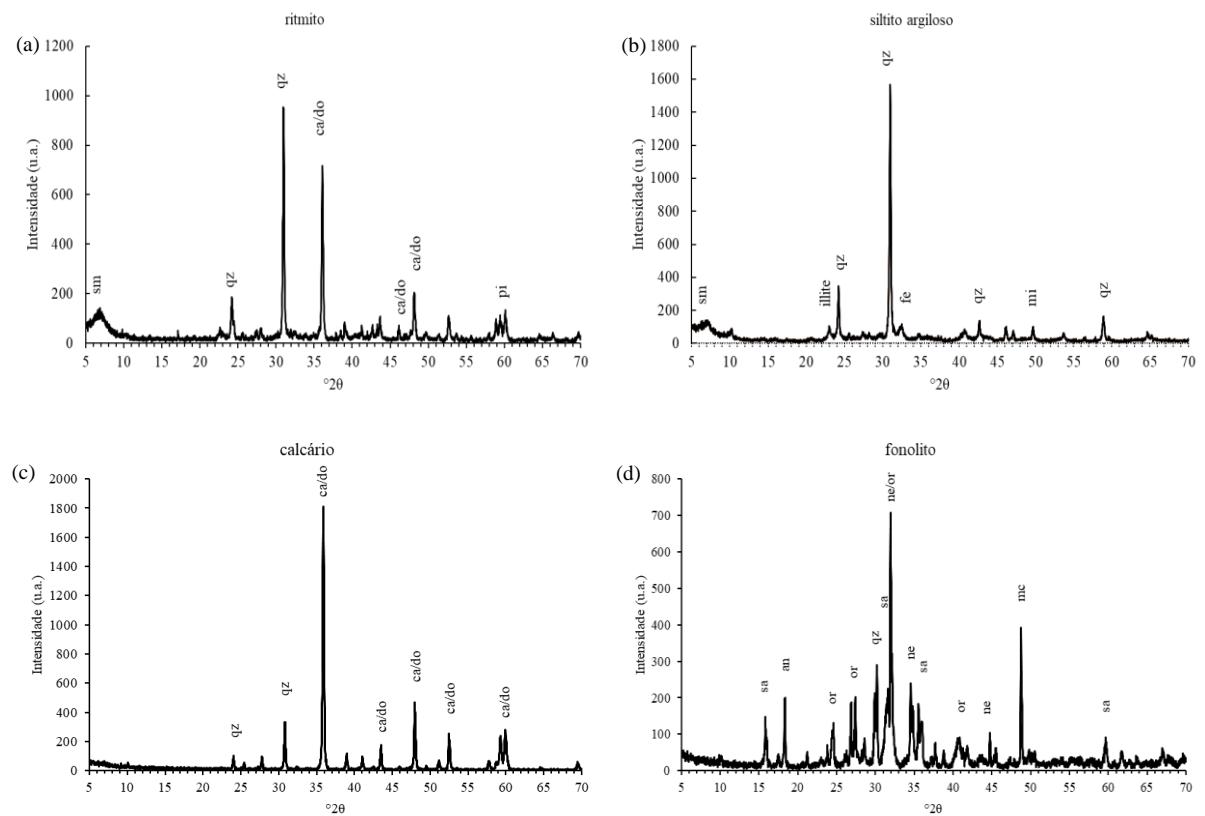


Figura 36. Difratometria de raios-X dos pós de rocha utilizados no trabalho; \*ca/do = calcita e dolomita; sm = esmectita; qz = quartzo; fe = feldspato; pi = pirita; mi = mica; sa = sanidina; an = analcima; or = ortoclásio; ne = nefelina; mc = microclínio.

Tabela 19. Valores de 2theta das espécies minerais encontradas nos pós de rocha usados no estudo.

Pós de rocha	Espécies	Valores de 2theta
Ritmito	sm	7,146
	qz	24,085; 31,183
	ca/do	35,804; 43,726; 47,925
	py	59,988
Siltito argiloso	sm	7,149
	illite	23,140
	qz	24,515; 31,148; 43,151; 59,104
	fe	32,230
Calcário	mi	49,758
	qz	24,085; 30,845
	ca/do	35,877; 43,756; 47,982; 52,850; 60,335
	sa	15,824; 35,910; 59,805
Fonolito	ne	31,686; 44,688; 34,491
	an	18,374
	or	24,477; 27,471; 32,072; 40,733
	mc	48,834

\*ca/do = calcita e dolomita; ze = zeolita; qz = quartzo; fe = feldspato; py = pirita; mi = mica; sa = sanidina; an = analcima; or = ortoclásio; ne = nefelina; mc = microclínio.

Observa-se na Figura 37 que o fator de reflectância dos pós de rocha avaliados variaram tanto em intensidade de reflectância média, quanto em inflexões. Para o ritmito, foram observadas inflexões referentes aos minerais calcita e dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) (FANG; XU, 2018; ZAINI; VAN DER MEER; VAN DER WERFF, 2012), à vibração de moléculas de água nos argilominerais 2:1 (VICENTE; DE SOUZA FILHO, 2011), caulinita (DEMATTÉ et al., 2015), albíta e mica (KOKALY et al., 2017). Quanto ao siltito argiloso, notam-se concavidades devido aos óxidos de ferro (DUCART et al., 2016), argilominerais 2:1 (VICENTE; DE SOUZA FILHO, 2011), caulinita (DEMATTÉ et al., 2015), clorita (FANG et al., 2018) e feldspato (AHMAD; SHAH; KHAN, 2016). Para o calcário, houve inflexões referentes a calcita e dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) (ZAINI; VAN DER MEER; VAN DER WERFF, 2012). Por último, o fonolito apresentou inflexões devido a zeólita (HAUFF, 2008; SUN et al., 2010), nefelina, feldspato e argilominerais 2:1 (KOKALY et al., 2017).

Tais resultados demonstram o potencial da espectroscopia Vis-NIR-SWIR em diferenciar materiais rochosos, identificando as concavidades referentes aos seus minerais. Diversos artigos consideraram o uso dessa técnica para caracterizar e diferenciar solos e rochas (DILL, 2016; FANG et al., 2018; MANZARI et al., 2016; RAMANAIDOU et al., 2015). No caso da mineração, isso permite otimizar o processo de lavra ao fazer o zoneamento de forma rápida e de baixo custo dos locais em que há o mineral de interesse.

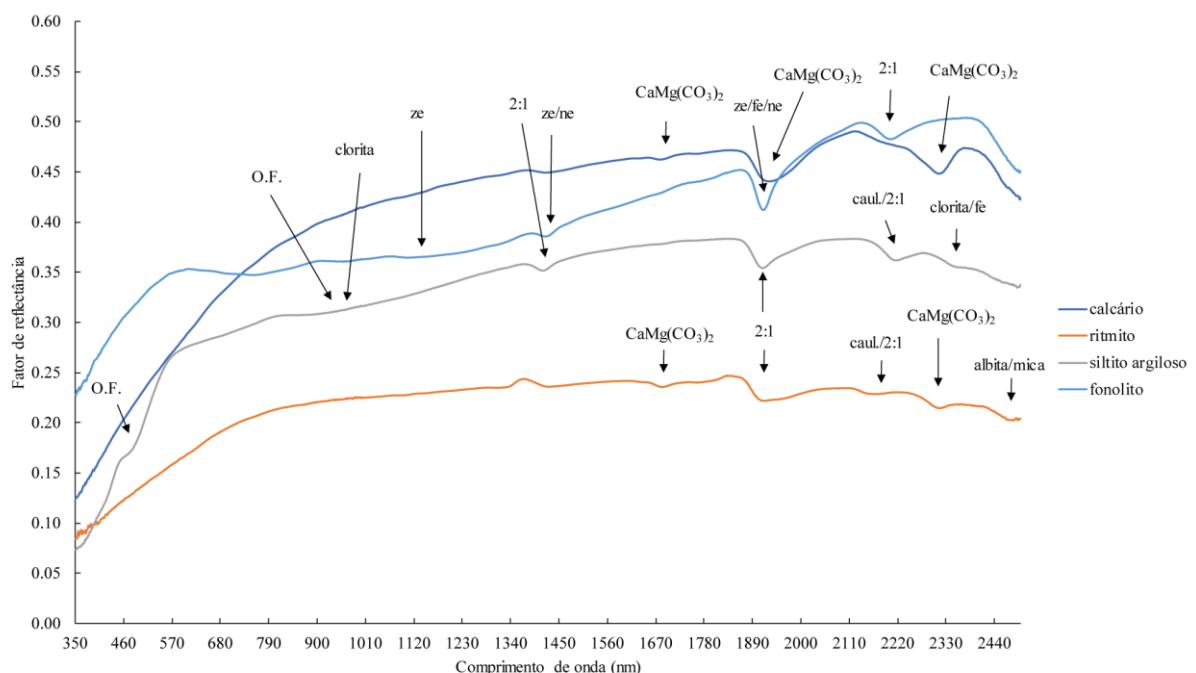


Figura 37. Fator de reflectância dos pós de rocha utilizados no estudo. O.F. = óxidos de Fe; ze = zeólita; 2:1 = esmectita, montmorillonite, ilita; ne = nefelina; fe = feldspato; caul. = caulinita.

### 6.3.2. Atributos químicos do solo

Os valores de F e os coeficientes de variação (CV) dos atributos químicos do solo em duas profundidades aos 425 DAP da cultura da cana-de-açúcar submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K estão descritos na Tabela 20. Na profundidade 0 - 20 cm, para a fonte de variação parcela (fator primário), nota-se que houve significância ( $p < 0,01$ ) somente para os atributos pH,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ . Para a fonte de variação subparcela (fator secundário), houve significância ( $p < 0,01$ ) somente para o atributo  $\text{K}^+$ . Ademais, somente para o pH houve efeito significativo ( $p < 0,05$ ) para a interação parcela e subparcela. Já na profundidade 20 - 40 cm, para o fator primário, com exceção do  $\text{K}^+$ , nota-se que houve significância para todos os atributos avaliados. Para o fator secundário, houve significância ( $p < 0,01$ ) somente para o atributo  $\text{K}^+$ .

Tabela 20. Valor de F e coeficiente de variação (CV) de atributos químicos do solo em duas profundidades aos 425 DAP para as fontes de variação parcela e subpacela.

FV	GL	Atributos do solo				
		pH	P (resina)	$\text{K}^+$ (resina)	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$
----- (valor de F – 0 – 20 cm) -----						
Parcela	5	42,830**	1,820 <sup>ns</sup>	1,069 <sup>ns</sup>	5,246**	19,009**
Subparcela	1	4,027 <sup>ns</sup>	2,119 <sup>ns</sup>	20,461**	0,499 <sup>ns</sup>	4,502 <sup>ns</sup>
Parcela.Subparcela	5	4,077*	1,371 <sup>ns</sup>	0,735 <sup>ns</sup>	0,706 <sup>ns</sup>	1,906 <sup>ns</sup>
Blocos	3	2,274 <sup>ns</sup>	1,962 <sup>ns</sup>	0,265 <sup>ns</sup>	0,078 <sup>ns</sup>	0,592 <sup>ns</sup>
CV <sub>1</sub>		3,52	100,34	57,18	25,66	14,76
CV <sub>2</sub>		4,96	89,61	46,61	23,11	28,05
----- (valor de F – 20 – 40 cm) -----						
Parcela	5	28,111*	4,852*	4,048 <sup>ns</sup>	18,455**	48,049**
Subparcela	1	1,565 <sup>ns</sup>	0,170 <sup>ns</sup>	45,986**	1,794 <sup>ns</sup>	3,689 <sup>ns</sup>
Parcela.Subparcela	5	0,926 <sup>ns</sup>	0,715 <sup>ns</sup>	2,313 <sup>ns</sup>	0,698 <sup>ns</sup>	0,637 <sup>ns</sup>
Blocos	3	1,005 <sup>ns</sup>	3,693*	1,735 <sup>ns</sup>	4,314*	0,144 <sup>ns</sup>
CV <sub>1</sub>		4,64	69,59	42,84	18,14	28,57
CV <sub>2</sub>		4,93	85,14	57,52	25,48	21,92

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; F = Valor observado da estatística F; ns = Não significativo;

\*\* Significativo a 1%; \* Significativo a 5%; CV = coeficiente de variação.

Em relação aos CV, segundo a classificação de Pimentel-Gomes (2009), esse foi classificado na profundidade 0 – 20 cm como: baixo para o pH; médio para  $\text{Mg}^{2+}$  (CV1) e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  (CV2); alto para  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  (CV2) e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  (CV1) e muito alto para o P e  $\text{K}^+$ . Na profundidade 20 – 40 cm, o valor de CV foi considerado: baixo para o pH; médio para o  $\text{Ca}^{2+}$  (CV1) e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  (CV2); alto para  $\text{Ca}^{2+}$  (CV2),  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{S-SO}_4^{2-}$  (CV1) e muito alto para o P e  $\text{K}^+$ . Os valores elevados de CV para determinados atributos, possivelmente, foram decorrentes

do número insuficientes de subamostras (3 pontos por parcela) para uma boa representatividade da área (Santos et al., 2009).

Encontram-se na Tabela 21 os valores médios dos atributos químicos do solo 425 DAP da cultura da cana-de-açúcar submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K. Para a variável pH (0 - 20 cm), nota-se que a aplicação de todos os insumos, na subparcela fonolito, aumentou os valores desse atributo, sendo o tratamento calcário + ritmito ( $\text{pH} = 6,40$ ) o mais eficiente no incremento, diferindo dos tratamentos: testemunha, calcário, ritmito e calcário + fidagran. Esses resultados decorreram dos grandes teores de carbonatos de Ca e Mg aplicados no tratamento calcário + ritmito (Tabela 8), esses carbonatos, ao reagir no solo, liberam  $\text{OH}^-$ , que aumentam o pH do solo (CAVALCANTE et al., 2010). Já na subparcela siltito argiloso, somente a aplicação dos tratamentos: ritmito ( $\text{pH} = 6,05$ ), calcário + ritmito ( $\text{pH} = 6,48$ ) e calcário + fidagran ( $\text{pH} = 5,73$ ) foram diferentes estatisticamente do tratamento testemunha ( $\text{pH} = 4,95$ ), sendo os dois primeiros mais eficientes no aumento do pH. Embora o fidagran possua maiores teores de Ca e Mg do que o ritmito, esse primeiro insumo apresenta em sua constituição  $\text{S}^0$ , que, ao reagir com o solo, possivelmente proporcionou um efeito “tampão” no aumento do pH do solo (BOARO et al., 2014). Quanto ao tratamento calcário + gesso, nota-se que não houve incremento do pH, já que o gesso agrícola não possui capacidade de correção da acidez do solo (FOLONI et al., 2008). Ademais, o tratamento calcário, embora possua maiores quantidades de CaO e MgO do que o ritmito, não foi tão eficiente no aumento do pH, já que foi aplicado em área total, enquanto o ritmito, foi aplicado na linha de plantio (sulcos), ficando assim mais concentrado nos pontos onde foram realizadas as amostragens de solo. Quanto ao fator secundário (subparcela), nota-se que os valores de pH (0 - 20 cm) foram maiores quando a aplicação dos tratamentos calcário e calcário + gesso foi associada ao fonolito. Para os demais tratamentos, não houve diferença entre as subparcelas. Tanto o fonolito quanto o siltito argiloso não apresentam grandes quantidades de carbonatos de cálcio e magnésio em sua constituição (Tabela 5) e, por isso, não se esperava haver diferença entre esses insumos.

Para a variável pH na profundidade 20 - 40 cm, nota-se que somente as aplicações do ritmito e calcário + ritmito aumentaram os valores desse atributo no solo em ambas as subparcelas (fonolito e siltito argiloso). Assim como ocorreu na profundidade 0 - 20 cm, a aplicação do ritmito, de forma isolada ou associado ao calcário, se mostrou mais eficiente em elevar o pH do solo. Nota-se ainda que as aplicações dos demais insumos também apresentaram tendência de aumento do pH na profundidade 20 - 40 cm semelhante àquela encontrada na profundidade superficial (0 - 20 cm). Mesmo com a limitada mobilidade dos  $\text{OH}^-$  e

$\text{HCO}_3^-$  provenientes da dissociação do calcário e ritmito, estudos demonstram que a aplicação de corretivos da acidez na superfície do solo, em condições de alta precipitação e atividade biológica (CORRÊA et al., 2009; SORATTO; CRUSCIOL, 2008), pode elevar o pH do solo até a camada de 20 - 40 cm. Ademais, no presente estudo, a aplicação do ritmito foi realizada no sulco de plantio (0 – 20 cm), o que potencializou os resultados de elevação do pH até a camada 20 - 40 cm.

Segundo Pauletti; Motta (2017), o pH  $\text{CaCl}_2$  recomendado para a cultura da cana-de-açúcar se encontra na faixa de 5,0-5,5. Assim, nota-se que a aplicação dos insumos, em ambas profundidades, proporcionou resultados próximos a faixa adequada para a cultura.

Para a variável teor de P - resina do solo (0 - 20 cm), não houve diferença entre os tratamentos quanto ao teor desse nutriente no solo (Tabela 21). Já na profundidade 20 - 40 cm, para o fator primário, a aplicação do ritmito, na subparcela siltito argiloso, proporcionou os maiores valores de P no solo ( $284,68 \text{ mg dm}^{-3}$ ), diferindo do tratamento testemunha ( $72,25 \text{ mg dm}^{-3}$ ) e calcário + fidagran ( $44,00 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Embora o ritmito não caracteriza-se como fonte de P, os maiores valores de pH encontrados com a aplicação desse insumo possivelmente aumentou a disponibilidade de P pela diminuição da fixação desse elemento no solo (CH'NG; AHMED; MAJID, 2014), bem como pela maior taxa de mineralização do P orgânico (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

Não houve diferença para o fator primário para a variável teor de  $\text{K}^+$  (0 - 20 e 20 - 40 cm) no solo (Tabela 21). Já para o fator secundário, os maiores teores de  $\text{K}^+$  na camada superficial (0-20 cm) ocorreram quando o fonolito foi aplicado juntamente com o calcário ( $0,108 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), calcário + ritmito ( $0,100 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e calcário + fidagran ( $0,108 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). Já na camada subsuperficial (20-40 cm), as aplicações do fonolito + calcário ( $0,078 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), fonolito + ritmito ( $0,100 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e fonolito + calcário + gesso ( $0,105 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), apresentaram os maiores valores de  $\text{K}^+$ .

A rocha fonolito apresenta em sua constituição minerais fontes de  $\text{K}^+$ , como sanidina, ortoclásio, nefelina e microclina (Figura 36), que mostraram ser mais solúveis que os minerais potássicos ilita e esmectita predominantemente presentes no siltito argiloso, assim como relatado por Pessoa et al. (2015) e dos Santos Teixeira et al. (2015). Além disso, esses resultados são corroborados por outros trabalhos que demonstram que a aplicação do fonolito apresenta potencial de utilização como fonte de nutrientes para crucíferas (VON WILPERT; LUKES, 2003) e, quando associado a micorriza, provém benefícios para os parâmetros de crescimento e nutrição do *Eucalyptus saligna* (SCHOEN; AUMOND; STÜRMER, 2016).

Segundo Pauletti; Motta (2017), na profundidade 0 – 20 cm, os teores de K<sup>+</sup> estiveram na classe de interpretação “muito baixo” para os tratamentos testemunha e para todos onde houve aplicação do siltito argiloso. Para os demais tratamentos onde houve aplicação do fonolito, os teores foram considerados ‘baixos’. Já na profundidade 20 – 40 cm, os teores foram considerados ‘baixos’ para os tratamentos calcário + fonolito, ritmito + fonolito e calcário + gesso + fonolito, além de ‘muito baixos’ para os demais tratamentos.

Para a variável teor de Ca<sup>2+</sup> do solo, na profundidade de 0-20 cm (subparcela fonolito), as aplicações de calcário (1,68 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e calcário + ritmito (1,70 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) apresentaram os maiores valores desse nutriente, diferindo do tratamento testemunha (0,88 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>). Já na subparcela siltito argiloso, os maiores valores de Ca<sup>2+</sup> ocorreram com as aplicações de ritmito (1,83 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e calcário + ritmito (1,75 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>). Tanto o calcário quanto o ritmito, apresentam calcita e dolomita em sua constituição (Figura 36), o que proporcionou o aporte de cálcio ao solo. Para o ritmito, mesmo com a quantidade menor de Ca aplicada em comparação ao calcário (Tabela 8), sua distribuição no sulco de plantio potencializou tal resultado, já que a amostragem de solo foi realizada na linha de plantio.

Na profundidade subsuperficial (20 - 40 cm), nas subparcelas fonolito e siltito argiloso, a aplicação do ritmito proporcionou acréscimo de Ca<sup>2+</sup> de 107 e 81 %, respectivamente, em relação ao tratamento testemunha. Ademais, nas duas profundidades avaliadas, não houve diferença entre o fator secundário para os teores de Ca<sup>2+</sup>, já que ambos os insumos (fonolito e siltito argiloso) apresentam quantidades diminutas desse nutriente em sua constituição (Tabela 5).

A aplicação de rochas em pó como fontes de cálcio já é muito difundida no Brasil. Para isso, normalmente utiliza-se o calcário, que pode ser calcítico, magnesiano ou dolomítico quando apresenta menos de 5% de MgO, de 5-12% de MgO e acima de 12% de MgO, respectivamente (BROCH; RANNO, 2008). Além do calcário, outras rochas fontes de cálcio podem ser utilizadas na agricultura, como o gesso (RAMOS et al., 2013), arenito vulcânico, carbonatito (MARTINS et al., 2008; MOREIRA et al., 2006), apatita, kamafugito (LUZ et al., 2010) ou subprodutos da mineração, como brechas alcalinas (HOFF et al., 2017) e da indústria, como escórias da siderurgia (LUZ et al., 2010).

Segundo Pauletti; Motta (2017), na profundidade 0 – 20 cm, os teores de Ca<sup>2+</sup> foram enquadrados na classe de interpretação “baixo” para os tratamentos testemunha de ambas subparcelas (fonolito e siltito argiloso) e foram considerados ‘médios’ para os demais

tratamentos. Já na profundidade 20 – 40 cm, os teores foram considerados ‘médios’ para todos os tratamentos.

Para a variável teor de Mg<sup>2+</sup> no solo, em ambas subparcelas e profundidades (0 - 20 e 20 - 40 cm), os tratamentos ritmito e calcário + ritmito proporcionaram os maiores valores desse nutriente no solo, diferindo do tratamento testemunha (Tabela 21). Na profundidade 0 – 20 cm, os insumos ritmito e calcário + ritmito permitiram, respectivamente, aporte médio de 190 e 218 % em relação ao tratamento testemunha. Já na profundidade 20 – 40 cm, para os mesmos insumos (em ambas subparcelas), o incremento foi ainda maior, variando entre 236 e 608 % em relação a testemunha. Tanto o calcário quanto o ritmito apresentam dolomita em sua constituição (Figura 36), o que proporcionou tal incremento de Mg<sup>2+</sup> no solo (SENBAYRAM et al., 2016). Ademais, embora a quantidade aplicada de Mg<sup>2+</sup> tenha sido menor que a de Ca<sup>2+</sup> (Tabela 8), nota-se que o incremento do primeiro foi maior, uma vez que a amostragem de solo foi realizada após o cultivo da cana-de-açúcar, que extraí do solo maiores quantidades de Ca<sup>2+</sup> em relação ao Mg<sup>2+</sup> (OLIVEIRA et al., 2010).

Segundo Pauletti; Motta (2017), na profundidade 0 – 20 cm, os teores de Mg<sup>2+</sup> enquadram-se na classe de interpretação “baixo” para os tratamentos testemunha de ambas subparcelas e foram considerados ‘médios’ para os demais tratamentos. Já na profundidade 20 – 40 cm, os teores de Mg<sup>2+</sup> oscilaram entre baixo, médio e alto, dado os diferentes potenciais de incremento desse nutriente pelos insumos.

Para a variável teor de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, na profundidade 0 - 20 cm, não houve diferença estatística ( $p > 0,05$ ) entre os tratamentos (Tabela 21). Já na profundidade 20 - 40 cm, na subparcela fonolito, a aplicação do ritmito e calcário + gesso elevou os teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo em 72 e 88 %, respectivamente, quando comparado ao tratamento testemunha. Nesse sentido, diversos trabalhos demonstram o potencial de utilização do gesso como fonte de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ao solo (GELAIN et al., 2011; PIAS et al., 2019). Para o ritmito, o incremento de enxofre se deu através da oxidação da pirita (presente em sua constituição - Figura 8), liberando S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ao solo (BORILOVA et al., 2018). Ademais, o incremento do pH com a aplicação desses insumos promoveu aumento da mineralização do S-orgânico e redução da adsorção de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, o que proporcionou, consequentemente, maior disponibilidade de sulfato ao solo (CASAGRANDE et al., 2003).

Tabela 21. Valores médios de atributos químicos do solo em duas profundidades aos 425 DAP da cultura da cana-de-açúcar submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K.

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
pH (CaCl <sub>2</sub> ) 0 – 20 cm						
fonolito	5,08 Ca	5,85 Ba	5,85 Ba	6,40 Aa	5,88 Ba	5,65 Ba
siltito argiloso	4,95 Da	5,38 CDb	6,05 ABa	6,48 Aa	5,43 CDb	5,73 BCa
pH (CaCl <sub>2</sub> ) 20 – 40 cm						
fonolito	5,18 Ba	5,63 Ba	6,25 Aa	6,30 Aa	5,63 Ba	5,63 Ba
siltito argiloso	5,03 Ba	5,48 Ba	6,23 Aa	6,50 Aa	5,28 Ba	5,53 Ba
P - resina (mg dm <sup>-3</sup> ) 0 – 20 cm						
fonolito	35,50 Aa	81,70 Aa	41,75 Aa	89,25 Aa	19,00 Aa	27,50 Aa
siltito argiloso	12,50 Aa	30,33 Aa	73,50 Aa	32,50 Aa	21,25 Aa	22,00 Aa
P - resina (mg dm <sup>-3</sup> ) 20 – 40 cm						
fonolito	61,20 Aa	124,50 Aa	209,70 Aa	161,25 Aa	105,70 Aa	99,50 Aa
siltito argiloso	72,25 Ba	87,75 ABa	284,68 Aa	103,88 ABa	108,75 ABa	44,00 Ba
$K^+ - \text{resina (cmol}_c \text{dm}^{-3}) 0 - 20 \text{ cm}$						
fonolito	0,053 Aa	0,108 Aa	0,083 Aa	0,100 Aa	0,065 Aa	0,108 Aa
siltito argiloso	0,033 Aa	0,038 Ab	0,050 Aa	0,040 Ab	0,035 Aa	0,040 Ab
$K^+ - \text{resina (cmol}_c \text{dm}^{-3}) 20 - 40 \text{ cm}$						
fonolito	0,050 Aa	0,078 Aa	0,100 Aa	0,053 Aa	0,105 Aa	0,055 Aa
siltito argiloso	0,028 Aa	0,020 Ab	0,040 Ab	0,035 Aa	0,030 Ab	0,028 Aa
$Ca^{2+} (\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}) 0 - 20 \text{ cm}$						
fonolito	0,88 Ba	1,68 Aa	1,45 ABa	1,70 Aa	1,33 ABa	1,35 ABa
siltito argiloso	0,90 Ba	1,40 ABa	1,83 Aa	1,75 Aa	1,38 ABa	1,58 ABa
$Ca^{2+} (\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}) 20 - 40 \text{ cm}$						
fonolito	1,35 Ba	1,50 Ba	2,80 Aa	1,90 Ba	1,68 Ba	1,48 Ba
siltito argiloso	1,30 Ba	1,33 Ba	2,35 Aa	2,00 ABa	1,63 ABa	1,38 Ba
$Mg^{2+} (\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}) 0 - 20 \text{ cm}$						
fonolito	0,35 Ca	0,83 ABCa	0,98 ABa	1,28 Aa	0,80 ABCa	0,65 BCa
siltito argiloso	0,50 Ba	0,75 Ba	1,50 Aa	1,35 Aa	0,78 Ba	0,80 Ba
$Mg^{2+} (\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}) 20 - 40 \text{ cm}$						
fonolito	0,23 Ba	0,60 Ba	1,63 Aa	1,38 Aa	0,38 Ba	0,45 Ba
siltito argiloso	0,50 Ba	0,55 Ba	1,70 Aa	1,68 Aa	0,43 Ba	0,60 Ba
$S-SO_4^{2-} (\text{mg dm}^{-3}) 0 - 20 \text{ cm}$						
fonolito	6,50 Aa	7,00 Aa	8,00 Aa	9,00 Aa	8,25 Aa	9,50 Aa
siltito argiloso	6,75 Aa	7,75 Aa	9,50 Aa	9,00 Aa	8,50 Aa	9,00 Aa
$S-SO_4^{2-} (\text{mg dm}^{-3}) 20 - 40 \text{ cm}$						
fonolito	6,25 Ca	7,00 BCa	10,75 ABa	10,00 ABCa	11,75 Aa	8,75 ABCa
siltito argiloso	7,00 Aa	7,00 Aa	10,75 Aa	9,75 Aa	10,25 Aa	9,75 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quanto as profundidades avaliadas, o ligeiro aumento nos teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> na profundidade subsuperficial (20-40 cm) está relacionado a associação do S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> a um cátion (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>), formando um par iônico neutro (CaSO<sub>4</sub><sup>0</sup>, MgSO<sub>4</sub><sup>0</sup>, K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub><sup>0</sup>) e permitindo a alta capacidade do sulfato em movimentar-se ao longo do perfil do solo (PAVAN, 1986). Além disso, a presença de cargas negativas da matéria orgânica predominantemente na superfície do solo, também potencializa o deslocamento do sulfato a profundidade maiores, como avaliado por diversos autores (BESSEN et al., 2019; CAIRES et al., 2004; PAULETTI et al., 2014).

Segundo Pauletti; Motta (2017), em ambas profundidades e para todos os tratamentos, os teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> estiveram acima do nível crítico para a cultura da cana-de-açúcar.

Os valores de F e os coeficientes de variação (CV) para os teores de Si, Cu, Fe, Mn e Zn do solo aos 425 DAP estão descritos na Tabela 22. Na profundidade 0 - 20 cm, para a fonte de variação parcela, nota-se que houve significância para os nutrientes Fe e Mn. Para a fonte de variação subparcela, houve significância ( $p < 0,05$ ) para os teores de Si e Fe. Já na profundidade 20 - 40 cm, para o fator primário (parcela), foi observado significância para todos os atributos avaliados. Para o fator secundário (subparcela), houve significância ( $p < 0,01$ ) somente para o atributo Fe.

Tabela 22. Valor de F e coeficiente de variação (CV) para os teores de Si, Cu, Fe, Mn e Zn do solo em duas profundidades aos 425 DAP para as fontes de variação parcela e subparcela.

FV	GL	Atributos do solo				
		Si	Cu	Fe	Mn	Zn
----- (F value – 0 – 20 cm) -----						
Parcela	5	0,864 <sup>ns</sup>	1,890 <sup>ns</sup>	9,537**	7,193**	0,948 <sup>ns</sup>
Subparcela	1	6,281*	1,692 <sup>ns</sup>	5,497*	0,971 <sup>ns</sup>	0,007 <sup>ns</sup>
Parcela.Subparcela	5	1,130 <sup>ns</sup>	0,266 <sup>ns</sup>	1,407 <sup>ns</sup>	0,660 <sup>ns</sup>	0,627 <sup>ns</sup>
Blocos	3	0,703 <sup>ns</sup>	0,850 <sup>ns</sup>	2,940 <sup>ns</sup>	0,651 <sup>ns</sup>	5,412*
CV <sub>1</sub>		23,46	14,09	22,97	24,10	101,14
CV <sub>2</sub>		14,70	15,47	26,74	24,41	92,76
----- (F value – 20 – 40 cm) -----						
Parcela	5	28,111*	4,852*	3,048*	18,455**	48,04**
Subparcela	1	1,565 <sup>ns</sup>	0,170 <sup>ns</sup>	45,986**	1,794 <sup>ns</sup>	3,689 <sup>ns</sup>
Parcela.Subparcela	5	0,926 <sup>ns</sup>	0,715 <sup>ns</sup>	2,313 <sup>ns</sup>	0,698 <sup>ns</sup>	0,637 <sup>ns</sup>
Blocos	3	1,005 <sup>ns</sup>	3,693*	1,735 <sup>ns</sup>	4,314*	0,144 <sup>ns</sup>
CV <sub>1</sub>		4,64	69,59	42,84	18,14	28,57
CV <sub>2</sub>		4,93	85,14	57,52	25,48	21,92

FV = Fonte de variação; GL = Graus de liberdade; F = Valor observado da estatística F; ns = Não significativo;

\*\* Significativo a 1%; \* Significativo a 5%; CV = coeficiente de variação.

Em relação aos CV, segundo a classificação de Pimentel-Gomes (2009), esse foi classificado na profundidade 0 – 20 cm como: médio para Si (CV2) e Cu; alto para Si (CV1), Fe e Mn; muito alto para o Zn. Na profundidade 20 – 40 cm, o valor de CV foi considerado: baixo para o Si; alto para o Mn e Zn; muito alto para o Cu e Fe. Os valores elevados de CV, para determinados nutrientes, possivelmente, foram decorrentes do número insuficientes de subamostras (3 pontos por parcela) para uma boa representatividade da área (SANTOS et al., 2009).

Na Tabela 23 estão descritos os teores de Si, Cu, Fe, Mn e Zn do solo após 425 dias de aplicação dos insumos. Para os teores de Si na profundidade 0-20 cm, nota-se efeito isolado do fator secundário, em que a aplicação do calcário + ritmito, na subparcela fonolito, apresentou os maiores valores, que diferiram da subparcela siltito argiloso. Já na profundidade 20-40 cm, as aplicações do calcário e ritmito, quando associadas ao fonolito, apresentaram os maiores teores de Si, em média, 42 e 29% superiores aos encontrados na subparcela siltito argiloso.

O fonolito é uma rocha silicática vulcânica que possui aproximadamente 56% de  $\text{SiO}_2$  (Tabela 8). Segundo Korndörfer et al. (2002), solos que apresentam concentrações de Si abaixo de  $20 \text{ mg dm}^{-3}$  (como foi o caso) necessitam ser fertilizados com esse elemento. Nesse sentido, de Fátima Tavares et al. (2018) quando avaliaram o potencial do fonolito como fonte de Si obtiveram maiores teores de Si no solo e na parte aérea da brachiária submetida a aplicação de tal insumo, o que corrobora os resultados obtidos no presente trabalho.

Em relação aos teores de Cu do solo, não foram encontradas diferenças significativas nos tratamentos e profundidades avaliadas. Já para os teores de Fe do solo na profundidade 0-20 cm, para o fator primário, nota-se que as aplicações do calcário + ritmito (em ambas subparcelas) e do calcário + gesso (parcela fonolito) possibilitaram diminuição nos teores desse nutriente. Tal fato deve-se aos efeitos do calcário e do ritmito no aumento do pH do solo, o que ocasionou diminuição na disponibilidade de Fe no solo através da precipitação desse elemento na forma de oxi-hidróxidos (RAIJ, 2011). Esses resultados são corroborados por trabalhos como o de Fonseca; Caires; Barth (2010) e Rodrigues (2017) que demonstraram diminuição nos teores de Fe do solo e da planta, respectivamente, com a aplicação de materiais corretivos.

Tabela 23. Valores médios de Si, Cu, Fe, Mn e Zn do solo em duas profundidades aos 425 DAP da cultura da cana-de-açúcar submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K.

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
Si ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) 0 – 20 cm						
fonolito	4,90 Aa	6,65 Aa	5,02 Aa	5,92 Aa	5,13 Aa	5,90 Aa
siltito argiloso	5,18 Aa	4,97 Aa	4,29 Aa	3,91 Ab	5,18 Aa	4,79 Aa
Si ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) 20 – 40 cm						
fonolito	4,95 Aa	6,94 Aa	6,67 Aa	4,91 Aa	6,81 Aa	5,35 Aa
siltito argiloso	5,76 Aa	4,90 Ab	5,19 Ab	5,12 Aa	5,71 Aa	4,86 Aa
Cu ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) 0 – 20 cm						
fonolito	1,30 Aa	1,03 Aa	1,18 Aa	1,08 Aa	1,13 Aa	1,20 Aa
siltito argiloso	1,35 Aa	1,20 Aa	1,20 Aa	1,13 Aa	1,20 Aa	1,20 Aa
Cu ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) 20 – 40 cm						
fonolito	1,45 Aa	1,30 Aa	1,43 Aa	1,35 Aa	1,45 Aa	1,40 Aa
siltito argiloso	1,48 Aa	1,58 Aa	1,43 Aa	1,33 Aa	1,48 Aa	1,30 Aa
Fe ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) 0 – 20 cm						
fonolito	10,75 Aa	6,75 ABb	7,50 ABa	5,25 Ba	6,25 Ba	8,00 ABa
siltito argiloso	11,75 Aa	10,50 Aa	8,50 ABa	4,75 Ba	8,50 ABa	8,00 ABa
Fe ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) 20 – 40 cm						
fonolito	10,75 Aa	6,75 Ab	6,00 Aa	6,75 Aa	9,25 Aa	6,25 Aa
siltito argiloso	10,50 Aa	11,75 Aa	9,00 Aa	8,00 Aa	10,50 Aa	6,75 Aa
Mn ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) 0 – 20 cm						
fonolito	15,23 Aa	10,88 ABa	12,73 ABa	8,38 Ba	12,18 ABa	10,70 ABa
siltito argiloso	18,33 Aa	13,48 ABa	11,85 Ba	8,70 Ba	12,75 ABa	9,95 Ba
Mn ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) 20 – 40 cm						
fonolito	11,75 Aa	8,23 Aa	9,68 Aa	7,00 Aa	7,75 Aa	7,53 Aa
siltito argiloso	16,40 Aa	10,53 Ba	6,78 Ba	6,68 Ba	9,10 Ba	9,98 Ba
Zn ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) 0 – 20 cm						
fonolito	1,13 Aa	1,00 Aa	1,33 Aa	0,93 Aa	1,60 Aa	1,20 Aa
siltito argiloso	2,50 Aa	0,80 Aa	0,88 Aa	0,63 Aa	1,70 Aa	0,85 Aa
Zn ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) 20 – 40 cm						
fonolito	0,93 Aa	0,60 Aa	0,48 Aa	0,40 Aa	0,63 Aa	0,38 Aa
siltito argiloso	0,50 Aa	0,35 Aa	0,33 Aa	0,45 Aa	0,75 Aa	0,48 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para os teores de Mn do solo na profundidade 0-20 cm, nota-se, para o fator primário, que as aplicações do calcário + ritmito (em ambas subparcelas) e ritmito (subparcela siltito argiloso) contribuíram para diminuição dos teores desse nutriente. Já na profundidade 20-40

cm, as aplicações de todos os insumos, na subparcela siltito argiloso, diminuíram os teores de Mn do solo. Tais fatos são advindos do aumento do pH do solo, o que possibilitou que o Mn se precipitasse no solo na forma de oxi-hidróxidos, diminuindo seus teores (RAIJ, 2011).

Para os teores de Zn não houve diferença entre os tratamentos.

Segundo Pauletti; Motta (2017), os teores de todos os micronutrientes avaliados estiveram na faixa adequada para o cultivo da cana-de-açúcar.

### **6.3.3. Produtividade da cana-de-açúcar planta e seus acúmulos e teores de macro e micronutrientes das folhas**

Na Figura 38 encontram-se os dados de precipitação ao longo do cultivo da cana-de-açúcar. Nota-se que logo após o plantio (02/04/18) houve baixos volumes de precipitação até o mês de agosto de 2018, quando choveu 165 mm. De outubro de 2018 até março de 2019 houve precipitações variando entre abaixo e acima da média para a região. De abril a junho de 2019 os valores de precipitação foram abaixo da média da região. Ao final do cultivo, o volume acumulado ao longo dos 425 dias de cultivo da cana-de-açúcar foi de 1403 mm, próximo a demanda hídrica média para a cultura na região nesse período (SOUZA et al., 2015), contudo, irregularmente distribuído.

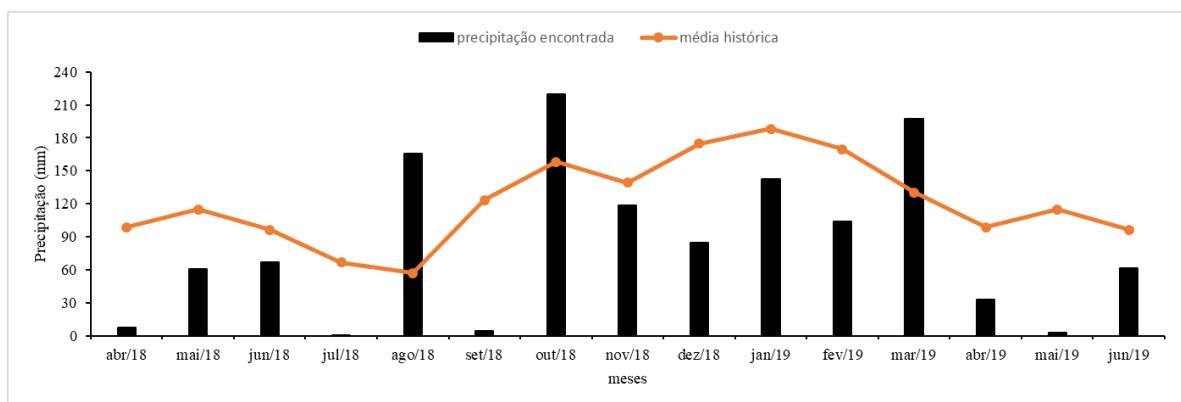


Figura 38. Precipitação acumulada após 425 dias de cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).

Encontram-se na Figura 39 os valores médios de acúmulo de macronutrientes das folhas da cana-de-açúcar aos 210 DAP e produtividade de colmo aos 425 DAP. Para a variável acúmulo de N, comparado ao tratamento testemunha, a aplicação do ritmito (na subparcela fonolito) aumentou em 43 % os valores desse nutriente. Embora não apresente N em sua constituição, a aplicação do ritmito aumentou os valores de pH do solo (Tabela 21), o que proporcionou melhorias nas condições de mineralização do N orgânico (GOULDING, 2016). Ademais, esses resultados mostram uma interação sinérgica entre o enxofre aplicado e o

nitrogênio acumulado (MALAVOLTA; MORAES, 2007), já que o ritmito possibilitou maiores teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> na profundidade subsuperficial do solo (Tabela 21). Em relação ao fator secundário, não houve diferença estatística entre os insumos.

Para a variável P acumulado (Figura 39), na subparcela fonolito, a aplicação do calcário + fidagran ( $8,90 \text{ kg ha}^{-1}$ ) proporcionou os maiores valores desse nutriente, diferindo estatisticamente do tratamento testemunha ( $6,92 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Já na subparcela siltito argiloso, os maiores valores de P acumulado ocorreram com a aplicação do calcário + gesso ( $10,06 \text{ kg ha}^{-1}$ ), diferindo significativamente do tratamento testemunha ( $7,64 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Embora os insumos utilizados não apresentam P em sua constituição, a aplicação desses, ao elevar o pH do solo pela produção de hidroxilas, pode ter promovido a solubilização de Al-P e Fe-P e diminuído a adsorção aos óxidos de Fe e Al (PENN; CAMBERATO, 2019). Ademais, as interações sinérgicas entre o acúmulo de N e P (Figura 39) também podem ter contribuído para tais resultados (FAGERIA, 2001; RAZAQ; ZHANG; SHEN, 2017). Em uma associação próxima, N é o componente estrutural da molécula de clorofila (MARSCHNER, 2011). A síntese de clorofila e carotenóide depende da nutrição mineral. Os pigmentos verdes nas folhas dependem da concentração de P, pois facilita a estabilidade da planta em condições desfavoráveis (BOJOVIĆ; STOJANOVIĆ, 2006). Em mudas de damasco, as condições ideais de P aumentaram o conteúdo total de clorofila e o crescimento da planta (DUTT; SHARMA; KUMAR, 2013).

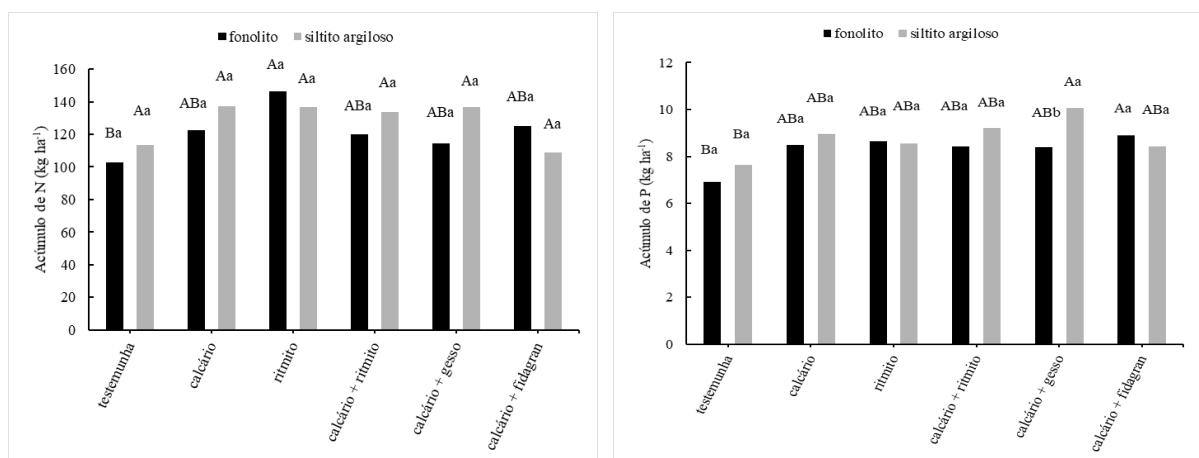
Quanto ao acúmulo de K, apenas na subparcela siltito argiloso houve diferença entre os insumos referentes ao fator primário, sendo a aplicação do calcário + ritmito ( $47,22 \text{ kg ha}^{-1}$ ) responsável por um aporte de 37 % em relação ao tratamento testemunha, que obteve um acúmulo de  $34,37 \text{ kg ha}^{-1}$  (Figura 39). Embora as quantidades de K<sub>2</sub>O do calcário e ritmito sejam diminutas (Tabela 5) e não houve diferença estatística para a variável K<sup>+</sup> do solo (para o fator primário) (Tabela 21), a aplicação do calcário + ritmito através do aumento do pH do solo, possivelmente, promoveu o incremento na disponibilidade de K<sup>+</sup> do solo (RAIJ, 2011). Quanto ao fator secundário, não houve diferença entre os tratamentos.

Para a variável acúmulo de Ca, não houve diferença entre os tratamentos (Figura 39). Já para o acúmulo de Mg, nota-se que na subparcela fonolito, a aplicação do calcário + fidagran proporcionou acréscimo de aproximadamente 35 % em relação ao tratamento testemunha. Esses resultados podem estar relacionados a um efeito sinérgico entre o P e Mg (FAGERIA, 2001), já que a aplicação do calcário + fidagran também possibilitou maiores acúmulos de P.

Em relação ao fator secundário, não houve diferença entre os tratamentos para o acúmulo de Mg.

Para o S acumulado (Figura 39), para o fator primário, as aplicações do calcário + gesso e calcário + fidagran (na subparcela fonolito) proporcionaram incremento de aproximadamente 45 % em relação ao tratamento testemunha. Tal fato deve-se, possivelmente, pelo fornecimento de S por esses insumos (Tabela 21) e pelo aumento do pH pela aplicação do calcário (Tabela 21), que favorece a mineralização da matéria orgânica e diminui a adsorção de sulfato (CASAGRANDE et al., 2003), favorecendo o acúmulo de S. Para o fator secundário, a aplicação do calcário + gesso (na subparcela siltito argiloso) apresentou os maiores valores de S acumulados, diferindo estatisticamente da subparcela fonolito. Esses resultados ocorreram, provavelmente, pela interação sinérgica entre absorção de nitrogênio e enxofre (MALAVOLTA & MORAES, 2007), já que o acúmulo de N também foi maior quando o calcário + gesso foi aplicado na subparcela siltito argiloso (Figura 39).

Para o fator produtividade de colmo (425 DAP), nota-se que não houve diferença estatística entre as parcelas e subparcelas ( $p > 0,05$ ). Contudo, observa-se que a aplicação dos insumos proporcionou elevação na produtividade da cultura, especialmente para o tratamento calcário + ritmito (em ambas subparcelas), que apresentou, em média, 16 % de aumento de produtividade em relação a testemunha.



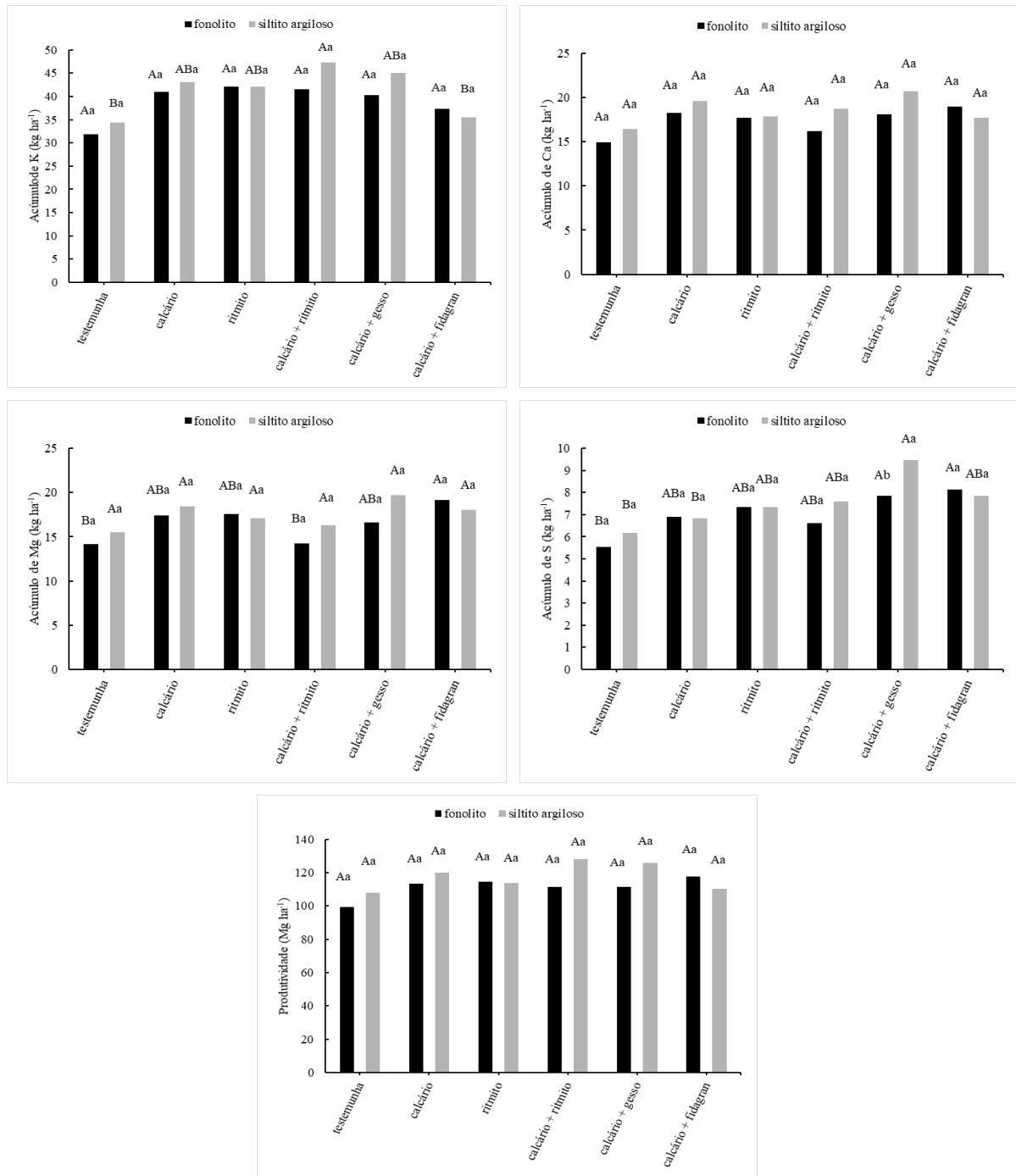


Figura 39. Acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S nas folhas de cana-de-açúcar aos 210 DAP e produtividade de colmo aos 425 DAP após a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K.

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula para parcela (fator primário) e minúscula para subparcela (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observa-se na Figura 40 o acúmulo de micronutrientes pelas folhas da cana-de-açúcar aos 210 DAP. Nota-se para a variável acúmulo de Cu que não houve diferença estatística entre os tratamentos. Já para o acúmulo de Fe, houve efeito do fator primário, em que a aplicação do

calcário + gesso possibilitou aumento médio de 70% no acúmulo desse nutriente em ambas subparcelas. Esses resultados não eram esperados, haja visto que não houve incremento nos teores de  $\text{Fe}^{2+}$  do solo em tais tratamentos (Tabela 23).

Para o acúmulo de Mn, nota-se que a aplicação dos insumos não influenciou positivamente no acúmulo desse nutriente. Além do mais, para o calcário + fidagran, na subparcela siltito argiloso, as aplicações desses insumos promoveram diminuição no acúmulo de Mn. Tal fato deve-se ao acréscimo de pH do solo em tais tratamentos (Tabela 21), o que promoveu a precipitação do Mn no solo na forma de oxi-hidróxidos, diminuindo a disponibilidade para as plantas (RAIJ, 2011).

Em relação ao acúmulo de Zn, embora tenha havido uma tendência de acréscimo dessa variável com a aplicação dos insumos, não foram observadas diferenças entre os tratamentos.

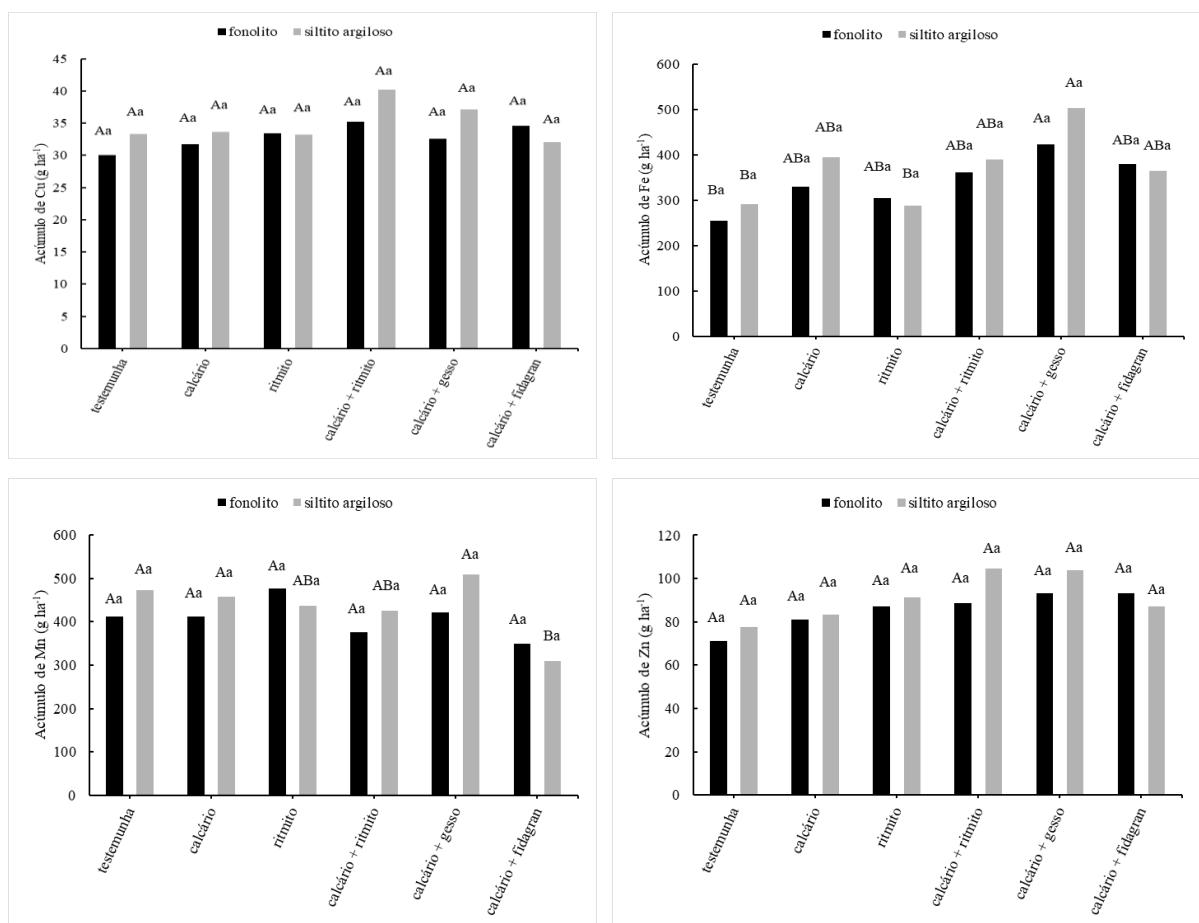
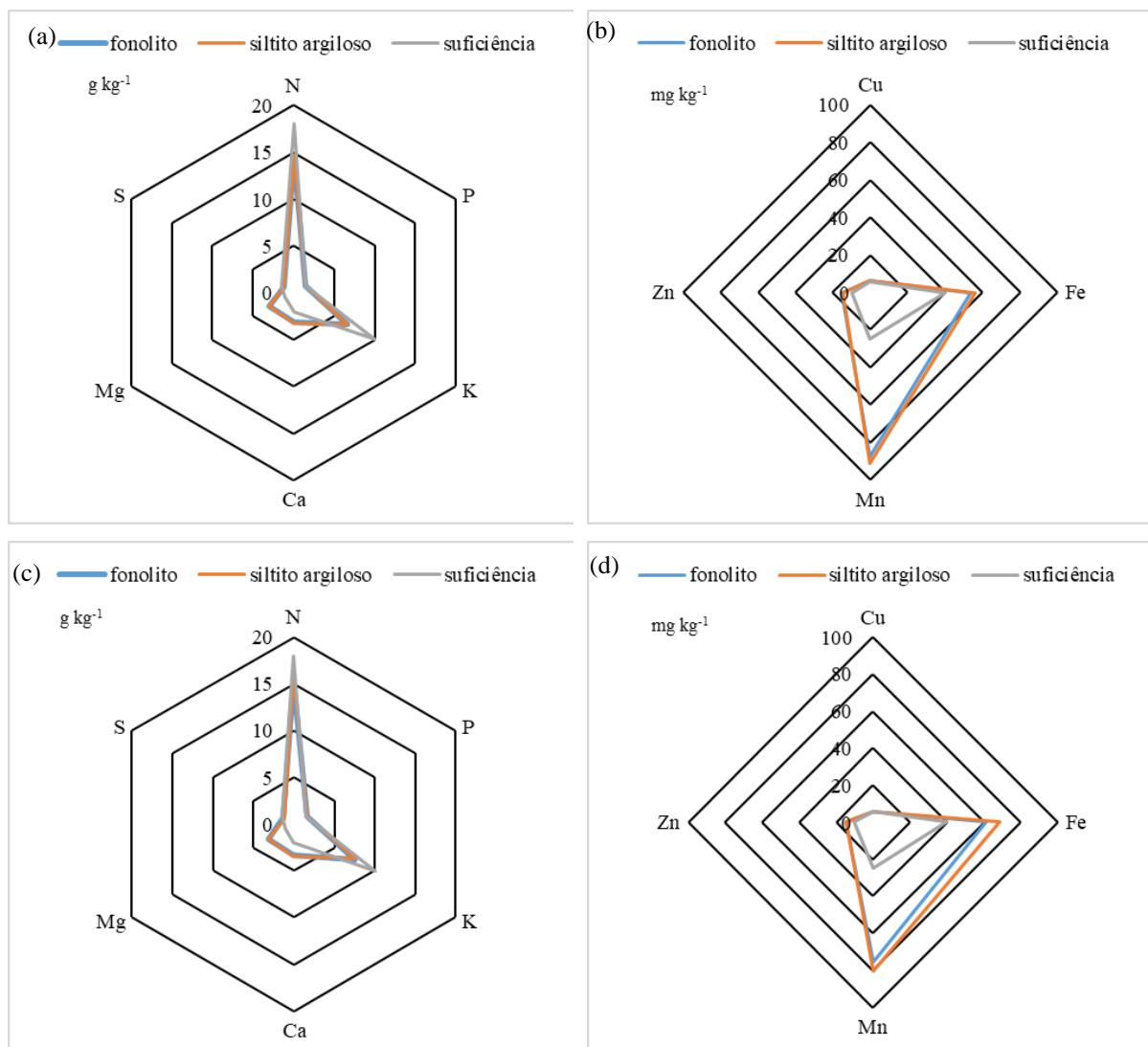
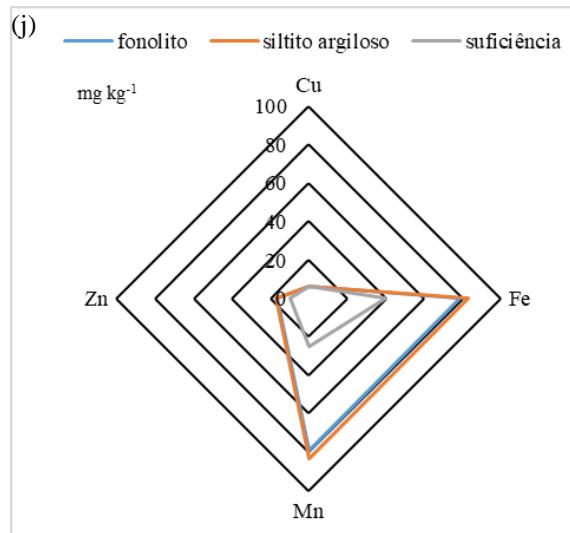
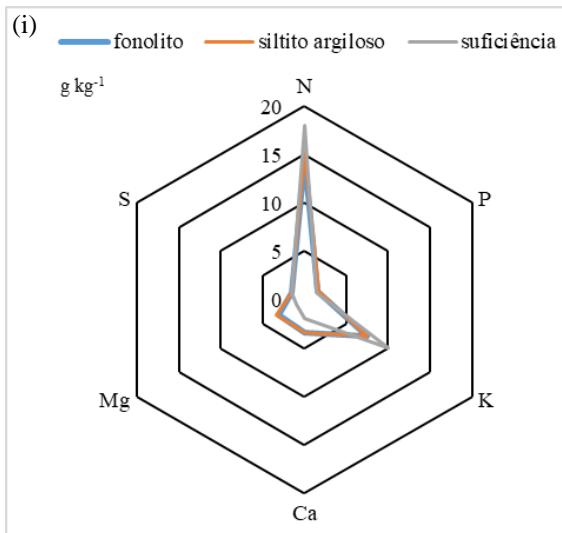
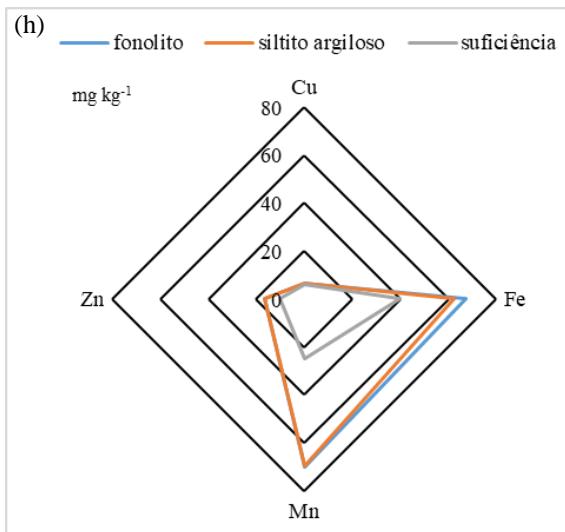
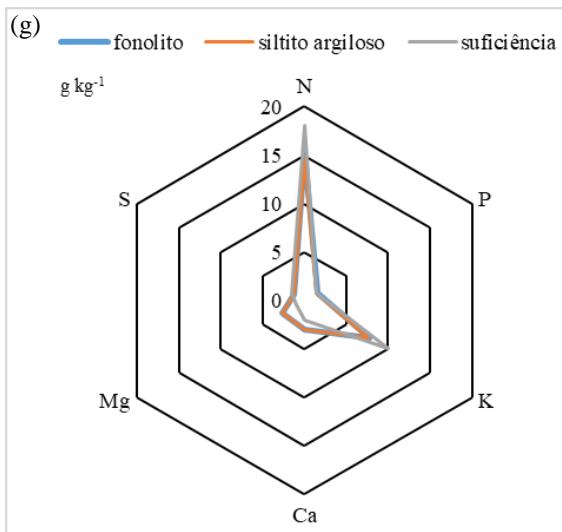
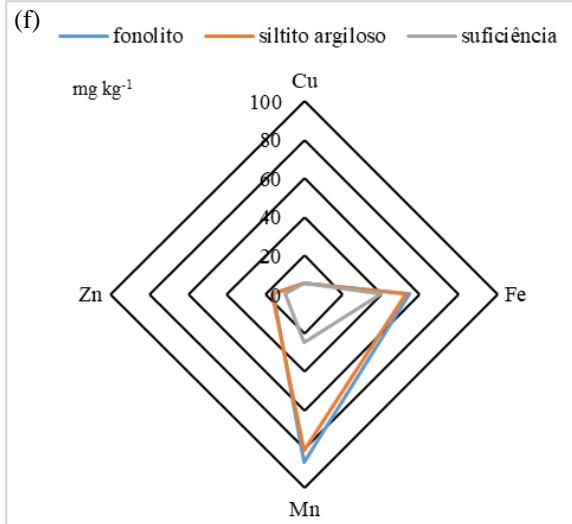
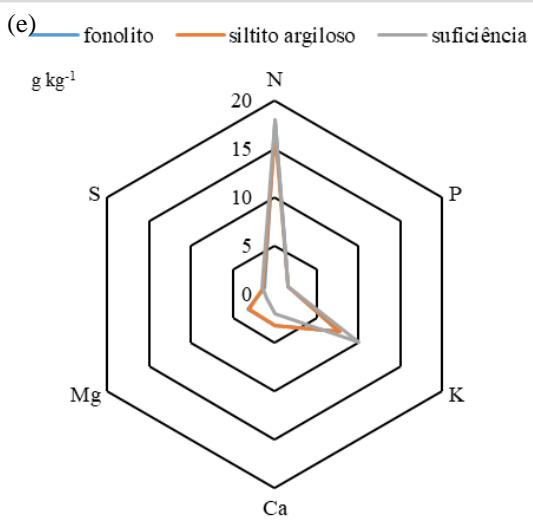


Figura 40. Acúmulo de Cu, Fe, Mn e Zn nas folhas de cana-de-açúcar aos 210 DAP e após a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K. \*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula para parcela (fator primário) e minúscula para subparcela (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Figura 41 encontram-se o fertigrama dos teores de nutrientes das folhas da cana-de-açúcar aos 210 DAP. Para os nutrientes N e K, nota-se que não houve suficiência de seus teores para nenhum dos tratamentos avaliados. Quanto ao P, observa-se suficiência para os tratamentos: calcário; ritmito; calcário + ritmito; calcário + gesso e calcário + fidagran. Para os nutrientes Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn, os tratamentos que apresentaram suficiência foram: testemunha; calcário; ritmito; calcário + ritmito; calcário + gesso; calcário + fidagran. Por último, para o S, somente o tratamento calcário + gesso proporcionou teores considerados suficientes para a cana-de-açúcar.

Quanto ao fator secundário, a sobreposição das linhas entre as subparcelas, para todos os nutrientes avaliados, indicam a semelhança entre o efeito do fonolito e siltito argiloso na suficiência dos nutrientes para as plantas.





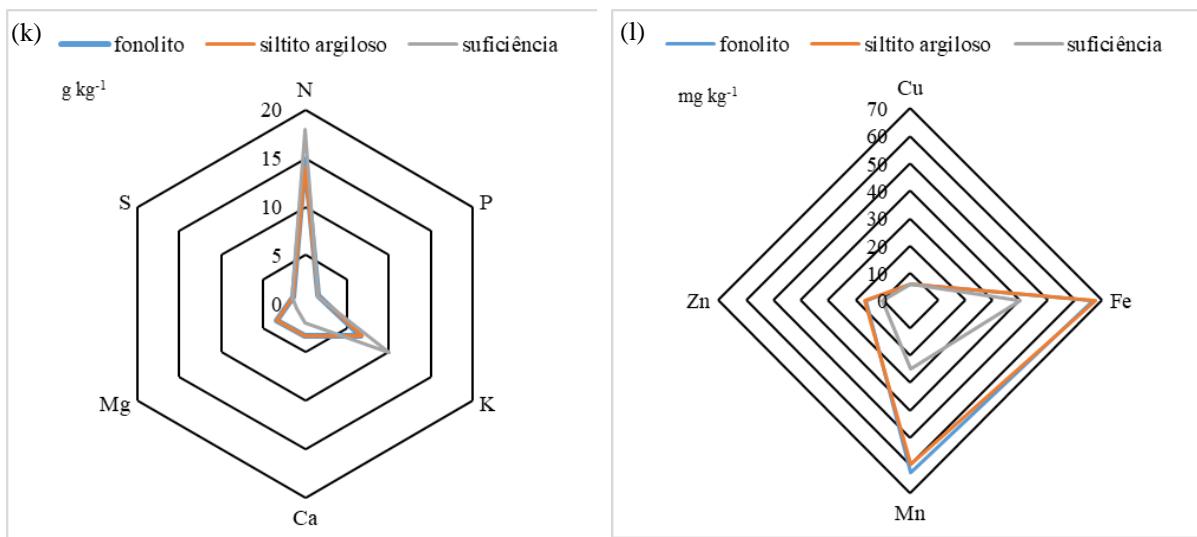


Figura 41. Fertigrama com os teores médios de nutrientes da cana-de-açúcar (ciclo planta) cultivada nas subparcelas fonolito e siltito argiloso com seus respectivos níveis de suficiência para as parcelas: testemunha (a-b), calcário (c-d), ritmito (e-f), calcário + ritmito (g-h), calcário + gesso (i-j), calcário + fidagran (k-l).

#### 6.3.4. Parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar planta

Observa-se na Tabela 24 os parâmetros tecnológicos da cultura da cana-de-açúcar (425 DAP) submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K.

Para a variável Pol (% caldo e % cana), nota-se efeito isolado do fator secundário, em que a aplicação do calcário + fonolito proporcionou maiores valores dessa variável, diferindo do calcário + siltito argiloso. O primeiro tratamento, comparado ao segundo, proporcionou maiores valores de pH, K e Si do solo, o que, pode ter refletido beneficamente em maiores acúmulos de sacarose pelo colmo (Pol). Segundo Prado; Pancelli (2008), teores de nutrientes no solo podem influenciar positivamente no acúmulo de sacarose pelas cana-de-açúcar. da Silva et al. (2014) não encontraram efeito significativo da calagem sobre o pol (% caldo), ao contrário de Caldeira; Casedei (2010), que encontraram efeito significativo da calagem no aumento de Pol em três cultivares da cana-de-açúcar.

Nota-se ainda que no momento do corte a cana-de-açúcar apresentava-se madura, pois os teores encontrados estavam acima de 12,257% de Pol (% cana), valor esse considerado como cana-padrão em condições tecnológicas e econômicas de processamento industrial (CONSECANA, 2006). Segundo Dinardo-Miranda; Fracasso; Perecin (2011) o Pol é um dos principais fatores considerados na avaliação da cana-de-açúcar para o pagamento.

Para a variável pureza da cana-de-açúcar, para o fator secundário, a aplicação do fonolito na parcela calcário + fidagran incrementou a pureza da cana, quando comparado a aplicação do siltito argiloso na parcela calcário + fidagran. Esses resultados foram decorrentes, possivelmente, dos maiores teores de K<sup>+</sup> no solo cultivado após a aplicação do fonolito na parcela calcário + fidagran (Tabela 23), o que possibilitou melhores condições de desenvolvimento da planta, aumentando sua pureza, assim como relatado por Otto; Vitti; Luz (2010), que obtiveram plantas com maior pureza após a aplicação de adubação potássica.

Em relação ao açúcar redutor (AR), observa-se que as plantas cultivadas com a aplicação do siltito argiloso, na parcela calcário + fidagran, apresentaram valores 20% superiores as aquelas que foram submetidas ao fonolito na mesma parcela. Os açúcares redutores são empregados para designar a porcentagem de glicose e frutose, que são produtos precursores de cor no processo industrial de açúcar, isto é, intensificam a cor do açúcar, depreciando sua qualidade (DO PRADO et al., 2017). Os resultados obtidos no presente trabalho podem estar relacionados aos teores de K<sup>+</sup> do solo, que foram menores com a aplicação do siltito argiloso na parcela calcário + fidagran. Nesse sentido, segundo Kumar et al. (2007), a deficiência de nutrientes aumenta a concentração de AR, o que dificulta clarificação do caldo durante a fabricação do açúcar. No entanto, os teores de AR das plantas do experimento estiveram dentro do limite estabelecido por Brieger (1968) de, no máximo, 1% para uma cana madura.

Para as variáveis fibra e brix não foram encontrados efeitos dos insumos aplicados no acréscimo desses parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar. Tais fatos são corroborados por outros trabalhos que demonstraram não haver efeito da aplicação de fertilizantes, como fosfatos (TEIXEIRA; DE SOUSA; KORNDÖRFER, 2014), cloreto de potássio (OTTO; VITTI; LUZ, 2010) no aumento do brix e fibra, além do calcário (CALDEIRA; CASEDEI, 2010) no aumento da fibra.

Quanto ao ATR, para o fator secundário, houve efeitos contrastantes entre as subparcelas. Para essa variável, as aplicações do calcário + siltito argiloso e do calcário + ritmito + fonolito proporcionaram os maiores valores de ATR das plantas. No primeiro caso, os resultados podem ser advindos de efeitos benéficos desses insumos no acúmulo de nutrientes, como o Fe (Figura 40). No mesmo sentido, a aplicação do calcário + ritmito na subparcela fonolito apresentou maiores teores de elementos essenciais e benéficos, como o K<sup>+</sup> (Tabela 21) e Si (Tabela 23). Assim, trabalhos demonstram que a correção do solo (CALDEIRA; CASEDEI, 2010), a adubação, e as aplicações de subprodutos da indústria, como vinhaça (DO PRADO et al., 2017), podem promover aumento do ATR da cana-de-açúcar através de

melhorias da condição nutricional das plantas. O ATR representa todos os açúcares na forma de açúcares invertidos, sendo um atributo importante para a indústria sucroalcooleira estimar a quantidade de sacarose na matéria-prima que é passível de ser recuperada na forma de açúcar cristal (FERNANDES, 2011).

Tabela 24. Parâmetros tecnológicos aos 425 DAP da cultura da cana-de-açúcar planta submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K.

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
POL (% caldo)						
fonolito	16,35 Aa	16,65 Aa	16,03 Aa	15,98 Aa	16,45 Aa	16,38 Aa
siltito argiloso	16,03 Aa	15,88 Ab	16,35 Aa	16,45 Aa	16,83 Aa	16,03 Aa
Pureza (% caldo)						
fonolito	87,75 Aa	86,50 Aa	84,25 Aa	84,75 Aa	86,50 Aa	87,25 Aa
siltito argiloso	87,50 Aa	84,25 Aa	86,25 Aa	86,00 Aa	87,50 Aa	83,50 Ab
Açúcar redutor (%)						
fonolito	0,63 Aa	0,67 Aa	0,75 Aa	0,73 Aa	0,68 Aa	0,65 Ab
siltito argiloso	0,64 Aa	0,75 Aa	0,68 Aa	0,69 Aa	0,64 Aa	0,78 Aa
Fibra (% cana)						
fonolito	13,08 Aa	13,15 Aa	13,18 Aa	13,03 Aa	12,50 Aa	13,33 Aa
siltito argiloso	13,13 Aa	13,18 Aa	13,18 Aa	13,10 Aa	13,30 Aa	13,38 Aa
POL (% cana)						
fonolito	13,58 Aa	13,85 Aa	13,30 Aa	13,30 Aa	13,83 Aa	13,55 Aa
siltito argiloso	13,28 Aa	13,13 Ab	13,58 Aa	13,68 Aa	13,95 Aa	13,25 Aa
ATR ( $\text{kg Mg}^{-1}$ )						
fonolito	134,02 Aa	136,70 Aa	132,43 Aa	132,05 Ab	136,55 Aa	134,08 Aa
siltito argiloso	131,43 Aa	130,88 Ab	134,30 Aa	135,50 Aa	137,43 Aa	132,08 Aa
BRIX (cana)						
fonolito	16,18 Aa	16,76 Aa	16,50 Aa	16,43 Aa	16,58 Aa	16,30 Aa
siltito argiloso	15,90 Aa	16,33 Aa	16,48 Aa	16,65 Aa	16,65 Aa	16,65 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Teixeira; de Sousa; Korndörfer (2014), ao avaliar o ATR de diferentes variedades de cana submetidas a doses de fósforo, não obtiveram diferenças quanto a adubação nos valores de ATR, contudo, encontraram valores médios desse atributo de  $158,88 \text{ kg Mg}^{-1}$  para a

variedade RB867515. Esses resultados foram ligeiramente superiores aos obtidos no presente trabalho, que oscilaram entre 130,88 a 137,43 kg Mg<sup>-1</sup>.

### **6.3.5. Índices de vegetação da cana-de-açúcar planta coletados pelo espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR**

Embora tenha-se calculado diversos IV's coletados com os dados do espectroradiômetro e VANT ao longo do ciclo da cultura da cana-de-açúcar planta, dado a semelhança entre os valores obtidos desses IV's, optou-se por apresentar e discutir ao longo do trabalho somente o GNDVI, que, comparado a outros IV, como NDVI, mostra-se mais eficiente em representar aspectos nutricionais e de produção das plantas (GTELSON; KAUFMAN; MERZLYAK, 1996). Os demais IV's estão descritos nos apêndices do trabalho (Apêndices 28-37).

Além disso, diversos trabalhos demonstram a limitação do NDVI devido ao fenômeno de saturação, que pode ser atribuído às condições de alta biomassa em sistemas de alto rendimento (CARNEIRO et al., 2019b; OLLINGER, 2011). Esta saturação ocorre devido à quantidade de luz vermelha que pode ser absorvida pelas folhas, rapidamente alcançando um pico. Em contraste, a radiação no infravermelho próximo difundida pelas folhas continua a aumentar quando o IAF excede a 3 (MOTOMIYA et al., 2007). Ao tentar lidar com esse fenômeno de saturação, Gitelson; Kaufman; Merzlyak (1996) propuseram o NDVI Verde (GNDVI), que considera a banda do verde ao invés do vermelho em sua formulação, e descobriram que GNDVI era muito mais sensível à concentração de clorofila do que o NDVI. Outros autores propuseram IV's de três bandas para resolver o problema de saturação (CAO et al., 2016; HABOUDANE et al., 2004). Nesse sentido, embora tenha ocorrido altos valores de GNDVI, não foram encontrados problemas de saturação desse IV nas imagens coletadas pelas câmeras multiespectrais mesmo próximas a colheita, onde o dossel foliar estava bastante denso.

Na Tabela 25 estão apresentados os valores de GNDVI calculados com os dados coletados pelo espectroradiômetro ao longo do cultivo da cana-de-açúcar. Na primeira data de avaliação (57 DAP) pôde-se observar efeito isolado do fator secundário, em que as aplicações de calcário e calcário + fidagran, nas subparcelas fonolito apresentaram, em média, valores 8% superiores aos encontrados na subparcela siltito argiloso. Embora não tenha sido encontrada diferenças significativas quanto a produtividade e acúmulo de K pela cana-de-açúcar para o fator subparcela (Figura 39), infere-se que esses resultados podem estar relacionados aos maiores teores de K<sup>+</sup> do solo encontrados nas subparcelas fonolito, o que possibilitou que as plantas cultivadas nesses tratamentos ao início do cultivo (57 DAP) se mostrassem melhores

nutridas, como é demonstrado pelo maior fechamento foliar nessa data (Figura 42). No caso do tratamento calcário (na subparcela fonolito), percebe-se que esse tratamento apresentou também maiores valores de Pol (Tabela 24). Nesse sentido, trabalhos como o de Rahman; Robson (2016) demonstram que há alta correlação desse IV com parâmetros tecnológicos da cana-de-açúcar, como o Pol.

Na segunda e terceira datas de avaliação (120 e 150 DAP) não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos. Já aos 210 DAP, nota-se efeito isolado do fator secundário, onde a aplicação do calcário + ritmito, na subparcela siltito argiloso, possibilitou maiores valores de GNDVI (+ 9% em relação ao fonolito). Esses resultados não eram esperados, já que não houve efeito do fator secundário quanto ao acúmulo de nutrientes para o tratamento calcário + ritmito (Figuras 39 e 40).

Aos 254 DAP, observa-se efeito isolado do fator primário para a variável GNDVI. Para esse IV, a aplicação do calcário + fidagran (na subparcela siltito argiloso) proporcionou menores valores de GNDVI, em média, 13% inferiores aos encontrados nos demais tratamentos. Infere-se que esses resultados podem estar relacionados aos menores acúmulos encontrados de K (Figura 39) e Mn (Figura 40) pelas plantas cultivadas em tais tratamentos. Segundo Moges et al. (2005), o GNDVI é comumente utilizado para avaliar o *status* nutricional das plantas e a biomassa. Diversos estudos demonstram que plantas com déficit de nutrientes apresentam menores valores de GNDVI, principalmente pela menor quantidade de clorofila (MARSCHNER, 2011), uma vez que esse IV está diretamente relacionado com esse pigmento (GITELSON; KAUFMAN; MERZLYAK, 1996).

Percebe-se que os resultados do GNDVI ao longo do cultivo demonstraram efeitos contrastantes entre as datas avaliadas, já que houve diferença significativa entre os tratamentos aos 57, 210, 254 e 300 DAP, o que não ocorreu para as demais avaliações. Para as datas em que houve diferença estatística, essa, foi pequena entre os tratamentos. Como os insumos avaliados são fontes multinutrientes em diferentes proporções de Ca, Mg, S e K, as plantas cultivadas apresentaram condições de suficiência para determinados nutrientes ao passo que, para outros, os teores estiveram abaixo do nível crítico (Figura 41). Ou seja, como exemplo, uma planta qualquer poderia estar em suficiência para o Ca e em deficiência para o Mn, limitando o desenvolvimento dessa planta e dificultando a geração de um IV que consiga captar toda a variabilidade existente entre os tratamentos.

Tabela 25. Valores médios do GNDVI coletado pelo espetroradiômetro Vis-NIR-SWIR ao longo do cultivo da cana-de-açúcar planta.

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
GNDVI – 57 DAP						
fonolito	0,468 Aa	0,492 Aa	0,478 Aa	0,470 Aa	0,470 Aa	0,496 Aa
siltito argiloso	0,485 Aa	0,456 Ab	0,479 Aa	0,489 Aa	0,479 Aa	0,462 Ab
GNDVI – 120 DAP						
fonolito	0,458 Aa	0,458 Aa	0,455 Aa	0,434 Aa	0,462 Aa	0,464 Aa
siltito argiloso	0,487 Aa	0,458 Aa	0,469 Aa	0,450 Aa	0,448 Aa	0,461 Aa
GNDVI – 150 DAP						
fonolito	0,440 Aa	0,448 Aa	0,472 Aa	0,433 Aa	0,429 Aa	0,426 Aa
siltito argiloso	0,450 Aa	0,437 Aa	0,455 Aa	0,452 Aa	0,442 Aa	0,452 Aa
GNDVI – 210 DAP						
fonolito	0,539 Aa	0,518 Aa	0,519 Aa	0,504 Ab	0,508 Aa	0,543 Aa
siltito argiloso	0,559 Aa	0,550 Aa	0,548 Aa	0,547 Aa	0,533 Aa	0,522 Aa
GNDVI – 254 DAP						
fonolito	0,416 Aa	0,369 Aa	0,377 Aa	0,402 Aa	0,358 Aa	0,474 Aa
siltito argiloso	0,442 Aa	0,396 Aa	0,414 Aa	0,389 Aa	0,383 Aa	0,359 Ba
GNDVI – 300 DAP						
fonolito	0,340 Aa	0,392 Aa	0,420 Aa	0,350 Aa	0,449 Aa	0,396 Aa
siltito argiloso	0,470 Aa	0,360 Aa	0,431 Aa	0,403 Aa	0,461 Aa	0,411 Aa
GNDVI – 354 DAP						
fonolito	0,395 Aa	0,482 Aa	0,417 Aa	0,478 Aa	0,397 Aa	0,420 Aa
siltito argiloso	0,429 Aa	0,441 Aa	0,479 Aa	0,430 Aa	0,472 Aa	0,444 Aa
GNDVI – 423 DAP						
fonolito	0,527 Aa	0,537 Aa	0,501 Aa	0,505 Aa	0,524 Aa	0,537 Aa
siltito argiloso	0,525 Aa	0,524 Aa	0,501 Aa	0,516 Aa	0,539 Aa	0,485 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na fase de crescimento vegetativo da cultura da cana-de-açúcar é comum que haja aumento nos valores do NDVI, permanecendo relativamente estável durante a fase de maturação até a colheita (BÉGUÉ et al., 2010). O mesmo vale para o GNDVI, já que ambos IV's utilizam a banda do NIR. Simões et al. (2005) identificaram que após 240 DAP há um período de estabilização de NDVI, assim como observado no presente trabalho para o GNDVI. Este período de estabilização do IV indica uma provável janela de captura de imagem, onde a

variabilidade na resposta espectral do dossel, bem como diferenças entre os tratamentos são reduzidas ao mínimo (BÉGUÉ et al., 2010). Isso torna difícil a identificação entre os tratamentos, o que explica a ausência de diferença significativa aos 354 e 423 DAP. Por outro lado, Jaminani et al. (2019) ao estudar um modelo para determinar a colheita da cana-de-açúcar baseado nos parâmetros tecnológicos e GNDVI, encontraram que a melhor época de colheita foi quando o GNDVI variou entre 0,50 a 0,55. Esses resultados foram semelhantes aos obtidos no presente trabalho na avaliação pré-colheita (423 DAP).

#### **6.3.6. Índices de vegetação e temperatura do dossel da cana-de-açúcar planta coletados por sensores multiespectrais embarcados em VANT**

Na Tabela 26 estão descritos os valores de GNDVI obtidos por sensores multiespectrais embarcados em VANT ao longo do cultivo da cana-de-açúcar planta. Inicialmente, pôde-se observar valores médios do GNDVI superiores aos obtidos pelo espectroradiômetro. Esses resultados não eram esperados, já que o GNDVI obtido por meio das imagens pode conter, na maioria dos casos, uma mistura de dossel foliar, colmo e solo, conforme relatado por Marciak et al. (2015), o que causa uma diminuição nos valores desse IV. Porém, outros autores, como de Carvalho Gasparotto et al. (2015) e Furlanetto (2018), também encontraram maiores valores de GNDVI obtidos por câmeras multiespectrais (em comparação ao espectroradiômetro). Esses resultados podem estar relacionados a diversos fatores, como: efeitos atmosféricos e de retroespalhamento da radiação do dossel; modelo de calibração utilizado (lonas de diferentes cores), que não se comportou de maneira fidedigna a condição do dossel foliar; tendência a saturação do IV em condições de maior produção de biomassa.

Aos 57 DAP, nota-se efeito isolado do fator secundário para a variável GNDVI, em que a aplicação do calcário + fidagran, na subparcela siltito argiloso, apresentou os maiores valores. Esses resultados não eram esperados, já que não houve benefícios em termos nutricionais e de produção com a aplicação de tais tratamentos (Figuras 39 e 40).

Na quinta avaliação (254 DAP), a aplicação dos insumos na subparcela fonolito possibilitou incremento nos valores do GNDVI decorrentes, possivelmente, dos maiores valores acumulados de N, P, Mg, S e Fe em plantas cultivadas com tais insumos (Figuras 39 e 40). Diversos trabalhos evidenciam a correlação do GNDVI com nutrientes, como o N

(MARTÍNEZ, 2017; OLIVEIRA et al., 2017), P, K e S (MARTÍNEZ, 2017; OLIVEIRA; SANTANA; OLIVEIRA, 2019).

Na penúltima avaliação (354 DAP), a aplicação do calcário + gesso, na subparcela siltito argiloso, permitiu maiores valores do GNDVI. Tal fato pode ser atribuído ao maior acúmulo de K e Fe nesses tratamentos (Figuras 39 e 40), o que permitiu melhores condições de desenvolvimento das plantas (Figura 42) e aumento nos valores do GNDVI.

Para as demais datas avaliadas não houve diferença significativa entre os tratamentos.

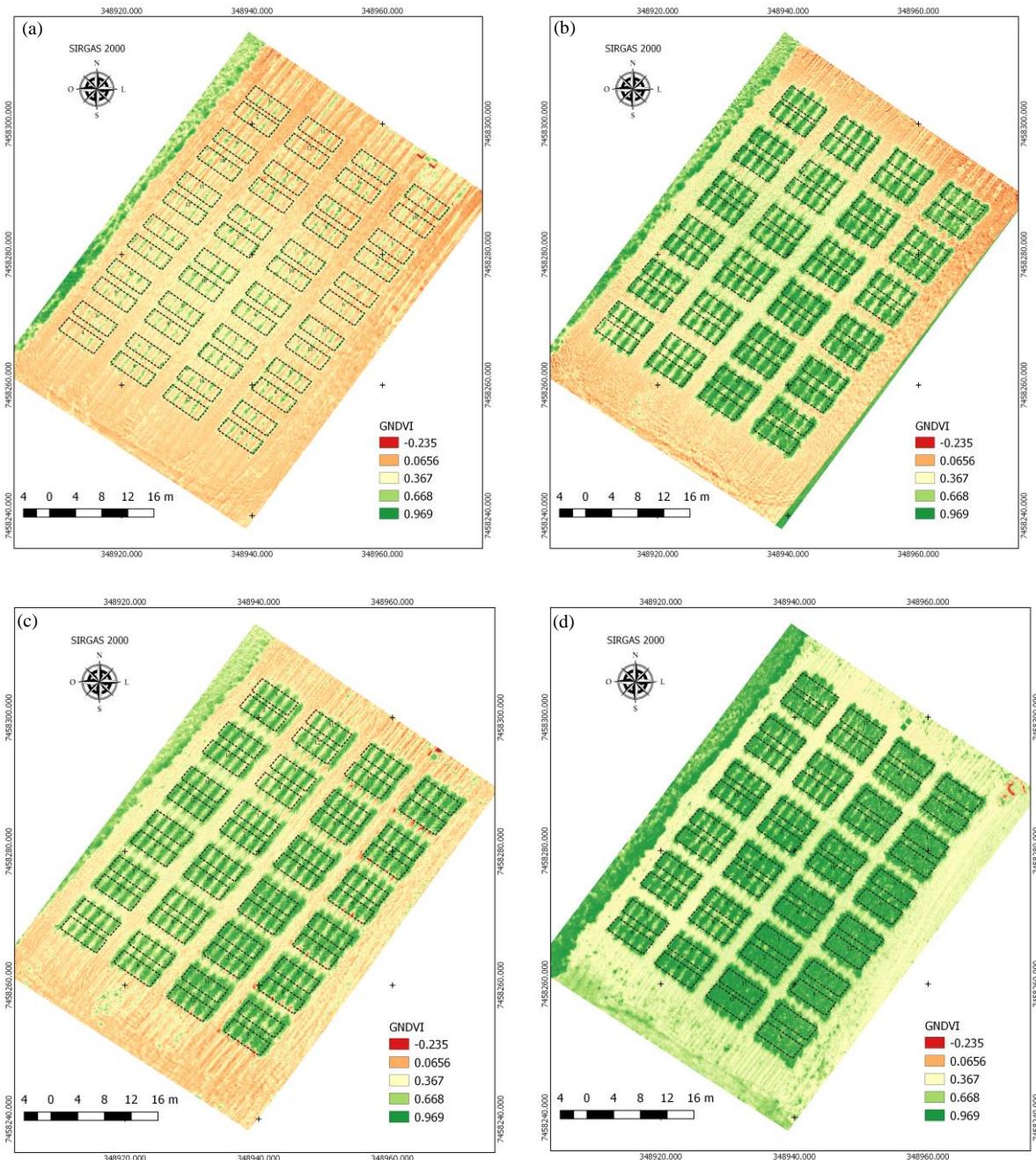
Quanto as datas avaliadas, observa-se que a partir de 210 DAP não houve aumento expressivo do GNDVI, mesmo com aumento da biomassa, o que indica a saturação desse IV (PEREIRA et al., 2016b). Esses resultados ocorreram ligeiramente antes dos dados coletados por Simões; Rocha; Lamparelli (2005), que identificaram o período de estabilização de NDVI aos 240 DAP. Além disso, pode-se observar ligeira diminuição do GNDVI na última data de avaliação (423 DAP), o que está relacionado a redução da refletância na banda do infravermelho causada pelo processo de maturação da cultura (PEREIRA et al., 2016b).

Na Figura 42 estão demonstradas as imagens do GNDVI ao longo da cultura da cana-de-açúcar planta. Observa-se o gradual desenvolvimento da cultura, com progressivo fechamento da linha e aumento da produção de biomassa. Nesse sentido, também é demonstrado aumento dos valores do GNDVI ao longo do cultivo, com um máximo entre 210 e 354 dias, que coincide com o período de alta precipitação (Figura 38) e desenvolvimento vegetativo, assim como relatado por Pereira et al. (2016b) em estudo que avaliou o uso de NDVI na cultura da cana-de-açúcar. Rahman; Robson (2016), ao avaliar o GNDVI como forma de prever a colheita da cana, identificaram um modelo quadrático como melhor forma de representar o perfil de crescimento da cultura da cana-de-açúcar. Os mesmos autores obtiveram valores de GNDVI máximos próximos a 0,70, que ocorreram três meses antes da colheita. Os resultados apresentados por tais autores foram semelhantes aos obtidos no presente trabalho.

Tabela 26. Valores médios do GNDVI obtidos por sensores multiespectrais embarcados em VANT ao longo do cultivo da cana-de-açúcar.

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
GNDVI – 57 DAP						
fonolito	0,697 Aa	0,680 Aa	0,682 Aa	0,687 Aa	0,695 Aa	0,689 Ab
siltito argiloso	0,670 Aa	0,674 Aa	0,663 Aa	0,677 Aa	0,676 Aa	0,732 Aa
GNDVI – 120 DAP						
fonolito	0,739 Aa	0,755 Aa	0,753 Aa	0,767 Aa	0,754 Aa	0,756 Aa
siltito argiloso	0,747 Aa	0,742 Aa	0,756 Aa	0,780 Aa	0,765 Aa	0,777 Aa
GNDVI – 150 DAP						
fonolito	0,658 Aa	0,649 Aa	0,631 Aa	0,676 Aa	0,680 Aa	0,672 Aa
siltito argiloso	0,672 Aa	0,641 Aa	0,647 Aa	0,650 Aa	0,680 Aa	0,661 Aa
GNDVI – 210 DAP						
fonolito	0,864 Aa	0,857 Aa	0,852 Aa	0,854 Aa	0,858 Aa	0,859 Aa
siltito argiloso	0,860 Aa	0,854 Aa	0,852 Aa	0,855 Aa	0,866 Aa	0,858 Aa
GNDVI – 254 DAP						
fonolito	0,815 Ba	0,856 Aa	0,854 Aa	0,857 Aa	0,868 Aa	0,860 Aa
siltito argiloso	0,866 Aa	0,860 Aa	0,854 Aa	0,857 Aa	0,859 Aa	0,861 Aa
GNDVI – 300 DAP						
fonolito	0,891 Aa	0,890 Aa	0,886 Aa	0,886 Aa	0,898 Aa	0,890 Aa
siltito argiloso	0,893 Aa	0,888 Aa	0,881 Aa	0,883 Aa	0,892 Aa	0,890 Aa
GNDVI – 354 DAP						
fonolito	0,788 Aa	0,842 Aa	0,838 Aa	0,829 Aa	0,855 Aa	0,836 Aa
siltito argiloso	0,769 Ba	0,837 ABa	0,834 ABa	0,833 ABa	0,848 Aa	0,817 ABa
GNDVI – 423 DAP						
fonolito	0,832 Aa	0,806 Aa	0,807 Aa	0,807 Aa	0,833 Aa	0,815 Aa
siltito argiloso	0,817 Aa	0,798 Aa	0,805 Aa	0,804 Aa	0,824 Aa	0,803 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



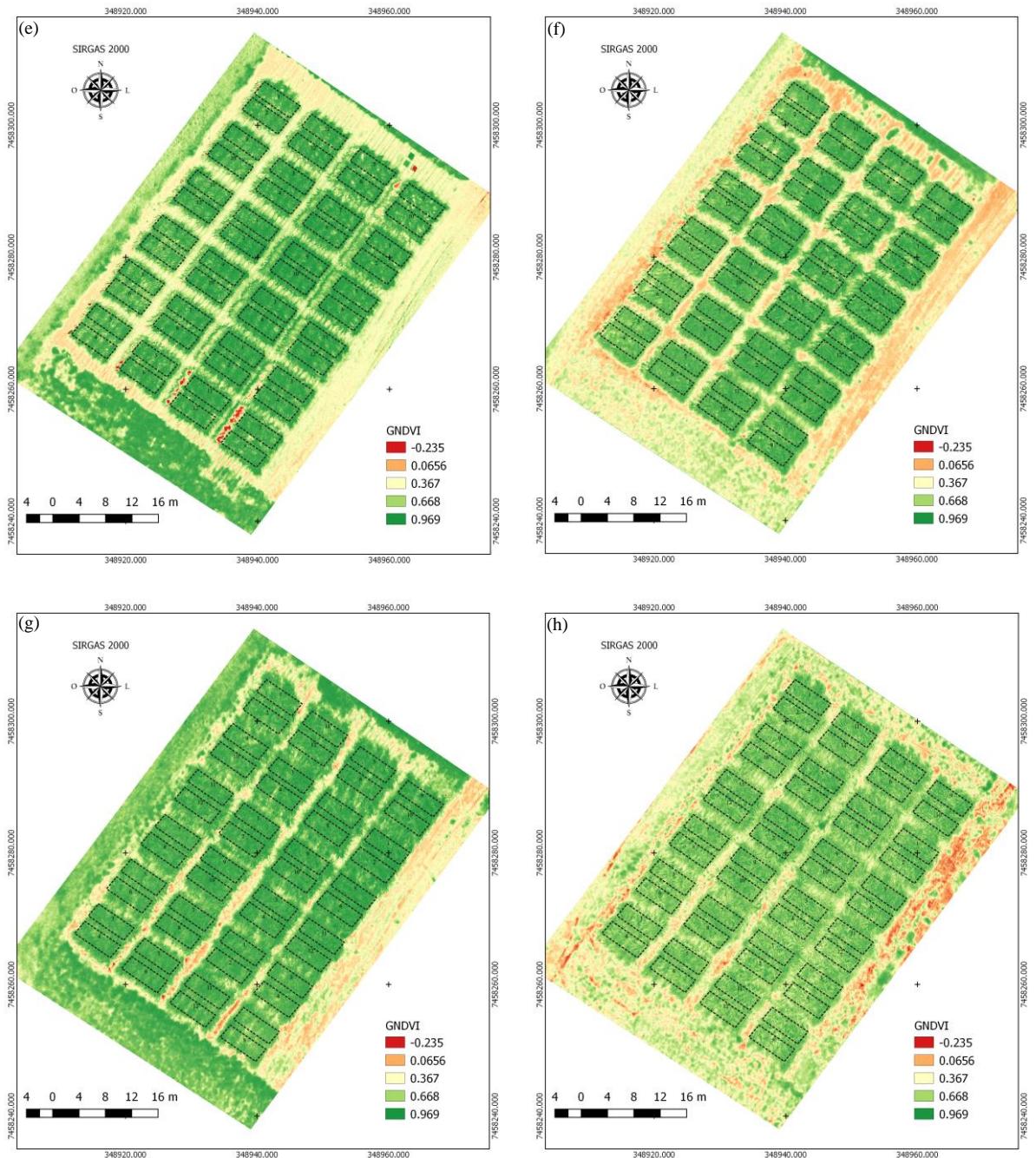


Figura 42. GNDVI da cana-de-açúcar obtidos por câmeras digitais embarcadas em VANT aos 57 (a), 120 (b), 150 (c), 210 (d), 254 (e), 300 (f), 354 (g) e 423 DAP (h). 1 = testemunha + fonolito; 2 = testemunha + siltito argiloso; 3 = calcário + fonolito; 4 = calcário + siltito argiloso; 5 = ritmito + fonolito; 6 = ritmito + siltito argiloso; 7 = calcário + ritmito + fonolito; 8 = calcário + ritmito + siltito argiloso; 9 = calcário + gesso + fonolito; 10 = calcário + gesso + siltito argiloso; 11 = calcário + fidagran + fonolito; 12 = calcário + fidagran + siltito argiloso

Observa-se na Tabela 27 os valores de temperatura do dossel da cana-de-açúcar planta submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K. Plantas submetidas a condições de

déficit hídrico apresentam maior fechamento estomático, levando a taxas de transpiração mais baixas e, subsequentemente, menor dissipação de calor, resultando em temperaturas do dossel mais altas do que aquelas plantas em condições de boa disponibilidade de água (CRUSIOL et al., 2020). Além disso, a deficiência nutricional também pode provocar alterações na temperatura média do dossel das plantas (CHRISTENSEN et al., 2005; RYU; KIM; CHAE, 2000).

O estresse produzido pela deficiência nutricional causa alteração na concentração de ácido abscísico da planta, provocando fechamento estomático e, consequentemente, aumento da temperatura do dossel das plantas (OLIVEIRA et al., 2002). Nesse sentido, Chaerle et al. (2007) usando imagens térmicas mostraram que plantas de feijão crescendo em solução deficiente de magnésio tinham uma temperatura mais alta (cerca de 0,5 °C) em comparação com plantas de controle. Contudo, no presente trabalho, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, assim como para a maioria das avaliações realizadas por meio do GNDVI (Tabelas 25 e 26).

Tabela 27. Valores médios da temperatura do dossel da cana-de-açúcar submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K.

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
Termal (°C) – 354 DAP						
fonolito	34,075 Aa	34,500 Aa	33,475 Aa	34,400 Aa	34,575 Aa	33,875 Aa
siltito argiloso	34,731 Aa	35,180 Aa	34,100 Aa	34,875 Aa	34,775 Aa	34,450 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Figura 43 encontra-se as imagens coletadas pelo sensor termal acoplado ao VANT. De forma geral, pode-se observar as semelhanças entre os tratamentos, tal qual nos resultados da análise de variância (Tabela 27).

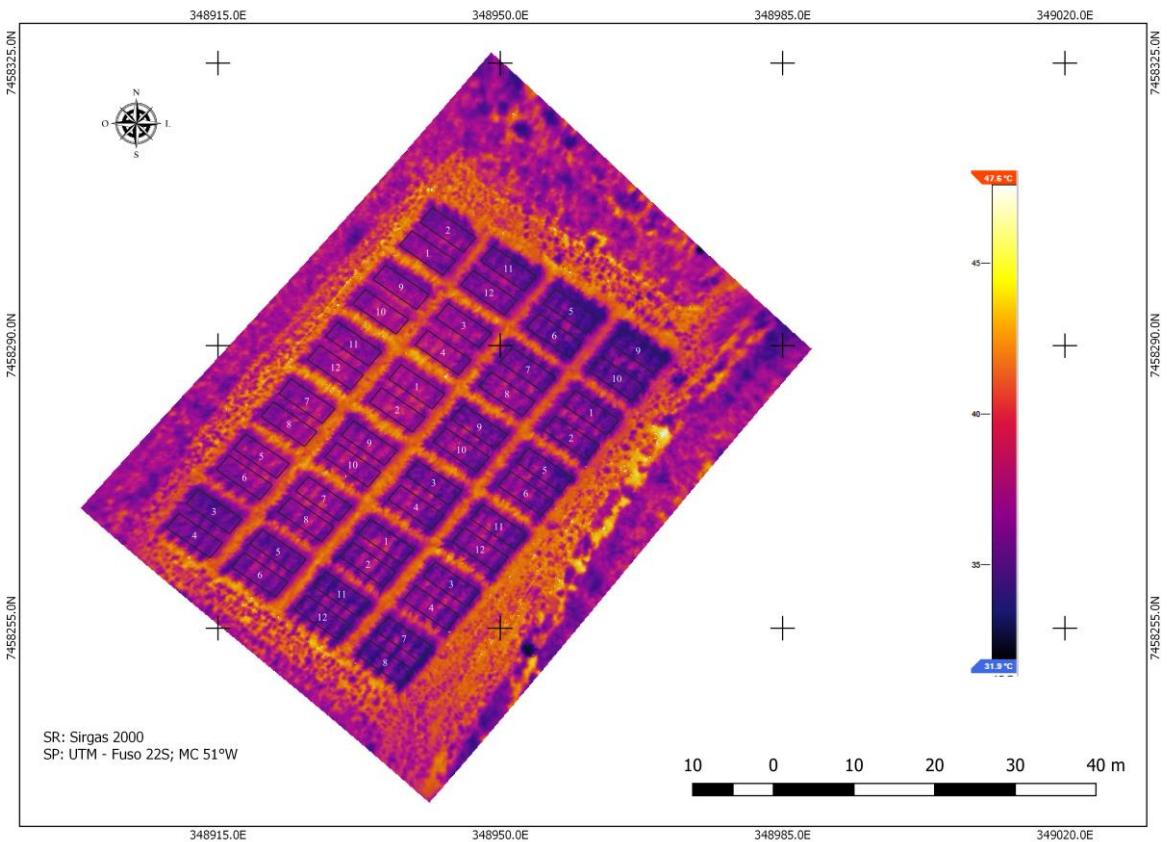


Figura 43. Temperatura do dossel da cana-de-açúcar coletada por sensor acoplado em VANT aos 354 DAP. 1 = testemunha + fonolito; 2 = testemunha + siltito argiloso; 3 = calcário + fonolito; 4 = calcário + siltito argiloso; 5 = ritmito + fonolito; 6 = ritmito + siltito argiloso; 7 = calcário + ritmito + fonolito; 8 = calcário + ritmito + siltito argiloso; 9 = calcário + gesso + fonolito; 10 = calcário + gesso + siltito argiloso; 11 = calcário + fidagran + fonolito; 12 = calcário + fidagran + siltito argiloso.

### 6.3.7. Produtividade e acúmulo de nutrientes pela cana-de-açúcar (socá)

Encontram-se na Figura 44 os valores médios de número de perfilhos e produtividade de colmo aos 364 DAR, bem como o acúmulo de macronutrientes pelas folhas da cana soca aos 210 DAR.

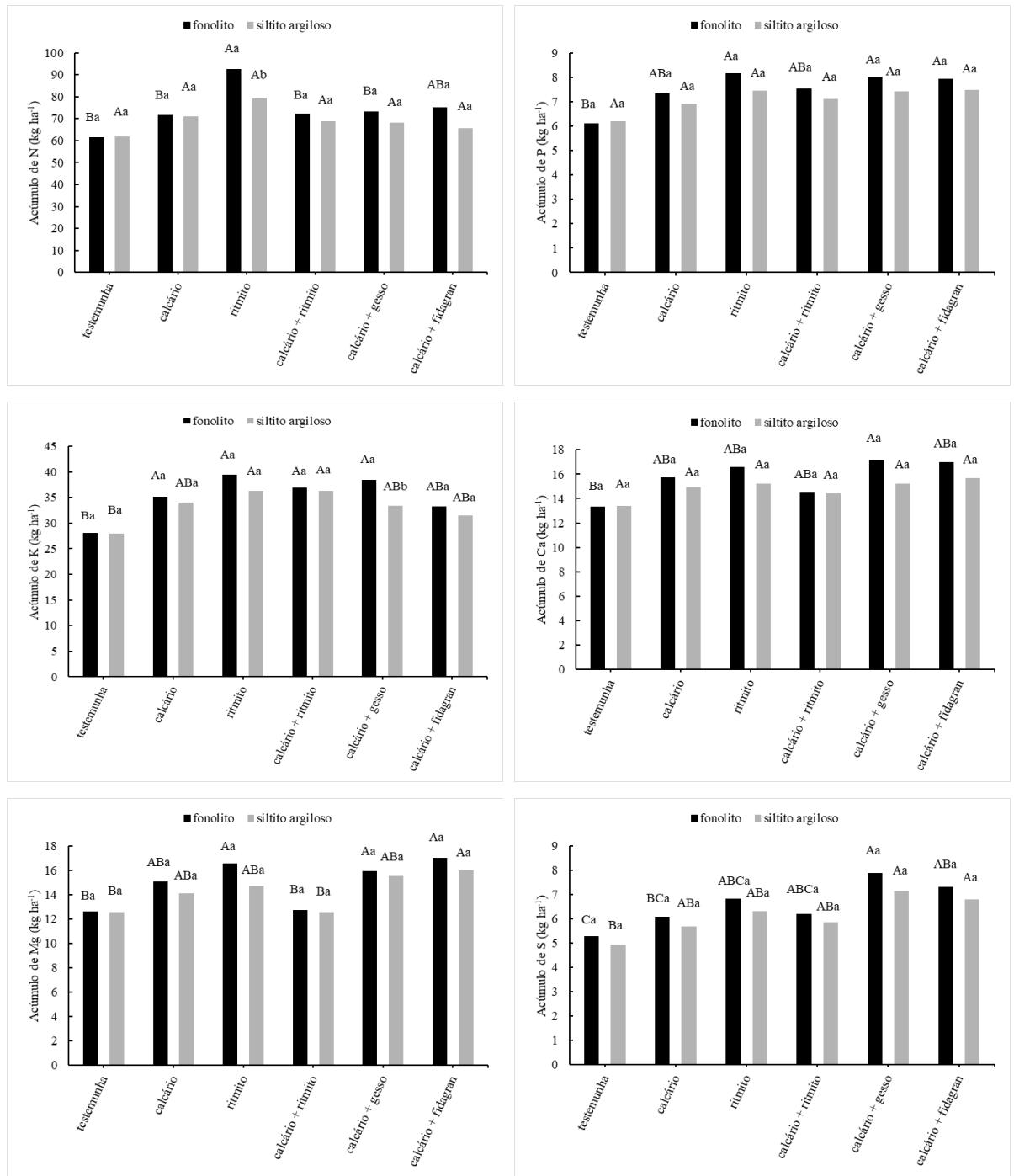
Quanto aos acúmulos dos macronutrientes, notam-se que os efeitos das aplicações dos insumos para essas variáveis foram semelhantes aos encontrados na cana planta (Figura 39), por isso, não foram discutidos profundamente. Especificamente para o ritmito, que é o coproduto da mineração de calcário da Formação Irati, observa-se efeitos positivos desse insumo no acúmulo de N, P e Mg na subparcela fonolito, S na subparcela siltito argiloso e K em ambas subparcela. No caso do N, P e K, tais resultados são decorrentes dos efeitos benéficos do aumento do pH ocasionado pela aplicação do ritmito na disponibilidade desses nutrientes no solo (Tabela 21). Já para o Mg e S, os maiores acúmulos se deram pela disponibilização desses

nutrientes por parte do ritmito, que possui em sua constituição teores significativos de Mg e S (Tabela 5). No caso do S, não tinha sido observado efeitos positivos do ritmito no acúmulo de S pela cana planta (Figura 39), o que demonstra os benefícios do maior efeito residual das rochas em pó quando aplicadas no solo, permitindo diminuição de custos relacionados a reentrada de máquinas agrícolas na área produtiva, além de minimizar problemas relacionados a compactação do solo por essas máquinas.

Para a aplicação do siltito argiloso observa-se, em geral, resultados de acúmulo de nutrientes semelhantes aos encontrados para o fonolito. No entanto, para a variável acúmulo de K, a aplicação de calcário + gesso, na subparcela fonolito, mostrou-se mais eficiente em disponibilizar K para as plantas. Esses resultados foram decorrentes da maior disponibilidade de K<sup>+</sup> no solo com a aplicação do fonolito (Tabela 21).

Observa-se que não houve diferença entre os tratamentos para a variável número de perfilhos. Já para a produtividade de colmo nota-se que, na subparcela fonolito, as aplicações do ritmito, calcário + gesso e calcário + fidagran possibilitaram aumento médio na produtividade em 21%. Os resultados foram advindos, de forma geral, das melhores condições nutricionais das plantas submetidas a tais insumos, como pode ser observado para os nutrientes P, K, Mg e Fe (Figura 44 e 45). Para o fator secundário, a aplicação do calcário + gesso, na subparcela fonolito, apresentou os maiores valores médios de produtividade, que pode estar relacionado a maior disponibilidade de K<sup>+</sup> na profundidade 20-40 cm nesse tratamento (Tabela 21), assim como os maiores valores acumulados de K pelas plantas (Figura 44).

Além disso, no caso do ritmito, o efeito benéfico de sua aplicação na produtividade da cana-de-açúcar soca demonstra os benefícios do poder residual decorrentes da aplicação de pós de rocha nas culturas, haja visto que no ciclo cana-planta (Figura 39), não houve diferença significativa para a produtividade. Esses resultados são corroborados por outros trabalhos que demonstram os efeitos positivos da aplicação de rochas em pó e destacam o efeito residual (BAKKEN et al., 2000; THEODORO et al., 2006; TOSCANI; CAMPOS, 2017; VAN STRAATEN, 2006).



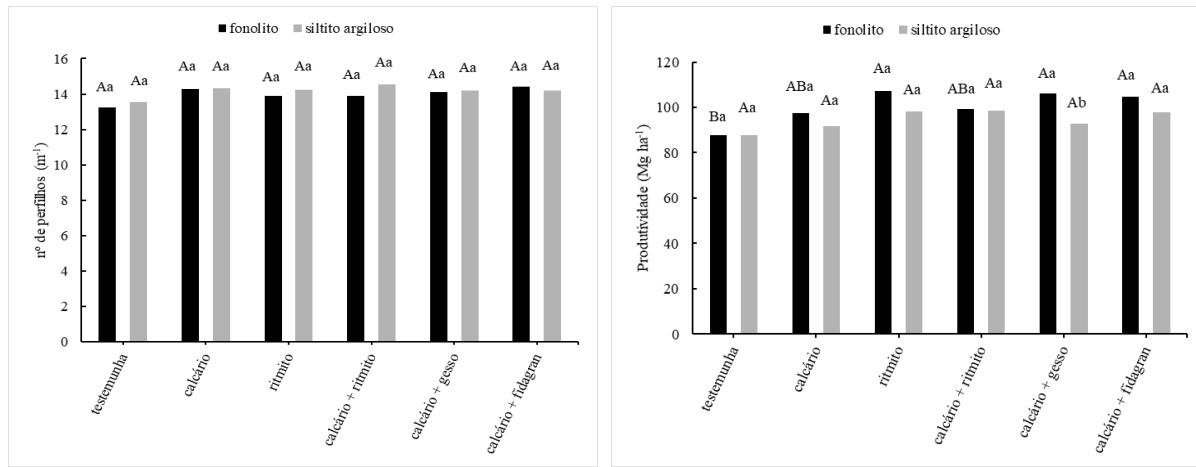


Figura 44. Acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S nas folhas de cana-de-açúcar soca aos 210 DAR e nº de perfis e produtividade de colmo aos 364 DAR após a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K.

Encontram-se na Figura 45 o acúmulo de Cu, Fe, Mn e Zn pelas folhas da cana soca aos 210 DAR. Os resultados obtidos, assim como para os macronutrientes, foram semelhantes aos encontrados no ciclo da cana planta (Figura 40). No caso do tratamento ritmito, comparado a testemunha, não foram observados efeitos benéficos de sua aplicação no acúmulo dos micronutrientes. Tais resultados eram esperados, já que esse insumo não possui quantidades significativas de micronutrientes (exceto Fe advindo da pírita). De forma semelhante, para o fator secundário, não foram registradas diferenças significativas entre o siltito argiloso e o fonolito.

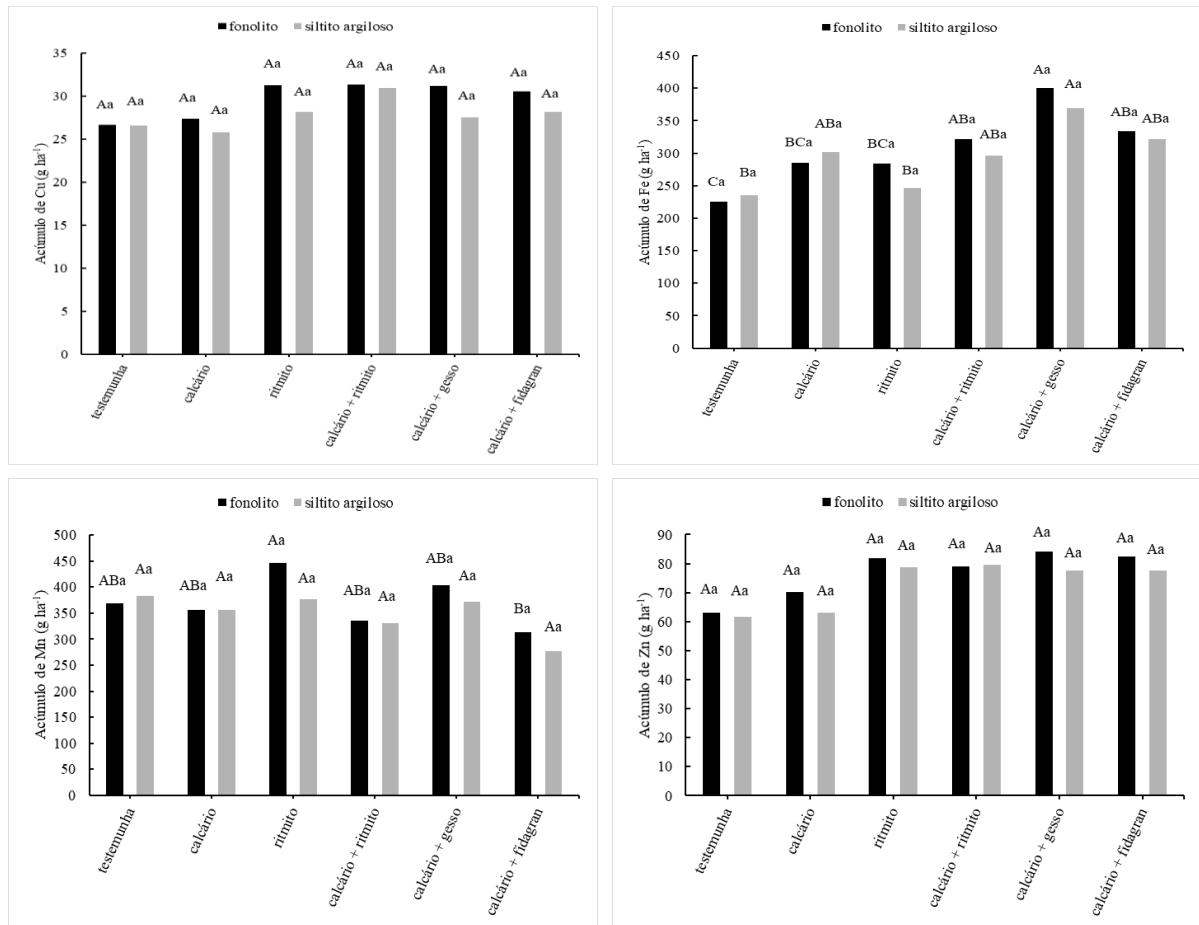


Figura 45. Acúmulo de Cu, Fe, Mn e Zn nas folhas de cana-de-açúcar aos 210 DAR após a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K.

### 6.3.8. Discussão geral do estudo III

Os resultados apresentados ao longo do estudo demonstram que a aplicação dos coprodutos das Formações Irati e Corumbataí alterou de forma positiva a fertilidade do solo e contribuiu com o acúmulo dos nutrientes pelas plantas, assim como relatado por diversos autores que estudaram rochas em pó como fonte de nutrientes (MARTINS et al., 2015b; RAMOS et al., 2015; SANTOS et al., 2016).

No ciclo da cana soca, a aplicação do ritmito possibilitou incremento da produtividade de colmo da cultura. Os resultados do presente trabalho destacam os efeitos positivos do poder residual de rochas em pó e sugerem que tais materiais, quando apresentam minerais que se solubilizam, podem ser utilizados em nível global como fontes de nutrientes, especialmente em países que têm atividade de mineração de rochas (RAMOS et al., 2019).

Quanto ao uso do sensoriamento próximo na avaliação dos coprodutos da mineração, pôde-se observar que essa técnica possibilita a caracterização e distinção desses materiais

através de suas assinaturas espectrais, que possuem características únicas quanto a reflectância e inflexões características de seus minerais.

Quanto aos valores de IV's coletados por espetroradiômetro e VANT, percebeu-se grande similaridade entre os tratamentos. Somente em determinadas datas de avaliação foi possível diferenciar as variações advindas da condição nutricional das plantas. Notou-se ainda que o GNDVI obtido por sensor acoplado ao VANT apresentou valores maiores aos do espetroradiômetro. A arquitetura do dossel foliar, bem como os efeitos atmosféricos contribuíram para as diferenças entre os sensores.

#### **6.4. Considerações finais**

Os resultados obtidos nos estudos I, II e III demonstraram que os coprodutos da mineração podem ser importantes fontes de nutrientes para as culturas e, desse modo, proporcionar aumento da produtividade. Tais resultados são corroborados por outros trabalhos que confirmam o potencial de utilização de rochas em pó ou coprodutos da mineração como fontes de nutrientes para o solo (BEERLING et al., 2018; EDWARDS et al., 2017; MARTINS et al., 2015b; RAMOS et al., 2019; SANTOS et al., 2016).

A soberania alimentar só é garantida quando se pode produzir alimentos com a utilização de recursos naturais inteiramente no país de origem da produção, o que notabiliza a importância de se buscar soluções locais como fontes de nutrientes do solo.

Nesse sentido, países de clima tropical e com importante matriz de mineração (RAMOS et al., 2019) podem possuir alta competitividade do setor agrícola, dada a diminuição da necessidade de importação de fertilizantes solúveis, que muitas vezes são caros e que podem apresentar problemas ambientais, como a eutrofização de corpos da água (LEFEBVRE et al., 2019; MANNING, 2010; THEODORO et al., 2006) quando aplicados em doses excessivas.

Ademais, pesquisas que objetivam encontrar culturas (PEREZ et al., 2007) e microorganismos (FLORENTINO et al., 2017; GUNDALA; CHINTHALA; SREENIVASULU, 2013; ZHANG; KONG, 2014) que visam aumentar a solubilização de minerais com baixa solubilidade, como a ilita presente no siltito argiloso, são necessárias para viabilizar a utilização desses insumos.

Concomitantemente, a utilização dos coprodutos também possibilita benefícios econômicos para as indústrias de mineração, já que agregam valor aos materiais considerados subprodutos e para os produtores agrícolas, uma vez que a aplicação de rochas em pó é mais barata que os fertilizantes solúveis.

Quanto ao uso do sensoriamento remoto na avaliação dos coprodutos, os IV's mostraram-se, em parte dos casos, eficazes em avaliar diferenças relacionadas a nutrição e produção de biomassa das culturas avaliadas (especialmente para brachiária e soja). Para a cultura da cana-de-açúcar houve dificuldade em relacionar os IV's com aspectos nutricionais das plantas. Tais resultados sugerem que essa ferramenta pode auxiliar, em alguns casos, na tomada de decisão por parte dos produtores, indicando a necessidade da adoção de manejo localizado para elevar a produtividade das culturas. Contudo, demais pesquisas são necessárias para estabelecer melhores correlações entre os IV's e a produção de biomassa e acúmulo de nutrientes pelas plantas.

A utilização do espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR possibilitou a identificação de minerais presentes nos coprodutos avaliados. Esses resultados demonstram ser possível o uso desse sensor remoto em áreas de mineração, permitindo otimizar o processo de lavra através da identificação rápida dos minerais de interesse.

## 7. CONCLUSÕES

A aplicação de coprodutos de mineração compostos por minerais de carbonato e silicato, no estudo I, levou ao aumento do pH, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e P de ambas classes de solo avaliadas. No LVdf, os coprodutos aumentaram os teores de K<sup>+</sup> (Mehlich-1). Já no RQo, a aplicação desses materiais incrementou os teores de Si solúvel.

No estudo II, a aplicação de coprodutos de mineração: possibilitou aumento da produção de MSPA dos dois cultivos de brachiária em ambas classes de solo; promoveu maior acúmulo de K pela parte aérea dos dois cultivos de brachiária no LVdf; possibilitou maior acúmulo de Ca, Mg e S e Fe na parte aérea dos dois cultivos de brachiária no RQo; aumentou os valores de Cu acumulados pela parte aérea do segundo cultivo de brachiária em ambas classes de solo; promoveu aumento na produção de MSPA e acúmulo de S e Fe pela parte aérea da soja cultivada em ambas classes de solo; possibilitou maior acúmulo de P, Ca, Mg e Mn pela parte aérea da soja cultivada no RQo.

A utilização do sensoriamento remoto por meio dos IV's permitiu identificar, em determinadas situações, variações entre os tratamentos. O GNDVI se mostrou o IV com a maior capacidade de distinção entre os tratamentos.

No estudo III, a aplicação do ritmito, aumentou o pH do solo e os teores de P, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e S-SO<sub>4</sub><sup>2+</sup> na profundidade de 20-40 cm. O uso do ritmito possibilitou ainda maior produtividade de colmo e acúmulo de N e P nas folhas da cana-de-açúcar (ciclo soca) cultivadas

na subparcela fonolito e acúmulo de K em ambas subparcelas. Neste estudo, a aplicação do siltito argiloso, comparado ao fonolito, possibilitou menores teores de K<sup>+</sup> do solo e K acumulado pelas folhas da cana-de-açúcar.

Pequenas variações nos IV's obtidos pelo espectroradiômetro e câmeras multiespectrais foram observadas entre os tratamentos avaliados no estudo III, o que dificultou a interpretação da relação entre os IV's e a condição nutricional das plantas.

Os resultados demonstram que coprodutos de mineração têm potencial para serem usados como solução ambiental limpa para fertilização do solo. No entanto, demais pesquisas são necessárias para investigar o potencial desses insumos em condições de campo, especialmente para o siltito argiloso como fonte de K<sup>+</sup>. Quanto ao sensoriamento remoto como ferramenta de avaliação dos coprodutos, os IV's mostraram dificuldade de estabelecer padrões de relação entre seus valores e as condições nutricionais das plantas. Demais pesquisas são necessárias para estabelecer bandas específicas de IV's que melhor se relacionam com aspectos de nutrição e produção de plantas.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOU-EL-SEOUD, Islam I.; ABDEL-MEGEED, Ahmed. Impact of rock materials and biofertilizations on P and K availability for maize (*Zea Maize*) under calcareous soil conditions. **Saudi Journal of Biological Sciences**, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 55–63, 2012. ISSN: 1319-562X.
- ABRAHÃO, Selma Alves; PINTO, Francisco de Assis de Carvalho; QUEIROZ, Daniel Marçal De; SANTOS, Nerilson Terra; GLERIANI, José Marinaldo; ALVES, Enrique Anastácio. Índices de vegetação de base espectral para discriminar doses de nitrogênio em capim-tanzânia. **Revista Brasileira de Zootecnia**, [S. l.], v. 38, n. 9, p. 1637–1644, 2009. ISSN: 1516-3598.
- ABREU, C. A. De et al. Fertilidade do Solo. **Novais, RF [et al.]**, [S. l.], 2007.
- ADDINSOFT, SARL. XLSTAT software, version 9.0. **Addinsoft, Paris, France**, [S. l.], 2010.
- ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. 5. ed., São Paulo: Anda São Paulo, 2019.
- AHMAD, Laeq; SHAH, M. Tahir; KHAN, Shuhab D. Reflectance spectroscopy and remote sensing data for finding sulfide-bearing alteration zones and mapping geology in Gilgit-Baltistan, Pakistan. **Earth Science Informatics**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 113–121, 2016. ISSN: 1865-0473. DOI: 10.1007/s12145-015-0239-x. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12145-015-0239-x>.
- ALBAYRAK, Sebahattin. Use of reflectance measurements for the detection of N, P, K, ADF and NDF contents in sainfoin pasture. **Sensors**, [S. l.], v. 8, n. 11, p. 7275–7286, 2008.
- ALMEIDA, Erasto Boretti; ALEGRI, Valdomiro; FUGIE, Adilson; ZANDONADI, Alexandre Romildo; DE SOUZA COSTA, Marcos Natal; CARVALHO, Sebastião Gomes; DE ALMEIDA PRADO, Ana Cândida; MIJOLARO, Wendel. CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS SEDIMENTOS DA FORMAÇÃO CORUMBATAÍ, PERMIANO DA BACIA DO PARANÁ, NA FOLHA 4 DA MINA DO CRUZEIRO, MUNICÍPIO DE LIMEIRA (SP). **Revista Geociências-UNG-Ser**, [S. l.], v. 7, n. 6, p. 61–68, 2013. ISSN: 1981-741X.
- ANJOS, Adilson Dos. **Estudo do calcário da formação Irati-São Mateus do Sul, PR-como corretivo da acidez do solo**. 1991. UFPR, [S. l.], 1991.

ANTONIJEVIĆ, Milan M.; MARIĆ, Miroslava. Determination of the content of heavy metals in pyrite contaminated soil and plants. **Sensors**, [S. l.], v. 8, n. 9, p. 5857–5865, 2008.

ARAÚJO, L. M. Análise da expressão estratigráfica dos parâmetros de geoquímica orgânica e inorgânica nas sequências deposicionais Irati. **Unpublished PhD thesis**, [S. l.], v. 2, 2001.

ARAÚJO, M. S. B.; SALCEDO, I. H. Preferential forms of phosphorus accumulation in soils cultivated with sugar-cane in northeastern Brazil. **Revista brasileira de ciência do solo**, [S. l.], v. 21, n. 4, p. 643–650, 1997. ISSN: 0100-0683.

ASSMANN, T. S.; PREVEDELLO, B. M. S.; REISSMANN, C. B.; RIBEIRO JR, P. J. Potencial de suprimento de micronutrientes de calcário oriundo da mineração de folhelho pirobetuminoso da formação Irati-PR. **Revista brasileira de ciência do solo**, [S. l.], v. 23, n. 4, p. 963–969, 1999. ISSN: 0100-0683. DOI: 10.1590/S0100-06831999000400023.

ASSMANN, Tangriani Simioni. Influencia da aplicação do calcario Irati (São Mateus do Sul-PR) nos teores de S, Cu, Fe, Mn e Zn no solo e na planta de milho (*Zea mays* L.). [S. l.], [s.d.].

BAGHERI, Nikrooz; AHMADI, Hojjat; ALAVIPANAH, Seyed Kazem; OMID, Mahmoud. Multispectral remote sensing for site-specific nitrogen fertilizer management. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 48, n. 10, p. 1394–1401, 2013. ISSN: 0100-204X.

BAKKEN, A. K.; GAUTNEB, H.; SVEISTRUP, T.; MYHR, K. Crushed rocks and mine tailings applied as K fertilizers on grassland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [S. l.], v. 56, n. 1, p. 53–57, 2000. ISSN: 1385-1314.

BAMBERG, Adilson Luís; SILVEIRA, Carlos Augusto Posser; MARTINAZZO, Rosane; BERGMANN, Magda; TONIOLO, João Angelo; GRECCO, Matheus Farias; DA LUZ POTES, Mariana. Desempenho agronômico de fontes minerais e orgânicas de nutrientes para as culturas de milho e trigo. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM 2013, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] p. 24.

BARBIERI, José Carlos. **Gestão ambiental empresarial**. [s.l.] : Saraiva Educação SA, 2017. ISBN: 8547208224.

BAUSCH, W. C<sup>†</sup>; DUKE, H. R. Remote sensing of plant nitrogen status in corn. **Transactions of the ASAE**, [S. l.], v. 39, n. 5, p. 1869–1875, 1996.

BEERLING, David J. et al. Farming with crops and rocks to address global climate, food and

soil security. **Nature Plants**, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 138–147, 2018. ISSN: 2055-0278. DOI: 10.1038/s41477-018-0108-y.

BÉGUÉ, Agnes; LEBOURGEOIS, Valentine; BAPPEL, Eric; TODOROFF, Pierre; PELLEGRINO, Anne; BAILLARIN, Florence; SIEGMUND, Bernard. Spatio-temporal variability of sugarcane fields and recommendations for yield forecast using NDVI. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 31, n. 20, p. 5391–5407, 2010. ISSN: 0143-1161.

BENEDUZZI, Ellen Bassan. **Rochagem: Agregação das rochas como alternativa sustentável para a fertilização e adubação de solos**. 2011. UFRGS, [S. l.], 2011.

BENITES, V. de M.; CARVALHO, M. C. S.; RESENDE, A. V. De; POLIDORO, J. C.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, F. A. De. Potássio Cálcio Magnésio na Agricultura Brasileira. **Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes**. Piracicaba: IPNI, [S. l.], v. 2, p. 53–65, 2010.

BERGMANN, Magda. REMINERALIZADORES NO BRASIL: O TRABALHO DA CPRM—SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Todos os direitos reservados A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610)**, [S. l.], p. 71, 2017.

BESEN, Marcos Renan; GOES NETO, Antonio Feijo; CASSIM, Bruno Maia Abdo Rahmen; DIAS, Gustavo Adelcio Reis; CORDIOLI, Vitor Rodrigues; BATISTA, Marcelo Augusto. TEORES DE SULFATO NO SOLO AOS 48 MESES APÓS APLICAÇÃO DE CALCÁRIO E GESSO AGRÍCOLA. [S. l.], 2019. ISSN: 8545919603.

BIDARI, Ehsan; AGHAZADEH, Valeh. Pyrite oxidation in the presence of calcite and dolomite: Alkaline leaching, chemical modeling and surface characterization. **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, [S. l.], v. 28, n. 1433, p. 1443, 2018.

BIRTH, Gerald S.; MCVEY, George R. Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer 1. **Agronomy Journal**, [S. l.], v. 60, n. 6, p. 640–643, 1968. ISSN: 0002-1962.

BISHOP, Janice L.; GATES, Will P.; MAKAREWICZ, Heather D.; MCKEOWN, Nancy K.; HIROI, Takahiro. Reflectance spectroscopy of beidellites and their importance for Mars. **Clays**

**and Clay Minerals**, [S. l.], v. 59, n. 4, p. 378–399, 2011. ISSN: 0009-8604.

BOARO, Vinicius; SCHWARZ, Sergio Francisco; SOUZA, Paulo Vitor Dutra De; SOARES, Wagner; LOUROSA, Gil Vicente. Enxofre elementar no manejo do pH de substrato orgânico alcalino. **Ciência Rural**, [S. l.], v. 44, n. 12, p. 2111–2117, 2014. ISSN: 0103-8478.

BOJOVIĆ, Biljana; STOJANOVIĆ, Jovanka. Some wheat leaf characteristics in dependence of fertilization. **Kragujevac J. Sci**, [S. l.], v. 28, p. 139–146, 2006.

BORILOVA, Sarka; MANDL, Martin; ZEMAN, Josef; KUCERA, Jiri; PAKOSTOVA, Eva; JANICZEK, Oldrich; TUOVINEN, Olli H. Can sulfate be the first dominant aqueous sulfur species formed in the oxidation of pyrite by Acidithiobacillus ferrooxidans? **Frontiers in Microbiology**, [S. l.], v. 9, p. 3134, 2018. ISSN: 1664-302X.

BRANDÃO, Juliana Andréia Vrba. Pó de rocha como fonte de nutrientes no contexto da agroecologia. [S. l.], 2012.

BRASIL. Instrução Normativa nº 5, de 10 de março de 2016. [Estabelece as regras sobre definições, classificação, especificações e garantias, tolerâncias, registro, embalagem, rotulagem e propaganda dos remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura], [S. l.], 2016.

BRAZ, Antônio Joaquim Braga Pereira; DA SILVEIRA, Pedro Marques; KLIEMANN, Huberto José; ZIMMERMANN, Francisco José Pfeilsticker. Acumulação de nutrientes em folhas de milheto e dos capins braquiária e mombaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 34, n. 2, p. 83–87, 2004. ISSN: 1517-6398.

BRIEGER, F. O. Início da safra. Como determinar a maturação. **Boletim Informativo Copereste**, [S. l.], v. 4, p. 1–3, 1968.

BRISKEN, D. P.; BLOOM, A. Assimilation of Mineral Nutrients. **Plant Physiology**, L. Taiz and E. Zeiger, eds (Sinauer Associates Inc, [S. l.], 2012.

BRITZKE, Darines; DA SILVA, Leandro Souza; MOTERLE, Diovane Freire; DOS SANTOS RHEINHEIMER, Danilo; BORTOLUZZI, Edson Campanhola. A study of potassium dynamics and mineralogy in soils from subtropical Brazilian lowlands. **Journal of Soils and Sediments**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 185–197, 2012. ISSN: 1439-0108.

BROCH, Dirceu Luiz; PAVINATO, Paulo Sergio; POSSENTTI, Jean Carlo; MARTIN,

Thomas Newton; DEL QUIQUI, Erci Marcos. Produtividade da soja no cerrado influenciada pelas fontes de enxofre. **Revista Ciência Agronômica**, [S. l.], v. 42, n. 3, p. 791–796, 2011. ISSN: 1806-6690.

BROCH, Dirceu Luiz; RANNO, Sidnei Kuster. Fertilidade do solo, adubação e nutrição da cultura da soja. **Tecnologia de produção de soja e milho**, [S. l.], v. 2009, p. 5–36, 2008.

BUOL, Stanley W. Soils and agriculture in central-west and north Brazil. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 66, n. 5, p. 697–707, 2009. ISSN: 0103-9016. DOI: 10.1590/S0103-90162009000500016. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-90162009000500016&lng=en&tlang=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162009000500016&lng=en&tlang=en).

CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 125–136, 2004. ISSN: 0100-0683. DOI: 10.1590/S0100-06832004000100013.

CALDEIRA, D. S. A.; CASEDEI, R. A. Efeito do calcário em soqueiras de três variedades de cana-de-açúcar no Mato Grosso. **Tecnologia e Ciência Agropecuária, João Pessoa**, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 5–9, 2010.

CAMPE, J.; O'BRIEN, T. A.; BARKER, A. V. Soil remineralization for sustainable agriculture. **Remineralise the Earth, Spring**, [S. l.], p. 141–146, 1996.

CAO, Qiang et al. Improving in-season estimation of rice yield potential and responsiveness to topdressing nitrogen application with Crop Circle active crop canopy sensor. **Precision agriculture**, [S. l.], v. 17, n. 2, p. 136–154, 2016. ISSN: 1385-2256.

CARNEIRO, Franciele M.; FURLANI, Carlos E. A.; ZERBATO, Cristiano; MENEZES, Patricia C. De; GÍRIO, Lucas A. da S. Correlations among vegetation indices and peanut traits during different crop development stages. **Engenharia Agrícola**, [S. l.], v. 39, n. SPE, p. 33–40, 2019 a. ISSN: 0100-6916.

CARNEIRO, Franciele Morlin; FURLANI, Carlos Eduardo Angeli; ZERBATO, Cristiano; DE MENEZES, Patricia Candida; DA SILVA GÍRIO, Lucas Augusto; DE OLIVEIRA, Mailson Freire. Comparison between vegetation indices for detecting spatial and temporal variabilities

in soybean crop using canopy sensors. **Precision Agriculture**, [S. l.], p. 1–29, 2019 b. ISSN: 1573-1618.

CASAGRANDE, J. C.; ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A.; BORGES, M. Adsorção de fosfato e sulfato em solos com cargas elétricas variáveis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 51–59, 2003. ISSN: 0100-0683. DOI: 10.1590/s0100-06832003000100006.

CASTILHOS, Rosa Maria Vargas; MEURER, Egon José. Cinética de liberação de potássio em Planossolo do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, [S. l.], v. 31, n. 6, p. 979–983, 2001. ISSN: 0103-8478.

CASTRO, Gustavo Spadotti Amaral; CRUSCIOL, Carlos Alexandre Costa. Effects of surface application of dolomitic limestone and calcium-magnesium silicate on soybean and maize in rotation with green manure in a tropical region. **Bragantia**, [S. l.], v. 74, n. 3, p. 311–321, 2015. ISSN: 0006-8705. DOI: 10.1590/1678-4499.0346.

CAVALCANTE, Amaro de Mendonça; LIMA, Jose Carlos de Souza; SANTOS, Lucineide de Melo; OLIVEIRA, Paulo César Costa De; RIBEIRO JÚNIOR, Karlos Antonio Lisboa; SANT'ANA, Antonio Euzébio Goulart. Comparative evaluation of the pH of calcium hydroxide powder in contact with carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). **Materials Research**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 1–4, 2010. ISSN: 1516-1439.

CEZAR, Everson; NANNI, Marcos Rafael; GUERRERO, César; DA SILVA JUNIOR, Carlos Antonio; CRUCIOL, Luiz Guilherme Teixeira; CHICATI, Marcelo Luiz; SILVA, Guilerme Fernando Capristo. Organic matter and sand estimates by spectroradiometry: Strategies for the development of models with applicability at a local scale. **Geoderma**, [S. l.], v. 340, p. 224–233, 2019. ISSN: 00167061. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.01.021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706117304482>.

CH'NG, Huck Ywih; AHMED, Osumanu Haruna; MAJID, Nik Muhamad Ab. Improving phosphorus availability in an acid soil using organic amendments produced from agroindustrial wastes. **The Scientific World Journal**, [S. l.], v. 2014, 2014. ISSN: 2356-6140.

CHAERLE, Laury; HAGENBEEK, Dirk; VANROBAEYS, Xavier; VAN DER STRAETEN, Dominique. Early detection of nutrient and biotic stress in Phaseolus vulgaris. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 28, n. 16, p. 3479–3492, 2007. ISSN: 0143-1161.

CHEN, Pengfei; HABOUDANE, Driss; TREMBLAY, Nicolas; WANG, Jihua; VIGNEAULT, Philippe; LI, Baoguo. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 114, n. 9, p. 1987–1997, 2010. ISSN: 0034-4257.

CHRISTENSEN, L. K.; RODRIGUEZ, D.; BELFORD, R.; SADRAS, V.; RAMPANT, P.; FISHER, P. Temporal prediction of nitrogen status in wheat under the influence of water deficiency using spectral and thermal information. **Precision Agriculture** 05, [S. l.], p. 209–215, 2005.

CHRISTOFOLLETTI, SERGIO RICARDO; MORENO, MARIA MARGARITA TORRES; BATEZELLI, ALESSANDRO. Análise de Fácies da Formação Corumbataí (Grupo Passa Dois-Bacia do Paraná, Neopermiano), com Vista ao Emprego na Indústria de Revestimento Cerâmico. **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 488–498, 2016. ISSN: 0375-7536.

COELHO, Anderson Prates; ROSALEN, David Luciano; FARIA, Rogério Teixeira De. Vegetation indices in the prediction of biomass and grain yield of white oat under irrigation levels. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 48, n. 2, p. 109–117, 2018. ISSN: 1983-4063.

COLOMINA, Ismael; MOLINA, Pere. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing**, [S. l.], v. 92, p. 79–97, 2014. ISSN: 0924-2716.

CONSECANA. **Açúcar e álcool do estado de São Paulo**. São Paulo. v. 5

CORRÊA, Juliano Corulli; FREITAG, Elisa Eni; BÜLL, Leonardo Theodoro; CRUSCIOL, Carlos Alexandre Costa; FERNANDES, Dirceu Maximino; MARCELINO, Rafael. Aplicação superficial de calcário e diferentes resíduos em soja cultivada no sistema plantio direto. **Bragantia**, [S. l.], v. 68, n. 4, p. 1059–1068, 2009. ISSN: 0006-8705.

CORSINI, I.; SILVA, C. C.; TAGLIAFERRO, K.; RODRIGUES, G. S.; LABIGALINI, I.; FRIMAIO, A. Contabilidade ambiental em emergia do processamento de rocha calcária para uso agrícola. In: EMBRAPA MEIO AMBIENTE-ARTIGO EM ANAIS DE CONGRESSO (ALICE) 2012, **Anais** [...]. : In: INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 4., 2013, São ..., 2012

CRISTINA FERNANDES DEUS, Angélica; MARQUES DE ALMEIDA BERTANI, Rosemary; CONSTANTINO MEIRELLES, Guilherme; DE AQUINO VIDAL LACERDA SOARES, Anelisa; LORENA QUEIROZ MOREIRA, Lais; THEODORO BÜLL, Leonardo; MAXIMINO FERNANDES, Dirceu. The Comprehensive Utilization of Steel Slag in Agricultural Soils. In: **Recovery and Utilization of Metallurgical Solid Waste**. [s.l.] : IntechOpen, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.81440. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/recovery-and-utilization-of-metallurgical-solid-waste/the-comprehensive-utilization-of-steel-slag-in-agricultural-soils>.

CRUSIOL, Luís Guilherme Teixeira; NANNI, Marcos Rafael; FURLANETTO, Renato Herrig; SIBALDELLI, Rubson Natal Ribeiro; CEZAR, Everson; MERTZ-HENNING, Liliane Marcia; NEPOMUCENO, Alexandre Lima; NEUMAIER, Norman; FARIA, José Renato Bouças. UAV-based thermal imaging in the assessment of water status of soybean plants. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 41, n. 9, p. 3243–3265, 2020. ISSN: 0143-1161.

CRUSIOL, Luís Guilherme Teixeira; NANNI, Marcos Rafael; SILVA, Guilherme Fernando Capristo; FURLANETTO, Renato Herrig; DA SILVA GUALBERTO, Anderson Antonio; GASPAROTTO, Aline de Carvalho; DE PAULA, Mariana Nunes. Semi professional digital camera calibration techniques for Vis/NIR spectral data acquisition from an unmanned aerial vehicle. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 38, n. 8–10, p. 2717–2736, 2017. ISSN: 0143-1161. DOI: 10.1080/01431161.2016.1264032. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2016.1264032>.

CUNHA, Alexson de Mello; FONTES, Maurício Paulo Ferreira; LANI, João Luiz. Mineralogical and chemical attributes of soils from the Brazilian Atlantic Forest domain. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 76, n. 1, p. 82–92, 2019. ISSN: 1678-992X. DOI: 10.1590/1678-992x-2017-0109. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-90162019000100082&lng=en&tlang=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162019000100082&lng=en&tlang=en).

DA ROCHA, Igor Tenório Marinho; DA SILVA, Anibia Vicente; DE SOUZA, Remy Farias; FERREIRA, José Thales Pantaleão. Uso de resíduos como fonte de nutrientes na agricultura. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [S. l.], v. 8, n. 5, p. 47–52, 2013. ISSN: 1981-8203.

DA SILVA, D. N.; MEURER, E. J.; KÄMPF, N.; BORKERT, C. M. Mineralogia e formas de

potássio em dois Latossolos do Estado do Paraná e suas relações com a disponibilidade para as plantas. **Revista brasileira de ciência do solo**, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 433–439, 1995. ISSN: 0100-0683.

DA SILVA RIBEIRO, Luciano; DOS SANTOS, Anacleto Ranulfo; DA SILVA SOUZA, Luiz Francisco; SOUZA, Jamile Santana. Rochas silicáticas portadoras de potássio como fontes do nutriente para as plantas solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 34, n. 3, p. 891–897, 2010. ISSN: 0100-0683.

DA SILVA, Sílvio Vieira; SANTOS, José Zilton Lopes; TUCCI, Carlos Alberto Franco; DE SOUZA CARDOSO, Arnon Afonso. Efeito de doses de calcário e cultivares na produtividade e qualidade agroindustrial da cana-de-açúcar em solo da Amazônia. **REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 298–305, 2014. ISSN: 1982-8470.

DE CARVALHO GASPAROTTO, Aline; NANNI, Marcos Rafael; DA SILVA JUNIOR, Carlos Antonio; CEZAR, Everson; ROMAGNOLI, Franciele; DA SILVA, Anderson Antonio; MIOTTO, Liliane Scarabora; SACIOTO, Mônica. Avaliação do NDVI obtido por imagens digitais e espectroradiometria na diferenciação de doses de nitrogênio. [S. l.], [s.d.].

DE FÁTIMA TAVARES, Laene; DE CARVALHO, André Mundstock Xavier; CAMARGO, Luis Gustavo Brogliato; DE FÁTIMA PEREIRA, Samarina Gabriele; CARDOSO, Irene Maria. Nutrients release from powder phonolite mediated by bioweathering actions. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 89–98, 2018. ISSN: 2195-3228.

DE MELO SILVA, Keyla Karla; DE LIMA, Anderson Pontes Chaves; DA CRUZ SANTANA, Milene da Cruz; ANDRADE, Vivianne de Cássia Paixão; BRAGA, Ana Luiza Coelho; CORREIA, Kenia Valença. Caracterização química e mineralógica dos resíduos da mineração de gipsita no semiárido pernambucano. **Holos**, [S. l.], v. 6, p. 194–200, 2017. ISSN: 1807-1600.

DE MOURA, MARCOS CLEMENTE FERRETTI. **CORRELAÇÃO ENTRE PRODUTIVIDADE EM CANA-DE-AÇÚCAR E ÍNDICES DE VEGETAÇÃO ESPECTRAIS: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DE ORATÓRIOS, MG**. Universidade Federal de Viçosa, 2013.

DE PÁDUA, EDUANE JOSÉ. Rochagem como adubação complementar para culturas oleaginosas. [S. l.], 2012.

DE SOUZA, Maicon Douglas Bispo; FONTANETTI, Anastácia; ASSAD, Maria Leonor R. C. Lopes. Efeito de remineralizador, vinhaça e plantas de cobertura nos atributos químicos do solo. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 1–7, 2017. ISSN: 2359-6643.

DE TOLEDO PIZA, Patricia d'Almeida; BERTOLINO, Luiz Carlos; DA SILVA, Adriana de Aquino Soeiro; SAMPAIO, João Alves. Verdete da região de Cedro de Abaeté (MG) como fonte alternativa para potássio. **Geociências (São Paulo)**, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 345–356, 2011. ISSN: 1980-900X.

DEMATTÊ, J. A. M.; GAMA, M. A. P.; COOPER, M.; ARAÚJO, J. C.; NANNI, M. R.; FIORIO, P. R. Effect of fermentation residue on the spectral reflectance properties of soils. **Geoderma**, [S. l.], v. 120, n. 3–4, p. 187–200, 2004. ISSN: 0016-7061.

DEMATTÊ, José A. M.; ARAÚJO, Suzana Romero; FIORIO, Peterson Ricardo; FONGARO, Caio Troula; NANNI, Marcos Rafael. Espectroscopia VIS-NIR-SWIR na avaliação de solos ao longo de uma topossequência em Piracicaba (SP). **Revista Ciência Agronômica**, [S. l.], v. 46, n. 4, p. 679–688, 2015. ISSN: 1806-6690.

DEUS, Angélica Cristina Fernandes; BULL, Leonardo Theodoro; CORRÊA, Juliano Corulli; VILLAS BOAS, Roberto Lyra. Nutrient accumulation and biomass production of alfalfa after soil amendment with silicates. **Revista Ceres**, [S. l.], v. 61, n. 3, p. 406–413, 2014. ISSN: 0034-737X.

DILL, Harald G. Kaolin: soil, rock and ore: from the mineral to the magmatic, sedimentary and metamorphic environments. **Earth-Science Reviews**, [S. l.], v. 161, p. 16–129, 2016. ISSN: 0012-8252.

DINARDO-MIRANDA, Leila Luci; FRACASSO, Juliano Vilela; PERECIN, Dilermando. Variabilidade espacial de populações de Diatraea saccharalis em canaviais e sugestão de método de amostragem. **Bragantia**, [S. l.], v. 70, n. 3, p. 577–585, 2011. ISSN: 0006-8705.

DO AMARAL, Sérgio Estanislau. **Geologia e petrologia da formação Irati (Permiano) no Estado de São Paulo**. Universidade de São Paulo, Instituto de geociencias e astronomia, 1971.

DO PRADO, Eber Augusto Ferreira; VITORINO, Antonio Carlos Tadeu; MAUAD, Munir; ENSINAS, Simone Cândido; PAIM, Leandro Ramão. Características tecnológicas da cana-de-açúcar sob aplicação de doses de vinhaça em Latossolo Vermelho distroférrego. **Revista de**

**Ciências Agroveterinárias**, [S. l.], v. 16, n. 4, p. 386–395, 2017. ISSN: 2238-1171.

DOMÍNGUEZ, María T.; MARAÑÓN, Teodoro; MURILLO, José M.; SCHULIN, Rainer; ROBINSON, Brett H. Nutritional status of Mediterranean trees growing in a contaminated and remediated area. **Water, Air, and Soil Pollution**, [S. l.], v. 205, n. 1–4, p. 305–321, 2010. ISSN: 0049-6979.

DOS SANTOS TEIXEIRA, Aline Maria; SAMPAIO, João Alves; DOS SANTOS GARRIDO, Francisco Manoel; MEDEIROS, Marta Eloisa. Avaliação da rocha fonolito como fertilizante alternativo de potássio. **Holos**, [S. l.], v. 5, p. 21–33, 2012. ISSN: 1807-1600.

DUARTE, Willian Marques; MAFRA, Álvaro Luiz; FORESTI, Marcos Maurício; PICCOLLA, Cristiano Dela; ALMEIDA, Jaime Antonio. Potencial de olivina melilitito, granito e sienito na disponibilização de potássio em solos. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, [S. l.], v. 12, n. 1, p. 68–77, 2013. ISSN: 2238-1171.

DUCART, Diego Fernando; SILVA, Adalene Moreira; TOLEDO, Catarina Labouré Bemfica; ASSIS, Luciano Mozer De. Mapping iron oxides with Landsat-8/OLI and EO-1/Hyperion imagery from the Serra Norte iron deposits in the Carajás Mineral Province, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, [S. l.], v. 46, n. 3, p. 331–349, 2016. ISSN: 2317-4889. DOI: 10.1590/2317-4889201620160023. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2317-48892016000300331&lng=en&tlang=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2317-48892016000300331&lng=en&tlang=en).

DUTT, Sunil; SHARMA, Som Dev; KUMAR, Pramod. Inoculation of apricot seedlings with indigenous arbuscular mycorrhizal fungi in optimum phosphorus fertilization for quality growth attributes. **Journal of plant nutrition**, [S. l.], v. 36, n. 1, p. 15–31, 2013. ISSN: 0190-4167.

EDWARDS, David P.; LIM, Felix; JAMES, Rachael H.; PEARCE, Christopher R.; SCHOLES, Julie; FRECKLETON, Robert P.; BEERLING, David J. Climate change mitigation: potential benefits and pitfalls of enhanced rock weathering in tropical agriculture. **Biology letters**, [S. l.], v. 13, n. 4, p. 20160715, 2017. ISSN: 1744-9561.

EPSTEIN, Howard E.; RAYNOLDS, Martha K.; WALKER, Donald A.; BHATT, Uma S.; TUCKER, Compton J.; PINZON, Jorge E. Dynamics of aboveground phytomass of the circumpolar Arctic tundra during the past three decades. **Environmental Research Letters**,

[S. l.J, v. 7, n. 1, p. 15506, 2012. ISSN: 1748-9326.

ERNANI, Paulo R.; MIQUELLUTI, David J.; FONTOURA, Sandra M. V; KAMINSKI, João; ALMEIDA, Jaime A. Downward movement of soil cations in highly weathered soils caused by addition of gypsum. **Communications in soil science and plant analysis**, [S. l.J, v. 37, n. 3–4, p. 571–586, 2006. ISSN: 0010-3624.

FAGERIA, Nand Kumar. OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA NUTRICIONAL NA PRODUÇÃO DAS CULTURAS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.J, v. 2, n. 1, p. 6–16, 1998. ISSN: 1415-4366. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v02n01p6-16. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1415-43661998000100006&lng=pt&tlang=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43661998000100006&lng=pt&tlang=pt).

FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of plant nutrition**, [S. l.J, v. 24, n. 8, p. 1269–1290, 2001. ISSN: 0190-4167.

FANG, Qian; HONG, Hanlie; ZHAO, Lulu; KUKOLICH, Stephanie; YIN, Ke; WANG, Chaowen. Visible and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy for Investigating Soil Mineralogy: A Review. **Journal of Spectroscopy**, [S. l.J, v. 2018, p. 1–14, 2018. ISSN: 2314-4920. DOI: 10.1155/2018/3168974. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/jspec/2018/3168974/>.

FANG, Yihang; XU, Huifang. Study of an Ordovician Carbonate with Alternating Dolomite–Calcite Laminations and Its Implication For Catalytic Effects of Microbes On the Formation of Sedimentary Dolomite. **Journal of Sedimentary Research**, [S. l.J, v. 88, n. 6, p. 679–695, 2018. ISSN: 1527-1404.

FAQUIN, Valdemar. **Nutrição mineral de plantas**. ESAL ed., [s.l.] : Universidade Federal de Lavras-UFLA, 2005.

FERNANDES, Antonio Carlos. Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar. **STAB: Piracicaba, SP, Brasil**, [S. l.J, 2011.

FERREIRA, Daniel Furtado. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e agrotecnologia**, [S. l.J, v. 35, n. 6, p. 1039–1042, 2011. ISSN: 1413-7054. DOI: 10.1590/S1413-70542011000600001.

FLORENTINO, Ligiane Aparecida; REZENDE, Adauton Vilela; MIRANDA, Cássia Cristina Bachião; MESQUITA, Aline Carvalho; MANTOVANI, José Ricardo; BIANCHINI, Hudson Carvalho. Potassium solubilization in phonolite rock by diazotrophic bacteria. **Comunicata Scientiae**, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 17–23, 2017. ISSN: 2177-5133.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. Imagens de satélite para estudos ambientais. In: **Imagens de satélite para estudos ambientais**. [s.l: s.n.]. p. 97.

FOLONI, José Salvador Simoneti; SANTOS, Diego Henriques; CRESTE, José Eduardo; SALVADOR, Jean Paulo. Resposta do feijoeiro e fertilidade do solo em função de altas doses de calcário em interação com a gessagem. In: **COLLOQUIUM AGRARIAE**. ISSN: 1809-8215 2008, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] p. 27–35. ISBN: 1809-8215.

FONSECA, Adriel Ferreira Da; CAIRES, Eduardo Fávero; BARTH, Gabriel. Extraction methods and availability of micronutrients for wheat under a no-till system with a surface application of lime. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 67, n. 1, p. 60–70, 2010. ISSN: 0103-9016.

FONSECA, Elaine Lima; LOCATELLI, Marília. NDVI aplicado na detecção de degradação de pastagens cultivadas. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, [S. l.], n. 35, 2018. ISSN: 1958-9212.

FREITAS, Lucas Barbosa De; FERNANDES, Dirceu Maximino; MAIA, Suelen Cristina Mendonça. Silício na nutrição mineral e acúmulo de alumínio em plantas de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 45, n. 4, p. 440–448, 2015. ISSN: 1983-4063.

FÚLFARO, V. J. The Parana Basin upper Permian and lower Mesozoic stratigraphic succession. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S. l.], v. 44, p. 147–148, 1972.

GARCIA, R. A.; CRUSCIOL, Carlos Alexandre Costa; CALONEGO, Juliano Carlos; ROSOLEM, Ciro Antonio. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, [S. l.], v. 28, n. 4, p. 579–585, 2008. ISSN: 1161-0301.

GASPAR JR, L. A. Estudo mineralógico, químico e textural das rochas sedimentares da Formação Corumbataí (Jazida Peruchi) e suas implicações como matéria prima para cerâmica vermelha. **Diss. Mestrado Geologia Regional, Inst. Geoci. Ci. Ex., Univ. Est. Paulista, Rio Claro, SP**, [S. l.], 1999.

GELAIN, Evandro; ROSA JUNIOR, Edgard Jardim; MERCANTE, Fábio Martins; FORTES, Danilo Gomes; SOUZA, Fábio Régis De; ROSA, Yara Brito Chaim Jardim. Fixação biológica de nitrogênio e teores foliares de nutrientes na soja em função de doses de molibdênio e gesso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, [S. l.], v. 35, n. 2, p. 259–269, 2011. ISSN: 1413-7054.

GHASEMI-FASAEI, R.; RONAGHI, A. Interaction of iron with copper, zinc, and manganese in wheat as affected by iron and manganese in a calcareous soil. **Journal of Plant Nutrition**, [S. l.], v. 31, n. 5, p. 839–848, 2008. ISSN: 0190-4167.

GITELSON, Anatoly A.; KAUFMAN, Yoram J.; MERZLYAK, Mark N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote sensing of Environment**, [S. l.], v. 58, n. 3, p. 289–298, 1996. ISSN: 0034-4257.

GODOY, Letícia Hirata; SARDINHA, Diego de Souza; MORENO, Maria Margarita Torres. Major and trace elements redistribution in weathered claystones from the Corumbataí Formation, Paraná Sedimentary Basin, São Paulo, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, [S. l.], v. 47, n. 4, p. 615–632, 2017. ISSN: 2317-4889. DOI: 10.1590/2317-4889201720170086.

GOULDING, K. W. T. Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. **Soil use and management**, [S. l.], v. 32, n. 3, p. 390–399, 2016. ISSN: 0266-0032. DOI: doi.org/10.1111/sum.12270.

GRACIA-ROMERO, Adrian; KEFAUVER, Shawn C.; VERGARA-DÍAZ, Omar; ZAMAN-ALLAH, Mainassara A.; PRASANNA, Boddupalli M.; CAIRNS, Jill E.; ARAUS, José L. Comparative performance of ground vs. aerially assessed RGB and multispectral indices for early-growth evaluation of maize performance under phosphorus fertilization. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 8, p. 2004, 2017. ISSN: 1664-462X.

GUELFİ-SILVA, Douglas Ramos; MARCHI, Giuliano; SPEHAR, Carlos Roberto; GUILHERME, Luiz Roberto Guimarães; FAQUIN, Valdemar. Agronomic efficiency of potassium fertilization in lettuce fertilized with alternative nutrient sources. **Revista Ciência Agronômica**, [S. l.], v. 44, n. 2, p. 267–277, 2013. ISSN: 1806-6690.

GUNDALA, P. B.; CHINTHALA, P.; SREENIVASULU, B. A new facultative alkaliphilic, potassium solubilizing, *Bacillus* Sp. SVUNM9 isolated from mica cores of Nellore District, Andhra Pradesh, India. Research and Reviews. **J Microbiol Biotechnol**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 1–7, 2013.

GUO, R.; ZHAO, M. Z.; YANG, Z. X.; GJ-YIN, H.; LI, J. D. Simulation Of Soybean Canopy Nutrient Contents By Hyperspectral Remote Sensing. **Applied Ecology and Environmental Research**, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 1185–1198, 2017. ISSN: 1589-1623.

HABOUDANE, Driss; MILLER, John R.; PATTEY, Elizabeth; ZARCO-TEJADA, Pablo J.; STRACHAN, Ian B. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. **Remote sensing of environment**, [S. l.], v. 90, n. 3, p. 337–352, 2004. ISSN: 0034-4257.

HACHIRO, J. **O Subgrupo Iratí (Neopermiano) da Bacia do Paraná. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.** Tese de Doutoramento, 196p, 1997.

HACHIRO, Jorge. **O Subgrupo Iratí (Neopermiano) da Bacia do Paraná.** Universidade de São Paulo, 1996.

HAUFF, Phoebe. An overview of VIS-NIR-SWIR field spectroscopy as applied to precious metals exploration. **Spectral International Inc**, [S. l.], v. 80001, p. 303–403, 2008.

HEMPE, Cléa. Análise do gerenciamento dos resíduos sólidos em Panambi-RS: 1955 a 2012. [S. l.], 2013.

HINSINGER, Philippe; JAILLARD, Benoît. Root-induced release of interlayer potassium and vermiculitization of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass. **Journal of Soil Science**, [S. l.], v. 44, n. 3, p. 525–534, 1993. ISSN: 0022-4588.

HITCH, Michael; BALLANTYNE, Sheila M.; HINDLE, Sarah R. Revaluing mine waste rock for carbon capture and storage. **International Journal of Mining, Reclamation and Environment**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 64–79, 2010. ISSN: 1748-0930.

HOFF, Rosemary; BERGAMNN, M.; DA CRUZ, Maria Tarciana Pereira; SILVEIRA, Carlos Augusto Posser. Identificação e caracterização de agrominerais/remineralizadores de solos para viticultura sustentável na fronteira oeste, RS, Brasil. In: EMBRAPA CLIMA TEMPERADO-ARTIGO EM ANAIS DE CONGRESSO (ALICE) 2017, **Anais** [...]. : In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM, 3., 2017, Pelotas. Anais... Assis ..., 2017

HOGREFE, Kyle R.; PATIL, Vijay P.; RUTHRAUFF, Daniel R.; MEIXELL, Brandt W.; BUDDE, Michael E.; HUPP, Jerry W.; WARD, David H. Normalized Difference Vegetation Index as an estimator for abundance and quality of avian herbivore forage in Arctic Alaska.

**Remote Sensing**, [S. l.], v. 9, n. 12, p. 1234, 2017.

HOLANDA, Werlem; BERGAMASCHI, Sergio; DOS SANTOS, Anderson Costa; RODRIGUES, René; BERTOLINO, Luiz Carlos. Characterization of the Assistência Member, Irati Formation, Paraná Basin, Brazil: Organic matter and Mineralogy. **Journal of Sedimentary Environments**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 36–45, 2018. ISSN: 2447-9462. DOI: 10.12957/jse.2018.33304.

HOLANDA, Werlem; DOS SANTOS, Anderson Costa; NOGUEIRA, Camila Cardoso; BERTOLINO, Luiz Carlos; BERGAMASCHI, Sérgio; RODRIGUES, René; DA COSTA, Diego Felipe. EFFECTS OF IGNEOUS INTRUSION ON THE MINERALOGICAL CONTENT OF IRATI FORMATION, PARANÁ BASIN, IN SAPOEMA (PR), SOUTHERN BRAZIL. **Journal of Sedimentary Environments**, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 350–360, 2019. ISSN: 2447-9462.

HOROWITZ, Nelson; MEURER, Egon José. Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais. **Ciência Rural**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 822–828, 2006. ISSN: 0103-8478. DOI: 10.1590/S0103-84782006000300015. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782006000300015&lng=pt&tlang=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782006000300015&lng=pt&tlang=pt).

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e análises da economia mineral brasileira**. Instituto Brasileiro de Mineração, 2012.

ISLAM, Kamrunnahar; SINGH, Balwant; MCBRATNEY, Alex. Simultaneous estimation of several soil properties by ultra-violet, visible, and near-infrared reflectance spectroscopy. **Soil Research**, [S. l.], v. 41, n. 6, p. 1101, 2003. ISSN: 1838-675X. DOI: 10.1071/SR02137. Disponível em: <http://www.publish.csiro.au/?paper=SR02137>.

JANZEN, H. H.; BETTANY, J. R. Measurement of sulfur oxidation in soils. **Soil science**, [S. l.], v. 143, n. 6, p. 444–452, 1987. ISSN: 0038-075X.

JENSEN, John R.; EPIPHANIO, José Carlos Neves. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. [s.l.] : Parêntese Editora São José dos Campos, 2009. ISBN: 856050706X.

JOHANSEN, Bernt; TØMMERVIK, Hans. The relationship between phytomass, NDVI and

vegetation communities on Svalbard. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, [S. l.], v. 27, p. 20–30, 2014. ISSN: 0303-2434.

KABATA-PENDIAS, Alina. **Trace elements in soils and plants**. [s.l.] : CRC press, 2010. ISBN: 1420093703.

KAMINSKI, João; BRUNETTO, Gustavo; MOTERLE, Diovane Freire; RHEINHEIMER, Danilo dos Santos. Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 31, n. 5, p. 1003–1010, 2007. ISSN: 0100-0683.

KANTAR, Cetin. Role of low molecular weight organic acids on pyrite dissolution in aqueous systems: implications for catalytic chromium (VI) treatment. **Water Science and Technology**, [S. l.], v. 74, n. 1, p. 99–109, 2016. ISSN: 0273-1223.

KAPP JUNIOR, Claudio; GUIMARAES, Alaine M.; CAIRES, Eduardo F. Use of active canopy sensors to discriminate wheat response to nitrogen fertilization under no-tillage. **Engenharia Agrícola**, [S. l.], v. 36, n. 5, p. 886–894, 2016. ISSN: 0100-6916.

KAWAMURA, K.; MACKAY, A. D.; TUOHY, M. P.; BETTERIDGE, K.; SANCHES, I. D.; INOUE, Y. Potential for spectral indices to remotely sense phosphorus and potassium content of legume-based pasture as a means of assessing soil phosphorus and potassium fertility status. **International Journal of Remote Sensing**, [S. l.], v. 32, n. 1, p. 103–124, 2011. ISSN: 0143-1161.

KLEINHOFS, ANDRIS; WARNER, ROBERT L. Advances in nitrate assimilation. **Intermediary nitrogen metabolism**, [S. l.], v. 16, p. 89–120, 1990.

KOKALY, R. F. et al. Usgs spectral library version 7 data: Us geological survey data release. **United States Geological Survey (USGS): Reston, VA, USA**, [S. l.], 2017. DOI: 10.3133/ds1035.

KORNDÖRFER, G. H. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. [s.l.] : GPSi-ICIAG-UFU, 2002.

KORNDÖRFER, Gaspar Henrique. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. [s.l.] : Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.

KUCKENBERG, J.; TARTACHNYK, I.; NOGA, G. Detection and differentiation of nitrogen-

deficiency, powdery mildew and leaf rust at wheat leaf and canopy level by laser-induced chlorophyll fluorescence. **Biosystems Engineering**, [S. l.], v. 103, n. 2, p. 121–128, 2009. ISSN: 1537-5110.

KUMAR, M. S.; GALIL, Mansour S. Abdul; SURESHA, M. S.; SATHISH, M. A.; NAGENDRAPPAA, G. A simple spectrophotometric determination of phosphate in sugarcane juices, water and detergent samples. **E-Journal of Chemistry**, [S. l.], v. 4, 2007. ISSN: 2090-9063.

LABSPHERE, I. N. C. **Reflectance Calibration Laboratory**. Sutton, 1996.

LAGES, Leandra Costa. A Formação Irati (Grupo Passa Dois, Permiano, Bacia do Paraná) no furo de sondagem FP-01-PR (Sapopema, PR). [S. l.], 2004.

LEÃO, Ricardo Elso; GIACOMINI, Sandro José; REDIN, Marciel; SOUZA, Eduardo Lorensi; SILVEIRA, Carlos Augusto Posser. The addition of retorted oil shale increases carbon retention of plant residues in the soil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S. l.], v. 49, n. 10, p. 818–822, 2014. ISSN: 0100-204X.

LEBOURGEOIS, Valentine; BÉGUÉ, Agnès; LABBÉ, Sylvain; MALLAVAN, Benjamin; PRÉVOT, Laurent; ROUX, Bruno. Can commercial digital cameras be used as multispectral sensors? A crop monitoring test. **Sensors**, [S. l.], v. 8, n. 11, p. 7300–7322, 2008.

LEFEBVRE, David; GOGLIO, Pietro; WILLIAMS, Adrian; MANNING, David A. C.; DE AZEVEDO, Antonio Carlos; BERGMANN, Magda; MEERSMANS, Jeroen; SMITH, Pete. Assessing the potential of soil carbonation and enhanced weathering through Life Cycle Assessment: A case study for Sao Paulo State, Brazil. **Journal of cleaner production**, [S. l.], v. 233, p. 468–481, 2019. ISSN: 0959-6526.

LIN, Yao-Tung; HUANG, Ching-Pao. Reduction of chromium (VI) by pyrite in dilute aqueous solutions. **Separation and Purification Technology**, [S. l.], v. 63, n. 1, p. 191–199, 2008. ISSN: 1383-5866.

LIU, Sheng-yu; QIU, Wei; QU, Bing; XU, Yuan-yuan. Dissolution Characteristics of Limestone with Organic Acid. In: 2010 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOINFORMATICS AND BIOMEDICAL ENGINEERING 2010, **Anais** [...]. : IEEE, 2010 p. 1–4. ISBN: 1424447127.

LUCHETA, Adriano Reis; LAMBAIS, Marcio Rodrigues. Sulfur in agriculture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 36, n. 5, p. 1369–1379, 2012. ISSN: 0100-0683. DOI: 10.1590/S0100-06832012000500001.

LUZ, A. B.; LAPIDO-LOUREIRO, F. E.; SAMPAIO, J. A.; CASTILHOS, Z. C.; BEZERRA, M. S. Rochas, minerais e rotas tecnológicas para a produção de fertilizantes alternativos. **Agrominerais para o Brasil**, [S. l.], p. 61–88, 2010.

MA, Jian Feng; YAMAJI, Naoki. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in plant science**, [S. l.], v. 11, n. 8, p. 392–397, 2006. ISSN: 1360-1385.

MACHADO, A. F.; LUCENA, Guilherme Nunes; CARNEIRO, J. S. S.; NEGREIROS NETO, J. V; SANTOS, A. C.; SILVA, R. R. Aproveitamento de rejeito de mineração na blendagem de calcário comercial para correção do solo. In: 2019, **Anais** [...]. : Ciência do Solo da Amazônia Oriental, 2019 p. 17–27.

MACHADO, Vanessa Júnia; DE SOUZA, Carlos Henrique Eiterer. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta. **Bioscience Journal**, [S. l.], v. 28, n. 1, 2012. ISSN: 1981-3163.

MAHAJAN, G. R.; SAHOO, R. N.; PANDEY, R. N.; GUPTA, V. K.; KUMAR, Dinesh. Using hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Precision Agriculture**, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 499–522, 2014. ISSN: 1385-2256. DOI: 10.1007/s11119-014-9348-7. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s11119-014-9348-7>.

MAIA, Celso E.; DE MORAIS, Elis Regina C.; FILHO, Francisco de Q. Porto; GUEYI, Hans R.; DE MEDEIROS, José F. Teores foliares de nutrientes em meloeiros de nutrientes em meloeiros de nutrientes em meloeiro irrigado com águas de diferentes salinidades. [S. l.], [s.d.].

MALAVOLTA, E.; MORAES, M. F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral das plantas cultivadas. **Nitrogênio e enxofre na agricultura Brasileira. Piracicaba: International plant nutrition institute**, [S. l.], p. 189–249, 2007.

MALAVOLTA, Eurípedes. **Manual de nutrição mineral de plantas**. [s.l.] : Agronômica Ceres, 2006. ISBN: 8531800471.

MANNING, David A. C. Mineral sources of potassium for plant nutrition. A review.

**Agronomy for sustainable development**, [S. l.], v. 30, n. 2, p. 281–294, 2010. ISSN: 1774-0746. DOI: 10.1051/agro/2009023.

MANZARI, Paola; DE ANGELIS, Simone; DE SANCTIS, Maria Cristina; DI IORIO, Tatiana; AMMANNITO, Eleonora; BOST, Nicolas; FOUCHER, Frédéric; WESTALL, Frances. Microimaging VIS-IR spectroscopy of ancient volcanic rocks as Mars analogues. **Earth and Space Science**, [S. l.], v. 3, n. 7, p. 268–281, 2016. ISSN: 2333-5084.

MARCINIAK, Matthieu; BROWN, Ralph; REYNOLDS, Andrew G.; JOLLINEAU, Marilyne. Use of remote sensing to understand the terroir of the Niagara Peninsula. Applications in a Riesling vineyard. **OENO One**, [S. l.], v. 49, n. 1, p. 1–26, 2015. ISSN: 2494-1271.

MARESMA, Ángel; ARIZA, Mar; MARTÍNEZ, Elías; LLOVERAS, Jaume; MARTÍNEZ-CASASNOVAS, José A. Analysis of vegetation indices to determine nitrogen application and yield prediction in maize (*Zea mays L.*) from a standard UAV service. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 8, n. 12, p. 973, 2016.

MARSCHNER, Horst. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. [s.l.] : Academic press, 2011. ISBN: 0123849063.

MARTELLO, Maurício. **Estimativa da altura e produtividade da cana-de-açúcar utilizando imagens obtidas por aeronave remotamente pilotada**. Universidade de São Paulo, 2017.

MARTÍNEZ M, Luis Joel. Relationship between crop nutritional status, spectral measurements and Sentinel 2 images. **Agronomía Colombiana**, [S. l.], v. 35, n. 2, p. 205–215, 2017. ISSN: 0120-9965.

MARTINS, Éder de Souza; OLIVEIRA, Claudinei Gouveia De; RESENDE, Álvaro Vilela De; MATOS, Marcello Silvino Ferreira De. Agrominerais-Rochas silicáticas como fontes minerais alternativas de potássio para a agricultura. *In:* [s.l.] : CETEM/MCTI, 2008.

MARTINS, Éder de Souza; RESENDE, Álvaro Vilela De; OLIVEIRA, Claudinei Gouveia De; FURTINI NETO, Antonio Eduardo. Materiais silicáticos como fontes regionais de nutrientes e condicionadores de solos. *In:* [s.l.] : CETEM/MCT, 2010. ISBN: 8561121610.

MARTINS, Juliano Araujo; FIORIO, Peterson Ricardo; DA SILVA BARROS, Pedro Paulo; DE ALMEIDA MUNIZ, Rodrigo; SEIXAS, Hugo Tameirão. Alterações na resposta espectral

da cana-de-açúcar cultivada em diferentes condições edáficas. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, [S. l.], v. 17, p. 7389–7396, 2015 a.

MARTINS, Vanessa; SILVA, Douglas Ramos Guelfi; MARCHI, Giuliano; LEITE, Maurício Cunha Almeida; MARTINS, Éder de Souza; GONÇALVES, Ana Stella Freire; GUILHERME, Luiz Roberto Guimarães. Effect of alternative multinutrient sources on soil chemical properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 39, n. 1, p. 194–204, 2015 b. ISSN: 0100-0683. DOI: 10.1590/01000683rbcs20150587. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832015000100194&lng=en&tlang=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832015000100194&lng=en&tlang=en).

MATTOS, W. T. De; MONTEIRO, Francisco Antonio. Respostas de braquiária brizantha a doses de potássio. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 55, n. 3, p. 428–437, 1998. ISSN: 0103-9016.

MEDEIROS, Roberto Dantas De; SOARES, Antônio Alves; GUIMARÃES, Renato Mendes. Compactação do solo e manejo da água. I: Efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, [S. l.], v. 29, n. 5, p. 940–947, 2005. ISSN: 1413-7054.

MEDEIROS, S. G.; DUTRA, R. P. S.; GRILLO, J. P. F.; MARTINELLI, A. E.; PASKOCIMAS, C. A.; MACEDO, D. A. Preparação de compósitos alumina-mulita de baixo custo via sinterização reativa entre uma argila caulínica da Paraíba e hidróxido de alumínio. **Cerâmica**, [S. l.], v. 62, n. 363, p. 266–271, 2016. ISSN: 0366-6913. DOI: 10.1590/0366-69132016623631992.

MELO, Valdinar Ferreira; UCHÔA, Sandra Cátia Pereira; DIAS, Flávio de Oliveira; BARBOSA, Gilvan Ferreira. Doses de basalto moído nas propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrófico da savana de Roraima. **Acta Amazonica**, [S. l.], v. 42, n. 4, p. 471–476, 2012 a. ISSN: 0044-5967.

MELO, Valdinar Ferreira; UCHÔA, Sandra Cátia Pereira; DIAS, Flávio de Oliveira; BARBOSA, Gilvan Ferreira. Levels of finely ground basalt rock in the chemical properties of a yellow latosol of the savannah of Roraima. **Acta Amazonica**, [S. l.], v. 42, n. 4, p. 471–476, 2012 b. ISSN: 0044-5967.

MENDES, Josué Camargo; PETRI, Setembrino. **Geologia do Brasil**. [s.l.] : Instituto nacional do livro, 1971. v. 9

MIGUEL, Divino Levi; MOREIRA, F. M. S. Influência do pH do meio de cultivo e da turfa no comportamento de estirpes de Bradyrhizobium. **Revista brasileira de ciência do solo**, [S. l.], v. 25, n. 4, p. 873–883, 2001. ISSN: 0100-0683.

MILANI, Edison José; FRANÇA, Almério Barros; MEDEIROS, R. A. Roteiros Geológicos. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. 135–162, 2007.

MIPHOKASAP, Poonsak; HONDA, Kiyoshi; VAIPHASA, Chaichoke; SOURIS, Marc; NAGAI, Masahiko. Estimating canopy nitrogen concentration in sugarcane using field imaging spectroscopy. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 4, n. 6, p. 1651–1670, 2012.

MOGES, S. M.; RAUN, W. R.; MULLEN, R. W.; FREEMAN, K. W.; JOHNSON, G. V; SOLIE, J. B. Evaluation of green, red, and near infrared bands for predicting winter wheat biomass, nitrogen uptake, and final grain yield. **Journal of plant nutrition**, [S. l.], v. 27, n. 8, p. 1431–1441, 2005. ISSN: 0190-4167.

MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, JM. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas**. 2. ed., Campinas.

MOREIRA, Adônis; DE OLIVEIRA, Fábio Alvares; DE CASTRO, César; SALINET, Luana Held; SFREDO, Gedi Jorge. Efeito residual de rochas brasileiras como fertilizantes e corretivos da acidez do solo. **Revista Espaço e Geografia**, [S. l.], v. 9, n. 2, 2006. ISSN: 1516-9375.

MOREIRA, Mauricio Alves. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. [s.l.] : UFV, 2005. ISBN: 857269224X.

MORENO-GARCÍA, Beatriz; CASTERAD, M<sup>a</sup>; GUILLÉN, Mónica; QUÍLEZ, Dolores. Agronomic and Economic Potential of Vegetation Indices for Rice N Recommendations under Organic and Mineral Fertilization in Mediterranean Regions. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 10, n. 12, p. 1908, 2018.

MORENO, M. M. T.; ZANARDO, A.; ROCHA, R. R.; ROVERI, C. D. Matéria-prima da formação Corumbataí na região do polo cerâmico de Santa Gertrudes, SP, com características naturais para fabricação de argila expandida. **Cerâmica**, [S. l.], v. 58, n. 347, p. 342–348, 2012. ISSN: 0366-6913. DOI: 10.1590/S0366-69132012000300010.

MOTOMIYA, A. V. A.; BALLAMINUT, C. E. C.; MOLIN, J. P.; CHIAVEGATO, E. J.; ACHEVARRIA, P. B.; COLACO, A. F. Determinação da intensidade de infestação de

nematoide em algodoeiro sob diferentes doses de nitrogênio por meio de um sensor óptico ativo.  
*In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO 2007, Anais [...]. [s.l: s.n.]*

MURPHY, Richard J.; SCHNEIDER, Sven; MONTEIRO, Sildomar T. Mapping layers of clay in a vertical geological surface using hyperspectral imagery: variability in parameters of SWIR absorption features under different conditions of illumination. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 6, n. 9, p. 9104–9129, 2014.

NANNI, Marcos Rafael; DEMATTÊ, José Alexandre M. Spectral Reflectance Methodology in Comparison to Traditional Soil Analysis. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 70, n. 2, p. 393–407, 2006. ISSN: 03615995. DOI: 10.2136/sssaj2003.0285. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj2003.0285>.

NATIONS, United. World population prospects. **Multimedia Library**, [S. l.], 2017.

NGUYEN, H.; MANEEPONG, Somsak; SURANINPONG, Potjaman. Effects of potassium, calcium and magnesium ratios in soil on their uptake and fruit quality of pummelo. **Journal of Agricultural Science**, [S. l.], v. 9, n. 12, p. 110–121, 2017.

NORTON, Rob; MIKKELSEN, Robert; JENSEN, Tom. Sulfur for plant nutrition. **Better crops with plant Food**, [S. l.], v. 97, n. 2, p. 10–12, 2013. ISSN: 0006-0089.

OLIVEIRA, Dalziza De; BORROZZINO, Edmirson. Temperatura do solo sob três condições de cobertura em Londrina, Paranavaí e Guarapuava, no estado do Paraná. **Agrometeoros**, [S. l.], v. 26, n. 1, 2018. ISSN: 2526-7043. DOI: 10.31062/agrom.v26i1.26360. Disponível em: <http://seer.sct.embrapa.br/index.php/agrometeoros/article/view/26360>.

OLIVEIRA, Emídio Cantídio Almeida De; FREIRE, Fernando José; OLIVEIRA, Ruthanna Isabelle De; FREIRE, Maria Betânia Galvão dos Santos; SIMÕES NETO, Djalma Euzébio; SILVA, Silas Alves Monteiro Da. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 34, n. 4, p. 1343–1352, 2010. ISSN: 0100-0683.

OLIVEIRA, Luiz Felipe Ramalho De; OLIVEIRA, Marcio Leles Romarco De; GOMES, Francisco Sérgio; SANTANA, Reynaldo Campos. Estimating foliar nitrogen in Eucalyptus using vegetation indexes. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 74, n. 2, p. 142–147, 2017. ISSN: 0103-9016.

OLIVEIRA, Luiz Felipe Ramalho De; SANTANA, Reynaldo Campos; OLIVEIRA, Marcio Leles Romarco De. Nondestructive estimation of leaf nutrient concentrations in Eucalyptus plantations. **Cerne**, [S. l.], v. 25, n. 2, p. 184–194, 2019. ISSN: 0104-7760.

OLIVEIRA, Maria Neudes Sousa De; OLIVA, Marco Antonio; MARTÍNEZ, Carlos Alberto; MERCIER, Helenice; SILVA, Marco Aurélio Pedron. Sensibilidade estomática ao ABA em função do pH e de níveis de Ca<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub>-e PO<sub>4</sub> (3-) na seiva do xilema. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, [S. l.], v. 14, n. 2, p. 117–123, 2002. ISSN: 1677-0420.

OLLINGER, Scott V. Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. **New Phytologist**, [S. l.], v. 189, n. 2, p. 375–394, 2011. ISSN: 0028-646X.

ORTAS, Ibrahim; KAYA, Zülküf; ERCAN, Server. Effect of pyrite application on wheat-maize growth and nutrient uptake under diverse soil conditions. **Journal of Plant Nutrition**, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 295–309, 2015. ISSN: 0190-4167.

OTTO, Rafael; VITTI, Godofredo Cesar; LUZ, Pedro Henrique de Cerqueira. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 34, n. 4, p. 1137–1145, 2010. ISSN: 0100-0683.

PANALYTICAL, B. V. X'pert highscore plus. **X'Pert HighScore Plus, Lelyweg, Almelo, the Netherlands**, [S. l.], v. 2, 2002.

PATIL, S. S.; PATIL, V. C.; AL-GAADI, K. A. Wheat acreage, productivity and production estimation through Remote Sensing and GIS techniques. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, [S. l.], v. 4, n. 8, p. 3132–3138, 2010. ISSN: 1991-8178.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná. **Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Estadual Paraná**, [S. l.], 2017.

PAULETTI, Volnei; PIERRI, Letícia De; RANZAN, Thiago; BARTH, Gabriel; MOTTA, Antonio Carlos Vargas. Efeitos em longo prazo da aplicação de gesso e calcário no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 495–505, 2014. ISSN: 0100-0683. DOI: 10.1590/S0100-06832014000200014.

PAVAN, M. A. Comportamento do gesso nos solos ácidos das regiões tropicais e subtropicais. **Piracicaba, POTAPOS-Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato**, [S. l.], 1986.

PAZ<sup>1</sup>, Cesar Roberto; SAQUET<sup>1</sup>, Danieli Batistela; FERRAZ<sup>1</sup>, Rafael Camargo; GIROTTTO, Junior; PEREIRA<sup>1</sup>, Rudiney Soares; COSTA<sup>1</sup>, Vera Pontremoli. Discriminação de diferentes espécies de pastagens com uso da espectrorradiometria. *[S. l.]*, 2009.

PENG, Wen Ting; QI, Wen Lu; NIE, Miao Miao; XIAO, Yan Bo; LIAO, Hong; CHEN, Zhi Chang. Magnesium supports nitrogen uptake through regulating NRT2. 1/2.2 in soybean. **Plant and Soil**, *[S. l.]*, p. 1–15, 2019. ISSN: 1573-5036.

PENG, Yu; ZHANG, Mei; XU, Ziyan; YANG, Tingting; SU, Yali; ZHOU, Tao; WANG, Huiting; WANG, Yue; LIN, Yongyi. Estimation of leaf nutrition status in degraded vegetation based on field survey and hyperspectral data. **Scientific Reports**, *[S. l.]*, v. 10, n. 1, p. 1–12, 2020. ISSN: 2045-2322.

PENN, Chad J.; CAMBERATO, James J. A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. **Agriculture**, *[S. l.]*, v. 9, n. 6, p. 120, 2019.

PEREIRA, Eduardo; PORTELLA, Kleber Franke; BRAGANÇA, Mariana d’Orey Gaivão Portella; OCHILISKI, Lucas Maier; OLIVEIRA, Isabela Cristina. Oxidação da pirita e seus efeitos em argamassas de cimento Portland sujeitas ao ataque por sulfatos de origem interna. **Matéria (Rio de Janeiro)**, *[S. l.]*, v. 21, n. 2, p. 342–354, 2016 a. ISSN: 1517-7076.

PEREIRA, Rodrigo Moura; CASAROLI, Derblai; VELLAME, Lucas Melo; ALVES JÚNIOR, José; EVANGELISTA, Adão Wagner Pêgo. Sugarcane leaf area estimate obtained from the corrected Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, *[S. l.]*, v. 46, n. 2, p. 140–148, 2016 b. ISSN: 1983-4063.

PEREZ, Elizabeth; SULBARAN, Miguel; BALL, María M.; YARZABAL, Luis Andres. Isolation and characterization of mineral phosphate-solubilizing bacteria naturally colonizing a limonitic crust in the south-eastern Venezuelan region. **Soil Biology and Biochemistry**, *[S. l.]*, v. 39, n. 11, p. 2905–2914, 2007. ISSN: 0038-0717.

PERINOTTO, J. A.; LINO, I. C. Geologia, recursos minerais e passivos ambientais. **Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí, Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP/Campus de Rio Claro**. Disponível em: <http://ceapla.rc.unesp.br/atlas/geologia.html>. Acesso em: fevereiro , *[S. l.]*, 2006.

PESSOA, Rodrigo Souza; SILVA, Carlos Alberto; MORETTI, Bruno Silva; FURTINI NETO, Antônio Eduardo; INDA, Alberto Vasconcellos; CURI, Nilton. Solubilization of potassium from alternative rocks by humic and citric acids and coffee husk. **Ciência e Agrotecnologia**, [S. l.], v. 39, n. 6, p. 553–564, 2015. ISSN: 1413-7054.

PIAS, Osmar Henrique de Castro; TIECHER, Tales; CHERUBIN, Maurício Roberto; MAZURANA, Michael; BAYER, Cimélio. Crop yield responses to sulfur fertilization in Brazilian no-till soils: a systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 43, 2019. ISSN: 0100-0683.

PIMENTEL-GOMES, F. **Statistics Course Experimental**. Piracicaba FEALQ, Piracicaba, 2009.

PIMSTEIN, Agustin; KARNIELI, Arnon; BANSAL, Surinder K.; BONFIL, David J. Exploring remotely sensed technologies for monitoring wheat potassium and phosphorus using field spectroscopy. **Field Crops Research**, [S. l.], v. 121, n. 1, p. 125–135, 2011. ISSN: 0378-4290.

PRADO OSCO, Lucas et al. Predicting canopy nitrogen content in citrus-trees using random forest algorithm associated to spectral vegetation indices from UAV-Imagery. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 11, n. 24, p. 2925, 2019.

PRADO, Renato de Mello; PANCELLI, Márcio Alexandre. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. **Bragantia**, [S. l.], v. 67, n. 4, p. 951–959, 2008. ISSN: 0006-8705.

PURAKAYASTHA, T. J.; SINGH, C. S.; CHHONKAR, P. K. Growth and iron nutrition of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *italica* Plenck), grown in a Typic Ustochrept, as influenced by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in the presence of pyrite and farmyard manure. **Biology and fertility of soils**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 35–38, 1998. ISSN: 0178-2762.

QUEZADA-CRESPO, Carlos Julio; CARRILLO-ZENTENO, Manuel Danilo; MORALES-INTRIAGO, Fátima Lourdes; CARRILLO-ALVARADO, Rómulo Alcides. Nutrient critical levels and availability in soils cultivated with peach palm (*Bactris gasipaes* Kunth.) in Santo Domingo de Los Tsáchilas, Ecuador. **Acta Agronómica**, [S. l.], v. 66, n. 2, p. 235–240, 2017. ISSN: 0120-2812.

RAHETLAH, B. Volatsara; SALGADO, Paulo; ANDRIANARISOA, Blandine; TILLARD, Emmanuel; RAZAFINDRAZAKA, Harena; LE MEZO, Lionel; RAMALANJAONA, V. L. Relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and forage biomass yield in the Vakinankaratra region, Madagascar. [S. l.], 2014.

RAHMAN, Muhammad Moshiur; ROBSON, Andrew J. A novel approach for sugarcane yield prediction using Landsat time series imagery: A case study on Bundaberg region. **Advances in Remote Sensing**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 93–102, 2016.

RAIJ, B. Van. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. [s.l.] : IAC, 2001. ISBN: 8585564059.

RAIJ, B. Van; CANTARELLA, Heitor; QUAGGIO, José A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. [s.l.] : Instituto Agronômico/Fundação IAC Campinas, 1997. v. 285

RAMANAIDOU, EMIC; WELLS, M.; LAU, I.; LAUKAMP, C. Characterization of iron ore by visible and infrared reflectance and, Raman spectroscopies. In: **Iron ore**. [s.l.] : Elsevier, 2015. p. 191–228.

RAMOS, Adriano Nunes; FORMOSO, Milton Luiz Laquintinie. **Argilominerais das rochas sedimentares da Bacia do Paraná**. [s.l.] : PETROBRAS, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello ..., 1975.

RAMOS, Bárbara Zini; TOLEDO, João Paulo Vaz Floriano; LIMA, José Maria De; SERAFIM, Milson Evaldo; BASTOS, Ana Rosa Ribeiro; GUIMARÃES, Paulo Tácito Gontijo; COSCIONE, Aline Renée. Doses de gesso em cafeiro: influência nos teores de cálcio, magnésio, potássio e pH na solução de um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 37, n. 4, p. 1018–1026, 2013. ISSN: 0100-0683. DOI: 10.1590/S0100-06832013000400019.

RAMOS, Claudete G.; QUEROL, Xavier; OLIVEIRA, Marcos L. S.; PIRES, Karen; KAUTZMANN, Rubens M.; OLIVEIRA, Luis F. S. A preliminary evaluation of volcanic rock powder for application in agriculture as soil a remineralizer. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 512, p. 371–380, 2015. ISSN: 0048-9697. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.12.070.

RAMOS, Claudete Gindri; DE MEDEIROS, Diego dos Santos; GOMEZ, Leandro; OLIVEIRA, Luis Felipe Silva; SCHNEIDER, Ivo André Homrich; KAUTZMANN, Rubens Muller. Evaluation of soil Re-mineralizer from by-product of volcanic rock mining: experimental proof using black oats and maize crops. **Natural Resources Research**, [S. l.], p. 1–18, 2019. ISSN: 1573-8981.

RANZAN, Thiago. Adubação nitrogenada e xisto retortado no rendimento e produção de energia da biomassa do arroz. **Embrapa Clima Temperado-Tese/dissertação (ALICE)**, [S. l.], 2014.

RAUCH, Henry W.; WHITE, William B. Dissolution kinetics of carbonate rocks: 1. Effects of lithology on dissolution rate. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 381–394, 1977. ISSN: 0043-1397.

RAZAQ, Muhammad; ZHANG, Peng; SHEN, Hai-long. Influence of nitrogen and phosphorous on the growth and root morphology of Acer mono. **PLoS one**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. e0171321, 2017. ISSN: 1932-6203.

RESENDE, Geraldo M.; ALVARENGA, Marco Antônio R.; YURI, Jony E.; SOUZA, Rovilson José De. Rendimento e teores de macronutrientes em alface americana em função de doses de nitrogênio e molibdênio. **Horticultura Brasileira**, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 373–378, 2012. ISSN: 0102-0536.

RESENDE, A. V; MACHADO, C. T. T.; MARTINS, E. S.; NASCIMENTO, M. T.; SOBRINHO, D. A. S.; FALEIRO, A. S. G.; LINHARES, N. W.; SOUZA, A. L.; CORAZZA, E. J. Potencial de rochas silicáticas no fornecimento de potássio para culturas anuais: I. Respostas da soja e do milheto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO 2005, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] p. 2005.

RIBES, R. P.; BUSS, R. R.; LAZARI, R.; POTES, M. L.; BAMBERG, A. L. Efeito de rochas moídas sobre a concentração de macronutrientes na parte áerea de plantas de milho. In: EMBRAPA CLIMA TEMPERADO-ARTIGO EM ANAIS DE CONGRESSO (ALICE) 2012, **Anais** [...]. : In: WORKSHOP INSUMOS PARA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL, 2012, Pelotas. Anais ..., 2012

RICHARDSON, Arthur J.; WIEGAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, [S. l.], v. 43, n. 12, p. 1541–

1552, 1977. ISSN: 0099-1112.

RODRIGUES, Lásara Fabrícia; PINTO, Luiz Ricardo. Análise comparativa de metodologias utilizadas no despacho de caminhões em minas a céu aberto. **Rem: Revista Escola de Minas**, [S. l.], v. 65, n. 3, p. 377–384, 2012. ISSN: 0370-4467.

RODRIGUES, Marlon. **Subprodutos da mineração de calcário da Formação Iratí como fontes de cálcio, magnésio e enxofre**. Universidade Federal de Pelotas, 2017.

RODRIGUES, Marlon; NANNI, Marcos Rafael; CEZAR, Everson; ABRANTES DOS SANTOS, Glaucio Leboso Alemparte; SILVEIRA REIS, Amanda; DE OLIVEIRA, Karym Mayara. Evaluation of the use of spectroradiometry for the determination of soil exchangeable ions after the application of mining coproducts. **Applied Spectroscopy Reviews**, [S. l.], v. 55, n. 6, p. 491–508, 2020. ISSN: 0570-4928. DOI: 10.1080/05704928.2019.1683569. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/05704928.2019.1683569>.

ROIG, Henrique Llacer; FERREIRA, Alexandre Moreno Richwin; MENEZES, PHBJ; MAROTTA, Giuliano Santanna. Uso de câmeras de baixo custo acopladas a veículos aéreos leves no estudo do aporte de sedimentos no Lago Paranoá. **Proceedings of the Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto—SBSR, Foz do Iguaçu, Brazil**, [S. l.], p. 13–18, 2013.

ROSA, Roberto. **Introdução ao sensoriamento remoto**. [s.l.] : Edufu, 1990. ISBN: 8570780222.

ROSOLEM, C. A. Interação do potássio com outros íons. **Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba, POTAFOS**, [S. l.], p. 239–260, 2005.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R.; RIBEIRO, D. B. O. Formas de potássio no solo e nutrição potássica da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 121–125, 1988. ISSN: 0100-0683.

ROSOLEM, Ciro Antonio; VICENTINI, João Paulo Testa Moura Montans; STEINER, Fábio. Suprimento de potássio em função da adubação potássica residual em um Latossolo Vermelho do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 36, n. 5, p. 1507–1515, 2012. ISSN: 0100-0683.

ROSSEL, R. A. Viscarra; BEHRENS, Thorsten. Using data mining to model and interpret soil

diffuse reflectance spectra. **Geoderma**, [S. l.], v. 158, n. 1–2, p. 46–54, 2010. ISSN: 0016-7061.

ROUSE JR, J. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. [S. l.], 1974.

RUDORFF, B. F. T.; MOREIRA, M. A.; ALVES, M. **Sensoriamento remoto aplicado à agricultura**. [s.l: s.n.].

RYU, K. H.; KIM, G. Y.; CHAE, H. Y. Monitoring Greenhouse Plants Using Thermal Imaging. **IFAC Proceedings Volumes**, [S. l.], v. 33, n. 29, p. 181–186, 2000. ISSN: 1474-6670.

SALISBURY, Frank B.; ROSS, Cleon W. **Plant physiology Plant physiology Plant physiology**. Belmont, California: Wadsworth Publishing Co, 1985.

SALIU, Muyideen Alade; SHEHU, Shaib Abdulazeez. Effects of calcite and dolomite mining on water and soil qualities: a case study of Freedom Group of Companies, Ikpeshi, Edo State Nigeria. **Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 19–24, 2012. ISSN: 2141-7016.

SANTOS, Danilo Rheinheimer Dos; GATIBONI, Luciano Colpo; KAMINSKI, João. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, [S. l.], v. 38, n. 2, p. 576–586, 2008. ISSN: 0103-8478. DOI: 10.1590/S0103-84782008000200049. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782008000200049&lng=pt&tlang=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782008000200049&lng=pt&tlang=pt).

SANTOS, Marilin Mariano Dos; MATAI, Patricia Helena Lara dos Santos. A importância da industrialização do xisto brasileiro frente ao cenário energético mundial. **Rem: Revista Escola de Minas**, [S. l.], v. 63, n. 4, p. 673–678, 2010. ISSN: 0370-4467.

SANTOS, Hemmannuella C.; DE OLIVEIRA, Fábio H. T.; ARRUDA, Jandeilson A. De; LOPES, Almir R. da S.; SOUZA JÚNIOR, Reginaldo F. De; FARIA, Daise R. De. Soil sampling for evaluation of fertility as a function of variability of chemical characteristics. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.], v. 13, p. 849–854, 2009. ISSN: 1415-4366.

SANTOS, Roberto Ventura; SOUZA, Paulo A.; DE ALVARENGA, Carlos José Souza;

DANTAS, Elton Luiz; PIMENTEL, Marcio Martins; DE OLIVEIRA, Claudinei Gouveia; DE ARAÚJO, Laury Medeiros. Shrimp U-Pb zircon dating and palynology of bentonitic layers from the Permian Irati Formation, Paraná Basin, Brazil. **Gondwana research**, [S. l.], v. 9, n. 4, p. 456–463, 2006. ISSN: 1342-937X.

SANTOS, Wedisson Oliveira; MATTIELLO, Edson Marcio; VERGUTZ, Leonardus; COSTA, Rodolfo Fagundes. Production and evaluation of potassium fertilizers from silicate rock. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, [S. l.], v. 179, n. 4, p. 547–556, 2016. ISSN: 1436-8730.

SAVINI, Isaac; KOALA, Saidou; KIHARA, Job. Minjingu phosphate rock availability in low-pH highly weathered soil as affected by added salts. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 72, n. 5, p. 440–451, 2015. ISSN: 0103-9016.

SCHOEN, Chaiane; AUMOND, Juarêz José; STÜRMER, Sidney Luiz. Efficiency of the On-Farm Mycorrhizal Inoculant and Phonolite Rock on Growth and Nutrition of *Schinus terebinthifolius* and *Eucalyptus saligna*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 40, 2016. ISSN: 0100-0683.

SENBAYRAM, Mehmet; GRANSEE, Andreas; WAHLE, Verena; THIEL, Heike. Role of magnesium fertilisers in agriculture: plant-soil continuum. **Crop and Pasture Science**, [S. l.], v. 66, n. 12, p. 1219–1229, 2016. ISSN: 1836-5795.

SHI, Chenglong; DING, Xiaozhong; LIU, Yanxue; ZHOU, Xiaodong. Reflectance Spectral Features and Significant Minerals in Kaishantun Ophiolite Suite, Jilin Province, NE China. **Minerals**, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 100, 2018. ISSN: 2075-163X. DOI: 10.3390/min8030100. Disponível em: <http://www.mdpi.com/2075-163X/8/3/100>.

SHOEMAKER, H. E.; MCLEAN, E. O.; PRATT, P. F. Buffer Methods for Determining Lime Requirement of Soils With Appreciable Amounts of Extractable Aluminum. **Soil Science Society of America Journal**, [S. l.], v. 25, n. 4, p. 274–277, 1961. ISSN: 03615995. DOI: 10.2136/sssaj1961.03615995002500040014x. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.2136/sssaj1961.03615995002500040014x>.

SHUMAN, Larry M. Mineral nutrition. **Plant-environment interactions**. 2nd ed. Marcel Dekker, New York, NY, [S. l.], p. 65–109, 2000.

SILVA, A. C.; FREITAS, R. S.; FERREIRA, L. R.; FONTES, P. C. R. Acúmulo de macro e micronutrientes por soja e Brachiaria brizantha emergida em diferentes épocas. **Planta daninha**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 49–56, 2009. ISSN: 0100-8358.

SILVA, Ana Paula Moreira Da; VIANA, João Paulo; CAVALCANTE, André Luís Brasil. Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas. [S. l.], 2012.

SILVA, Douglas Ramos Guelfi; MARCHI, Giuliano; SPEHAR, Carlos Roberto; GUILHERME, Luiz Roberto Guimarães; REIN, Thomaz Adolpho; SOARES, Danilo Araújo; ÁVILA, Fabrício William. Characterization and nutrient release from silicate rocks and influence on chemical changes in soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 951–962, 2012. ISSN: 0100-0683.

SILVA, FABIO CESAR D. A. SILVA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed., [s.l.] : Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos Brasília, 2009. v. 2

SILVA JÚNIOR, Mário C. Da; PINTO, Francisco de A. De C.; QUEIROZ, Daniel M. De; VIEIRA, Luciano B.; RESENDE, Ricardo C. De. Using an aerial system of remote sensing to detect different nutritional status in Brachiaria decumbens. **Engenharia Agrícola**, [S. l.], v. 33, n. 5, p. 1049–1062, 2013. ISSN: 0100-6916.

SILVA, L. da S.; GATIBONI, L. C.; ANGHINONI, I.; SOUZA, R. O.; CQFS/RS-SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. NRS ed., Santa Maria.

SILVEIRA, Carlos Augusto Posser; BAMBERG, Adilson Luís; MARTINAZZO, Rosane; PILLON, Clenio Nailto; MARTINS, Éder de Souza; CLAUSE FÁTIMA DE BRUM PIANA; LUIS HENRIQUE GULARTE FERREIRA; DOS SANTOS PEREIRA, Ivan; STUMPF, Lizete. **Protocolo para avaliação da eficiência agronômica de remineralizadores de solo**. 1 st ed., Pelotas-RS: Embrapa Clima Temperado, 2019.

SIMÕES, Maurício dos Santos; ROCHA, Jansle Vieira; LAMPARELLI, Rubens Augusto Camargo. Spectral variables, growth analysis and yield of sugarcane. **Scientia Agricola**, [S. l.], v. 62, n. 3, p. 199–207, 2005. ISSN: 0103-9016. DOI: 10.1590/S0103-90162005000300001. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-)

90162005000300001&lng=en&tlnge=en.

SIMONSSON, Magnus; HILLIER, Stephen; ÖBORN, Ingrid. Changes in clay minerals and potassium fixation capacity as a result of release and fixation of potassium in long-term field experiments. **Geoderma**, [S. l.], v. 151, n. 3–4, p. 109–120, 2009. ISSN: 0016-7061.

SMITH, D. K. Deane K.; JENKINS, Ron. The Powder Diffraction file: Past, present, and future. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, [S. l.], v. 101, n. 3, p. 259, 1996. ISSN: 1044677X. DOI: 10.6028/jres.101.027. Disponível em: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/101/3/j3smit.pdf>.

SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B. Aspectos regionais da estratigrafia da Bacia do Paraná no seu flanco nordeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA 1973, **Anais** [...]. [s.l.: s.n.] p. 243–256.

SOLOS, Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro**, [S. l.], 2013.

SONG, Shalei; GONG, Wei; ZHU, Bo; HUANG, Xin. Wavelength selection and spectral discrimination for paddy rice, with laboratory measurements of hyperspectral leaf reflectance. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, [S. l.], v. 66, n. 5, p. 672–682, 2011. ISSN: 0924-2716.

SORATTO, Rogério Peres; CRUSCIOL, Carlos Alexandre Costa. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S. l.], p. 675–688, 2008. ISSN: 0100-0683.

SOUZA, André Marcelo De; BREITKREITZ, Márcia Cristina; FILGUEIRAS, Paulo Roberto; ROHWEDDER, Jarbas José Rodrigues; POPPI, Ronei Jesus. Experimento didático de quimiometria para calibração multivariada na determinação de paracetamol em comprimidos comerciais utilizando espectroscopia no infravermelho próximo: um tutorial, parte II. **Química Nova**, [S. l.], v. 36, n. 7, p. 1057–1065, 2013. ISSN: 0100-4042.

SOUZA, Jorge Luiz Moretti De; GERSTEMBERGER, Emerson; GURSKI, Bruno César; OLIVEIRA, Ricardo Augusto De. Adjustment of water-crop production models for ratoon sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 45, n. 4, p. 426–433, 2015. ISSN: 1983-

4063.

SOUZA, Fred Newton da Silva. O potencial de agrominerais silicáticos como fonte de nutrientes na agricultura tropical. *[S. l.]*, 2014.

SOUZA, M. H. O. Caracterização das rochas sedimentares da Formação Irati e seus produtos intempéricos para utilização como aditivo no Pólo Cerâmico de Santa Gertrudes. **Rio Claro**, *[S. l.]*, 1999.

SOUZA, Marcos Henrique de Oliveira. **Separação do calcário e do folhelho pirobetuminoso da Formação Irati para utilização como corretivo e como aditivo na indústria cerâmica**. 2003. Universidade Estadual Paulista (UNESP), *[S. l.]*, 2003.

SPOSITO, Garrison. **The surface chemistry of soils**. [s.l.] : Oxford university press, 1984. ISBN: 019503421X.

SRIPADA, Ravi P.; HEINIGER, Ronnie W.; WHITE, Jeffrey G.; MEIJER, Alan D. Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. **Agronomy Journal**, *[S. l.]*, v. 98, n. 4, p. 968–977, 2006. ISSN: 0002-1962.

SUN, Hong-Tao; SAKKA, Yoshio; MIWA, Yuji; SHIRAHATA, Naoto; FUJII, Minoru; GAO, Hong. Spectroscopic characterization of bismuth embedded Y zeolites. **Applied Physics Letters**, *[S. l.]*, v. 97, n. 13, p. 131908, 2010. ISSN: 0003-6951. DOI: 10.1063/1.3496460. Disponível em: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3496460>.

TABELIN, Carlito Baltazar; VEERAWATTANANUN, Suchol; ITO, Mayumi; HIROYOSHI, Naoki; IGARASHI, Toshifumi. Pyrite oxidation in the presence of hematite and alumina: I. Batch leaching experiments and kinetic modeling calculations. **Science of the Total Environment**, *[S. l.]*, v. 580, p. 687–698, 2017. ISSN: 0048-9697.

TANG, Xu-guang; SONG, Kai-shan; LIU, Dian-wei; WANG, Zong-mingZHANG Bai; DU, Jia; ZENG, Li-hong; JIANG, Guang-jia; WANG, Yuan-dong. Comparison of methods for estimating soybean chlorophyll content based on visual/near infrared reflection spectra. **Spectroscopy and Spectral Analysis**, *[S. l.]*, v. 31, n. 2, p. 371–374, 2011. ISSN: 1000-0593.

TAVAKKOLI, Ehsan; LYONS, Graham; ENGLISH, Peter; GUPPY, Chris N. Silicon nutrition of rice is affected by soil pH, weathering and silicon fertilisation. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, *[S. l.]*, v. 174, n. 3, p. 437–446, 2011. ISSN: 1436-8730.

TCHOUANKOUE, Jean Pierre; TCHEKAMBOU, Arliane Nicole Tetchou; ANGUE, Monique Abossolo; NGANSOP, Christophe; THEODORO, Suzi Huff. Rock fertilizers as an alternative to conventional fertilizers: the use of basalt from the Cameroon volcanic line for maize farming on ferralitic soils. **Geotherapy: Innovative Methods of Soil Fertility Restoration, Carbon Sequestration, and Reversing CO<sub>2</sub> Increase**, [S. l.], p. 449–464, 2016.

TEIXEIRA, Aline Maria dos Santos; GARRIDO, Francisco Manoel dos Santos; MEDEIROS, Marta Eloisa; SAMPAIO, João Alves. Effect of thermal treatments on the potassium and sodium availability in phonolite rock powder. **International Journal of Mineral Processing**, [S. l.], v. 145, p. 57–65, 2015. ISSN: 03017516. DOI: 10.1016/j.minpro.2015.07.002. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030175161530003X>.

TEIXEIRA, Paulo César; DONAGEMMA, Guilherme Kangussu; FONTANA, Ademir; TEIXEIRA, Wenceslau Geraldes. Manual de métodos de análise de solo. **Rio de Janeiro, Embrapa. 573p**, [S. l.], 2017.

TEIXEIRA, Welldy Gonçalves; DE SOUSA, Robson Thiago Xavier; KORNDÖRFER, Gaspar Henrique. Resposta da cana-de-açúcar a doses de fósforo fornecidas por fertilizante organomineral. **Bioscience Journal**, [S. l.], v. 30, n. 6, 2014. ISSN: 1981-3163.

TETSOPGANG, Samuel; FONYUY, Fabrice. Enhancing growth quality and yield of cabbage (*Brassica oleracea*) while increasing soil pH, chemicals and organic carbon with the application of fines from volcanic pyroclastic materials on a tropical soil in Wum, Northwest Cameroon, Africa. **Scientific African**, [S. l.], v. 6, p. e00199, 2019. ISSN: 2468-2276.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, O. H.; ALMEIRA, E. De. Mecanismos para disponibilização de nutrientes minerais a partir de processos biológicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM 2010, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] p. 173–181.

THEODORO, S. H.; LEONARDOS, Othon Henry. O. Rochagem: uma questão de soberania nacional. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA. GRAMADO 2011, Gramado. **Anais** [...]. Gramado p. 337–340. DOI: 10.13140/2.1.3284.4169.

THEODORO, Suzi H.; LEONARDOS, Othon H.; ROCHA, Eduardo; MACEDO, Iris; REGO, Kleysson G. Stonemeal of amazon soils with sediments from reservoirs: a case study of remineralization of the tucuruí degraded land for agroforest reclamation. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S. l.], v. 85, n. 1, p. 23–34, 2013. ISSN: 0001-3765.

THEODORO, Suzi Maria de Cordova Huff; LEONARDOS, Othon Henry; ROCHA, Edinaldo Lyra; REGO, Kleysson Garrido. Experiências de uso de rochas silicáticas como fonte de nutrientes. [S. l.], 2006.

TIWARI, K. N.; PATHAK, A. N.; UPADHYAY, G. P. Effect of sedimentary pyrites and Zn application on yield, Zn and Ca nutrition of rice and wheat crops and on amelioration of saline sodic soil. **The Journal of Agricultural Science**, [S. l.], v. 99, n. 2, p. 411–416, 1982. ISSN: 1469-5146.

TONIETTO, Ângela; SILVA, Janaina J. M. C. Valoração de danos nos casos de mineração de ferro no Brasil. **Revista brasileira de criminalística**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 31–38, 2011. ISSN: 2237-9223.

TOSCANI, R. G. S.; CAMPOS, J. E. G. Use of basalt and phosphate rock powder as fertilizers in weathered soils. **Geoscience**, [S. l.], v. 36, p. 259–274, 2017.

USHER, Courtney R.; CLEVELAND, Curtis A.; STRONGIN, Daniel R.; SCHOONEN, Martin A. Origin of oxygen in sulfate during pyrite oxidation with water and dissolved oxygen: An in situ horizontal attenuated total reflectance infrared spectroscopy isotope study. **Environmental science & technology**, [S. l.], v. 38, n. 21, p. 5604–5606, 2004. ISSN: 0013-936X.

VAN RAIJ, Bernardo. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. [s.l.] : International Plant Nutrition Institute, 2011. ISBN: 8598519073.

VAN STRAATEN, Peter. Farming with rocks and minerals: challenges and opportunities. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [S. l.], v. 78, n. 4, p. 731–747, 2006. ISSN: 0001-3765. DOI: 10.1590/S0001-37652006000400009. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0001-37652006000400009&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652006000400009&lng=en&tlng=en).

VAN STRAATEN, Peter. Geodiversity, biodiversity and the origin of crops. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE ROCHAGEM 2010, Brasília. **Anais** [...]. Brasília p. 13–22.

VAN STRAATEN, Peter. Rocks for crops: the use of locally available minerals and rocks to enhance soil productivity. In: WORLD FERTILIZER CONGRESS 2014, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] p. 55.

VELOSO, Carlos Alberto Costa; SOUZA, Francisco Ronaldo Sarmanho De; PEREIRA, Walcilene Lacerda Matos; TENÓRIO, Adna Rose de Moraes. Relações cálcio, magnésio e potássio sobre a produção de matéria seca de milho. **Acta Amazonica**, [S. l.], v. 31, n. 2, p. 193, 2001. ISSN: 0044-5967.

VERMA, T. S.; TRIPATHI, B. R. Zinc and iron interaction in submerged paddy. **Plant and Soil**, [S. l.], v. 72, n. 1, p. 107–116, 1983. ISSN: 0032-079X.

VETTERLEIN, Doris; KÜHN, Thomas; KAISER, Klaus; JAHN, Reinhold. Illite transformation and potassium release upon changes in composition of the rhizosphere soil solution. **Plant and soil**, [S. l.], v. 371, n. 1–2, p. 267–279, 2013. ISSN: 0032-079X.

VICENTE, Luiz Eduardo; DE SOUZA FILHO, Carlos Roberto. Identification of mineral components in tropical soils using reflectance spectroscopy and advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 115, n. 8, p. 1824–1836, 2011. ISSN: 0034-4257.

VON WILPERT, K.; LUKES, M. Ecochemical effects of phonolite rock powder, dolomite and potassium sulfate in a spruce stand on an acidified glacial loam. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, [S. l.], v. 65, n. 2, p. 115–127, 2003. ISSN: 1385-1314.

WALLACE, A.; ROMNEY, E. M.; WALLACE, G. A.; MUELLER, R. T.; CHA, J. W. Pyrite as a source of iron for plants. **Journal of Plant Nutrition**, [S. l.], v. 2, n. 1–2, p. 193–195, 1980. ISSN: 0190-4167.

WAN, Liang et al. Combining UAV-based vegetation indices and image classification to estimate flower number in oilseed rape. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 10, n. 9, p. 1484, 2018.

WANG, Laigang; TIAN, Yongchao; YAO, Xia; ZHU, Yan; CAO, Weixing. Predicting grain yield and protein content in wheat by fusing multi-sensor and multi-temporal remote-sensing images. **Field Crops Research**, [S. l.], v. 164, p. 178–188, 2014. ISSN: 0378-4290.

WELTER, Marina Keiko; MELO, Valdinar Ferreira; BRUCKNER, Cláudio Horst; GÓES, Helen Thaís Pereira De; CHAGAS, Edvan Alves; UCHÔA, Sandra Cátia Pereira. Efeito da aplicação de pó de basalto no desenvolvimento inicial de mudas de camu-camu (*Myrciaria dubia*). **Revista Brasileira de Fruticultura**, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 922–931, 2011. ISSN: 0100-2945.

WERNER, J. C.; PAULINO, V. T.; CANTARELLA, H. Recomendação de adubação e calagem para forrageiras. **RAIJ, B. van; SILVA, NM; BATAGLIA, OC; QUAGGIO, JA**, [S. l.], p. 263–271, 1996.

WEST, Jonathan S.; BRAVO, Cedric; OBERTI, Roberto; LEMAIRE, Dimitri; MOSHOU, Dimitrios; MCCARTNEY, H. Alastair. The potential of optical canopy measurement for targeted control of field crop diseases. **Annual review of Phytopathology**, [S. l.], v. 41, n. 1, p. 593–614, 2003. ISSN: 0066-4286.

XUE, Jinru; SU, Baofeng. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. **Journal of Sensors**, [S. l.], v. 2017, 2017. ISSN: 1687-725X.

YENGOH, Genesis T.; DENT, David; OLSSON, Lennart; TENGBERG, Anna E.; TUCKER III, Compton J. **Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales: Current Status, Future Trends, and Practical Considerations**. [s.l.] : Springer, 2015. ISBN: 3319241125.

YERMIYAHU, Uri; ZIPORI, Isaac; FAINGOLD, Inna; YUSOPOV, Ludmila; FAUST, Nitay; BAR-TAL, Asher. Polyhalite as a multi nutrient fertilizer–potassium, magnesium, calcium and sulfate. **Israel Journal of Plant Sciences**, [S. l.], v. 64, n. 3–4, p. 145–157, 2017. ISSN: 0792-9978.

ZAINI, Nasrullah; VAN DER MEER, Freek; VAN DER WERFF, Harald. Effect of grain size and mineral mixing on carbonate absorption features in the SWIR and TIR wavelength regions. **Remote sensing**, [S. l.], v. 4, n. 4, p. 987–1003, 2012.

ZALÁN, P. V et al. Análise da bacia do Paraná. **Relatório Interno da Petrobrás. Depex/Cenpes**, [S. l.], n. 1035–5765, 1986.

ZANARDO, A.; MORENO, M. M. T.; ROVERI, C. D.; ROCHA, R. R. Da. Critérios de avaliação de intemperismo e sua relação com as propriedades tecnológicas das matérias-primas cerâmicas da formação Corumbataí (Região de Rio Claro-SP). In: 53º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA 2009, **Anais** [...]. [s.l: s.n.] p. 1–12.

ZANARDO, Antenor; MONTIBELLER, Cibele Carolina; NAVARRO, Guillermo Rafael Beltran; MORENO, Maria Margarita Torres; DA ROCHA, Rogers Raphael; DEL ROVERI, Carolina; ANDREZZA DE ALMEIDA, AZZI. Formação Corumbataí na região de Rio

Claro/SP: petrografia e implicações genéticas. **Geociências (São Paulo)**, [S. l.], v. 35, n. 3, p. 322–345, 2016. ISSN: 1980-900X.

ZHANG, Chengsheng; KONG, Fanyu. Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants. **Applied Soil Ecology**, [S. l.], v. 82, p. 18–25, 2014. ISSN: 0929-1393.

## 9. APÊNDICES

Tabela 28. Valores médios do NDVI coletado pelo espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
NDVI – 57 DAP						
fonolito	0,508 Aa	0,532 Aa	0,509 Aa	0,506 Aa	0,506 Aa	0,544 Aa
siltito argiloso	0,532 Aa	0,500 Ab	0,514 Aa	0,524 Aa	0,517 Aa	0,493 Ab
NDVI – 120 DAP						
fonolito	0,508 Aa	0,509 Aa	0,507 Aa	0,477 Aa	0,509 Aa	0,510 Aa
siltito argiloso	0,539 Aa	0,507 Aa	0,516 Aa	0,492 Aa	0,494 Aa	0,506 Aa
NDVI – 150 DAP						
fonolito	0,485 Aa	0,490 Aa	0,521 Aa	0,474 Aa	0,470 Aa	0,467 Aa
siltito argiloso	0,497 Aa	0,478 Aa	0,497 Aa	0,497 Aa	0,483 Aa	0,500 Aa
NDVI – 210 DAP						
fonolito	0,607 Aa	0,582 Aa	0,582 Aa	0,578 Aa	0,570 Aa	0,614 Aa
siltito argiloso	0,622 Aa	0,619 Aa	0,621 Aa	0,611 Aa	0,604 Aa	0,589 Aa
NDVI – 254 DAP						
fonolito	0,472 Aa	0,452 Aa	0,428 Aa	0,473 Aa	0,406 Aa	0,545 Aa
siltito argiloso	0,509 Aa	0,456 Aa	0,471 Aa	0,447 Aa	0,434 Aa	0,409 Ba
NDVI – 300 DAP						
fonolito	0,318 Ba	0,346 Aa	0,427 Aa	0,339 Aa	0,447 Aa	0,368 Aa
siltito argiloso	0,433 Aa	0,348 Aa	0,433 Aa	0,372 Aa	0,447 Aa	0,377 Aa
NDVI – 354 DAP						
fonolito	0,391 Aa	0,434 Aa	0,427 Aa	0,504 Aa	0,381 Aa	0,421 Aa
siltito argiloso	0,417 Aa	0,430 Aa	0,512 Aa	0,402 Aa	0,478 Aa	0,460 Aa
NDVI – 423 DAP						
fonolito	0,597 Aa	0,608 Aa	0,570 Aa	0,579 Aa	0,606 Aa	0,609 Aa
siltito argiloso	0,600 Aa	0,599 Aa	0,580 Aa	0,586 Aa	0,618 Aa	0,557 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 29. Valores médios do GNIR coletado pelo espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
GNIR – 57 DAP						
fonolito	0,363 Aa	0,341 Ab	0,353 Aa	0,361 Aa	0,361 Aa	0,337 Ab
siltito argiloso	0,347 Aa	0,374 Aa	0,352 Aa	0,343 Aa	0,352 Aa	0,369 Aa
GNIR – 120 DAP						
fonolito	0,372 Aa	0,372 Aa	0,375 Aa	0,395 Aa	0,368 Aa	0,366 Aa
siltito argiloso	0,346 Aa	0,372 Aa	0,362 Aa	0,379 Aa	0,382 Aa	0,369 Aa
GNIR – 150 DAP						
fonolito	0,389 Aa	0,382 Aa	0,358 Aa	0,396 Aa	0,401 Aa	0,403 Aa
siltito argiloso	0,379 Aa	0,392 Aa	0,374 Aa	0,377 Aa	0,387 Aa	0,377 Aa
GNIR – 210 DAP						
fonolito	0,300 Aa	0,319 Aa	0,319 Aa	0,330 Aa	0,326 Aa	0,296 Aa
siltito argiloso	0,283 Aa	0,290 Aa	0,292 Aa	0,293 Ab	0,305 Aa	0,315 Aa
GNIR – 254 DAP						
fonolito	0,421 Aa	0,465 Aa	0,458 Aa	0,431 Aa	0,483 Aa	0,360 Ba
siltito argiloso	0,389 Aa	0,437 Aa	0,418 Aa	0,444 Aa	0,452 Aa	0,479 Aa
GNIR – 300 DAP						
fonolito	0,500 Aa	0,446 Aa	0,408 Aa	0,482 Aa	0,381 Aa	0,437 Aa
siltito argiloso	0,362 Ba	0,472 Aa	0,402 Aa	0,426 Aa	0,370 Aa	0,419 Aa
GNIR – 354 DAP						
fonolito	0,436 Aa	0,352 Aa	0,412 Aa	0,353 Aa	0,432 Aa	0,413 Aa
siltito argiloso	0,401 Aa	0,389 Aa	0,357 Aa	0,404 Aa	0,362 Aa	0,387 Aa
GNIR – 423 DAP						
fonolito	0,312 Aa	0,301 Aa	0,333 Aa	0,330 Aa	0,312 Aa	0,302 Aa
siltito argiloso	0,313 Aa	0,312 Aa	0,333 Aa	0,319 Aa	0,300 Aa	0,350 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 30. Valores médios do RNIR coletado pelo espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
RNIR – 57 DAP						
fonolito	0,326 Aa	0,305 Ab	0,325 Aa	0,328 Aa	0,328 Aa	0,296 Ab
siltito argiloso	0,306 Aa	0,334 Aa	0,321 Aa	0,313 Aa	0,318 Aa	0,340 Aa
RNIR – 120 DAP						
fonolito	0,326 Aa	0,326 Aa	0,327 Aa	0,354 Aa	0,326 Aa	0,325 Aa
siltito argiloso	0,300 Aa	0,328 Aa	0,320 Aa	0,341 Aa	0,340 Aa	0,328 Aa
RNIR – 150 DAP						
fonolito	0,347 Aa	0,343 Aa	0,315 Aa	0,358 Aa	0,361 Aa	0,364 Aa
siltito argiloso	0,336 Aa	0,353 Aa	0,336 Aa	0,336 Aa	0,348 Aa	0,334 Aa
RNIR – 210 DAP						
fonolito	0,245 Aa	0,266 Aa	0,265 Aa	0,268 Aa	0,274 Aa	0,239 Aa
siltito argiloso	0,232 Aa	0,236 Aa	0,234 Aa	0,241 Aa	0,247 Aa	0,260 Aa
RNIR – 254 DAP						
fonolito	0,369 Aa	0,409 Aa	0,408 Aa	0,363 Aa	0,432 Aa	0,297 Ba
siltito argiloso	0,329 Aa	0,380 Aa	0,364 Aa	0,388 Aa	0,403 Aa	0,428 Aa
RNIR – 300 DAP						
fonolito	0,524 Aa	0,488 Aa	0,403 Aa	0,495 Aa	0,384 Aa	0,465 Aa
siltito argiloso	0,397 Ba	0,486 Aa	0,400 Aa	0,458 Aa	0,383 Aa	0,454 Aa
RNIR – 354 DAP						
fonolito	0,443 Aa	0,399 Aa	0,405 Aa	0,330 Aa	0,449 Aa	0,417 Aa
siltito argiloso	0,412 Aa	0,402 Aa	0,330 Aa	0,432 Aa	0,359 Aa	0,374 Aa
RNIR – 423 DAP						
fonolito	0,255 Aa	0,244 Aa	0,275 Aa	0,268 Aa	0,246 Aa	0,244 Aa
siltito argiloso	0,250 Aa	0,251 Aa	0,267 Aa	0,261 Aa	0,236 Aa	0,289 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 31. Valores médios do RVI coletado pelo espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
RVI – 57 DAP						
fonolito	3,075 Aa	3,278 Aa	3,090 Aa	3,056 Aa	3,054 Aa	3,415 Aa
siltito argiloso	3,278 Aa	3,000 Ab	3,123 Aa	3,216 Aa	3,147 Aa	2,951 Ab
RVI – 120 DAP						
fonolito	3,082 Aa	3,075 Aa	3,069 Aa	2,830 Aa	3,088 Aa	3,097 Aa
siltito argiloso	3,354 Aa	3,066 Aa	3,139 Aa	3,054 Aa	2,982 Aa	3,053 Aa
RVI – 150 DAP						
fonolito	2,892 Aa	2,927 Aa	3,189 Aa	2,816 Aa	2,792 Aa	2,761 Aa
siltito argiloso	2,980 Aa	2,838 Aa	2,981 Aa	2,976 Aa	2,872 Aa	3,000 Aa
RVI – 210 DAP						
fonolito	4,102 Aa	3,850 Aa	3,846 Aa	3,759 Aa	3,712 Aa	4,184 Aa
siltito argiloso	4,294 Aa	4,238 Aa	4,297 Aa	4,168 Aa	4,064 Aa	3,919 Aa
RVI – 254 DAP						
fonolito	3,008 Aa	2,578 Aa	2,628 Aa	2,929 Aa	2,583 Aa	3,521 Aa
siltito argiloso	3,174 Aa	2,786 Aa	2,910 Aa	2,731 Aa	2,682 Aa	2,506 Ba
RVI – 300 DAP						
fonolito	1,974 Ba	2,080 Aa	2,525 Aa	2,030 Aa	2,645 Aa	2,196 Aa
siltito argiloso	2,542 Aa	2,085 Aa	2,588 Aa	2,187 Aa	2,629 Aa	2,239 Aa
RVI – 354 DAP						
fonolito	2,366 Aa	2,615 Aa	2,541 Aa	3,052 Aa	2,244 Aa	2,629 Aa
siltito argiloso	2,446 Aa	2,573 Aa	3,283 Aa	2,424 Aa	2,982 Aa	2,793 Aa
RVI – 423 DAP						
fonolito	4,080 Aa	4,103 Aa	3,679 Aa	3,835 Aa	4,093 Aa	4,139 Aa
siltito argiloso	4,036 Aa	4,005 Aa	3,801 Aa	3,859 Aa	4,240 Aa	3,663 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 32. Valores médios do GRVI coletado pelo espectroradiômetro Vis-NIR-SWIR ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
GRVI – 57 DAP						
fonolito	2,764 Aa	2,941 Aa	2,839 Aa	2,775 Aa	2,783 Aa	2,992 Aa
siltito argiloso	2,885 Aa	2,679 Ab	2,841 Aa	2,918 Aa	2,843 Aa	2,720 Ab
GRVI – 120 DAP						
fonolito	2,700 Aa	2,693 Aa	2,673 Aa	2,540 Aa	2,728 Aa	2,741 Aa
siltito argiloso	2,903 Aa	2,698 Aa	2,770 Aa	2,637 Aa	2,642 Aa	2,713 Aa
GRVI – 150 DAP						
fonolito	2,580 Aa	2,626 Aa	2,797 Aa	2,535 Aa	2,510 Aa	2,490 Aa
siltito argiloso	2,640 Aa	2,559 Aa	2,672 Aa	2,655 Aa	2,586 Aa	2,656 Aa
GRVI – 210 DAP						
fonolito	3,355 Aa	3,187 Aa	3,190 Aa	3,038 Ab	3,096 Aa	3,384 Aa
siltito argiloso	3,537 Aa	3,453 Aa	3,452 Aa	3,428 Aa	3,294 Aa	3,214 Aa
GRVI – 254 DAP						
fonolito	2,546 Aa	2,218 Aa	2,282 Aa	2,400 Aa	2,241 Aa	2,863 Aa
siltito argiloso	2,645 Aa	2,368 Aa	2,478 Aa	2,318 Aa	2,313 Aa	2,178 Ba
GRVI – 300 DAP						
fonolito	2,092 Ba	2,412 Aa	2,458 Aa	2,079 Aa	2,648 Aa	2,357 Aa
siltito argiloso	2,796 Aa	2,148 Aa	2,589 Aa	2,360 Aa	2,719 Aa	2,409 Aa
GRVI – 354 DAP						
fonolito	2,341 Aa	2,907 Aa	2,434 Aa	2,835 Aa	2,317 Aa	2,540 Aa
siltito argiloso	2,533 Aa	2,588 Aa	2,966 Aa	2,584 Aa	2,864 Aa	2,633 Aa
GRVI – 423 DAP						
fonolito	3,314 Aa	3,324 Aa	3,022 Aa	3,093 Aa	3,219 Aa	3,333 Aa
siltito argiloso	3,228 Aa	3,215 Aa	3,036 Aa	3,142 Aa	3,343 Aa	2,959 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 33. Valores médios do NDVI obtidos por sensores multiespectrais embarcados em VANT ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
NDVI – 57 DAP						
fonolito	0,611 Aa	0,619 Aa	0,589 Aa	0,611 Aa	0,609 Aa	0,596 Ab
siltito argiloso	0,599 Aa	0,596 Aa	0,559 Aa	0,592 Aa	0,598 Aa	0,660 Aa
NDVI – 120 DAP						
fonolito	0,772 Aa	0,782 Aa	0,776 Aa	0,782 Aa	0,797 Aa	0,780 Aa
siltito argiloso	0,770 Aa	0,758 Aa	0,783 Aa	0,800 Aa	0,778 Aa	0,797 Aa
NDVI – 150 DAP						
fonolito	0,708 Aa	0,694 Aa	0,685 Aa	0,719 Aa	0,744 Aa	0,728 Aa
siltito argiloso	0,742 Aa	0,687 Aa	0,707 Aa	0,702 Aa	0,731 Aa	0,720 Aa
NDVI – 210 DAP						
fonolito	0,828 Aa	0,822 Aa	0,822 Aa	0,823 Aa	0,839 Aa	0,824 Aa
siltito argiloso	0,837 Aa	0,828 Aa	0,822 Aa	0,822 Aa	0,825 Aa	0,826 Aa
NDVI – 254 DAP						
fonolito	0,761 Ba	0,815 Aa	0,815 Aa	0,815 Aa	0,833 Aa	0,817 Aa
siltito argiloso	0,830 Aa	0,821 Aa	0,814 Aa	0,814 Aa	0,817 Aa	0,819 Aa
NDVI – 300 DAP						
fonolito	0,846 Aa	0,839 Aa	0,838 Aa	0,834 Aa	0,854 Aa	0,843 Aa
siltito argiloso	0,847 Aa	0,837 Aa	0,826 Ba	0,833 Aa	0,843 Aa	0,840 Aa
NDVI – 354 DAP						
fonolito	0,792 Aa	0,847 Aa	0,841 Aa	0,833 Aa	0,856 Aa	0,838 Aa
siltito argiloso	0,767 Ba	0,845 Aa	0,837 ABa	0,833 ABa	0,848 Aa	0,815 ABa
NDVI – 423 DAP						
fonolito	0,663 Aa	0,619 Aa	0,651 Aa	0,649 Aa	0,694 Aa	0,669 Aa
siltito argiloso	0,641 Aa	0,627 Aa	0,644 Aa	0,648 Aa	0,678 Aa	0,628 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 34. Valores médios do GNIR obtidos por sensores multiespectrais embarcados em VANT ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
GNIR – 57 DAP						
fonolito	0,179 Aa	0,191 Aa	0,189 Aa	0,186 Aa	0,183 Aa	0,184 Aa
siltito argiloso	0,199 Aa	0,195 Aa	0,203 Aa	0,193 Aa	0,195 Aa	0,154 Ab
GNIR – 120 DAP						
fonolito	0,150 Aa	0,140 Aa	0,141 Aa	0,132 Aa	0,141 Aa	0,139 Aa
siltito argiloso	0,145 Aa	0,149 Aa	0,139 Aa	0,124 Aa	0,134 Aa	0,125 Aa
GNIR – 150 DAP						
fonolito	0,206 Aa	0,214 Aa	0,227 Aa	0,193 Aa	0,191 Aa	0,197 Aa
siltito argiloso	0,196 Aa	0,220 Aa	0,214 Aa	0,212 Aa	0,191 Aa	0,205 Aa
GNIR – 210 DAP						
fonolito	0,075 Aa	0,079 Aa	0,080 Aa	0,078 Aa	0,072 Aa	0,076 Aa
siltito argiloso	0,073 Aa	0,077 Aa	0,080 Aa	0,079 Aa	0,077 Aa	0,076 Aa
GNIR – 254 DAP						
fonolito	0,104 Aa	0,077 Aa	0,078 Aa	0,077 Aa	0,071 Aa	0,075 Aa
siltito argiloso	0,072 Ba	0,076 Aa	0,078 Aa	0,077 Aa	0,075 Aa	0,075 Aa
GNIR – 300 DAP						
fonolito	0,058 Aa	0,058 Aa	0,061 Aa	0,061 Aa	0,054 Aa	0,058 Aa
siltito argiloso	0,057 Aa	0,060 Aa	0,063 Aa	0,062 Aa	0,057 Aa	0,058 Aa
GNIR – 354 DAP						
fonolito	0,120 Aa	0,086 Aa	0,088 Aa	0,094 Aa	0,078 Aa	0,089 Aa
siltito argiloso	0,131 Aa	0,089 ABa	0,090 ABa	0,091 ABa	0,082 Ba	0,101 ABa
GNIR – 423 DAP						
fonolito	0,091 Aa	0,108 Aa	0,107 Aa	0,107 Aa	0,091 Aa	0,102 Aa
siltito argiloso	0,101 Aa	0,112 Aa	0,108 Aa	0,109 Aa	0,096 Aa	0,109 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 35. Valores médios do RNIR obtidos por sensores multiespectrais embarcados em VANT ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
RNIR – 57 DAP						
fonolito	0,242 Aa	0,236 Aa	0,259 Aa	0,242 Aa	0,245 Aa	0,253 Aa
siltito argiloso	0,253 Aa	0,254 Aa	0,283 Aa	0,257 Aa	0,254 Aa	0,205 Ab
RNIR – 120 DAP						
fonolito	0,129 Aa	0,123 Aa	0,126 Aa	0,123 Aa	0,113 Aa	0,124 Aa
siltito argiloso	0,130 Aa	0,140 Aa	0,122 Aa	0,111 Aa	0,125 Aa	0,113 Aa
RNIR – 150 DAP						
fonolito	0,172 Aa	0,182 Aa	0,188 Aa	0,163 Aa	0,147 Aa	0,158 Aa
siltito argiloso	0,148 Aa	0,187 Aa	0,172 Aa	0,176 Aa	0,155 Aa	0,163 Aa
RNIR – 210 DAP						
fonolito	0,094 Aa	0,098 Aa	0,098 Aa	0,097 Aa	0,087 Aa	0,096 Aa
siltito argiloso	0,088 Aa	0,094 Aa	0,098 Aa	0,098 Aa	0,096 Aa	0,096 Aa
RNIR – 254 DAP						
fonolito	0,139 Aa	0,103 Aa	0,102 Aa	0,102 Aa	0,091 Aa	0,101 Aa
siltito argiloso	0,093 Ba	0,099 Aa	0,102 Aa	0,103 Aa	0,101 Aa	0,100 Aa
RNIR – 300 DAP						
fonolito	0,083 Aa	0,087 Aa	0,088 Ba	0,090 Aa	0,078 Aa	0,085 Aa
siltito argiloso	0,083 Aa	0,089 Aa	0,096 Aa	0,091 Aa	0,086 Aa	0,087 Aa
RNIR – 354 DAP						
fonolito	0,117 Aa	0,083 Aa	0,087 Aa	0,091 Aa	0,078 Aa	0,088 Aa
siltito argiloso	0,133 Aa	0,084 ABa	0,089 ABa	0,091 ABa	0,082 Ba	0,102 ABa
RNIR – 423 DAP						
fonolito	0,203 Aa	0,237 Aa	0,213 Aa	0,213 Aa	0,181 Aa	0,199 Aa
siltito argiloso	0,221 Aa	0,230 Aa	0,216 Aa	0,214 Aa	0,192 Aa	0,229 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 36. Valores médios do RVI obtidos por sensores multiespectrais embarcados em VANT ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
RVI – 57 DAP						
fonolito	4,246 Aa	4,339 Aa	3,863 Aa	4,185 Aa	4,208 Aa	3,962 Ab
siltito argiloso	4,182 ABa	3,958 ABa	3,583 Ba	3,940 ABa	4,113 ABa	4,931 Aa
RVI – 120 DAP						
fonolito	8,244 Aa	8,650 Aa	7,954 Aa	8,353 Aa	8,907 Aa	8,405 Aa
siltito argiloso	7,802 Aa	8,202 Aa	8,231 Aa	9,119 Aa	8,200 Aa	8,950 Aa
RVI – 150 DAP						
fonolito	6,030 Aa	5,769 Aa	5,509 Aa	6,162 Aa	6,848 Aa	6,489 Aa
siltito argiloso	6,746 Aa	5,668 Aa	5,926 Aa	5,802 Aa	6,454 Aa	6,244 Aa
RVI – 210 DAP						
fonolito	10,793 Aa	10,613 Aa	10,398 Aa	10,488 Aa	11,481 Aa	10,663 Aa
siltito argiloso	11,397 Aa	10,862 Aa	10,433 Aa	10,452 Aa	10,446 Aa	10,827 Aa
RVI – 254 DAP						
fonolito	8,606 Ba	10,134 Aa	9,923 Aa	10,012 Aa	10,970 Aa	10,178 Aa
siltito argiloso	10,889 Aa	10,372 Aa	9,960 Aa	9,978 Aa	9,965 Aa	10,342 Aa
RVI – 300 DAP						
fonolito	12,064 Aa	11,647 Aa	11,685 Aa	11,092 Aa	12,718 Aa	11,953 Aa
siltito argiloso	12,140 Aa	11,647 Aa	10,726 Ba	11,071 Aa	11,831 Aa	11,669 Aa
RVI – 354 DAP						
fonolito	9,386 Aa	12,723 Aa	12,191 Aa	11,307 Aa	13,065 Aa	11,572 Aa
siltito argiloso	8,305 Aa	12,164 Aa	11,607 Aa	11,186 Aa	12,295 Aa	10,112 Aa
RVI – 423 DAP						
fonolito	4,944 Aa	4,447 Aa	4,823 Aa	4,725 Aa	5,559 Aa	5,081 Aa
siltito argiloso	4,706 Aa	4,425 Aa	4,629 Aa	4,683 Aa	5,220 Aa	4,405 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 37. Valores médios do GRVI obtidos por sensores multiespectrais embarcados em VANT ao longo do cultivo da cana-de-açúcar (ciclo planta).

Subparcela	Parcela					
	testemunha	calcário	ritmito	calcário + ritmito	calcário + gesso	calcário + fidagran
GRVI – 57 DAP						
fonolito	5,682 Aa	5,308 Aa	5,307 Aa	5,468 Aa	5,909 Aa	5,444 Ab
siltito argiloso	5,225 Aa	5,147 Aa	4,942 Aa	5,274 Aa	5,363 Aa	6,613 Aa
GRVI – 120 DAP						
fonolito	6,682 Aa	7,225 Aa	7,159 Aa	7,580 Aa	7,321 Aa	7,305 Aa
siltito argiloso	6,928 Aa	7,065 Aa	7,192 Aa	8,145 Aa	7,677 Aa	7,981 Aa
GRVI – 150 DAP						
fonolito	4,881 Aa	4,843 Aa	4,475 Aa	5,182 Aa	5,257 Aa	5,162 Aa
siltito argiloso	5,133 Aa	4,688 Aa	4,706 Aa	4,733 Aa	5,279 Aa	4,961 Aa
GRVI – 210 DAP						
fonolito	13,794 Aa	13,142 Aa	12,637 Aa	12,853 Aa	13,062 Aa	13,367 Aa
siltito argiloso	13,463 Aa	12,901 Aa	12,615 Aa	12,850 Aa	13,884 Aa	13,241 Aa
GRVI – 254 DAP						
fonolito	11,447 Ba	13,144 Aa	12,855 Aa	13,093 Aa	14,142 Aa	13,490 Aa
siltito argiloso	14,051 Aa	13,389 Aa	12,876 Aa	13,096 Aa	13,310 Aa	13,615 Aa
GRVI – 300 DAP						
fonolito	17,500 Aa	17,401 Aa	16,798 Aa	16,517 Aa	18,536 Aa	17,295 Aa
siltito argiloso	17,801 Aa	17,187 Aa	16,067 Aa	16,174 Aa	17,614 Aa	17,220 Aa
GRVI – 354 DAP						
fonolito	9,082 Aa	12,400 Aa	11,845 Aa	11,084 Aa	13,057 Aa	11,328 Aa
siltito argiloso	8,315 Aa	11,569 Aa	11,296 Aa	11,215 Aa	12,311 Aa	10,250 Aa
GRVI – 423 DAP						
fonolito	11,074 Aa	9,927 Aa	9,506 Aa	9,425 Aa	11,001 Aa	9,982 Aa
siltito argiloso	10,406 Aa	9,091 Aa	9,283 Aa	9,225 Aa	10,362 Aa	9,293 Aa

\*Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na linha (fator primário) e minúscula na coluna (fator secundário), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 38. Parâmetros tecnológicos aos 364 DAR da cultura da cana-de-açúcar (ciclo soca) submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K.

Subparcela	Parcela					
	Testemunha	Calcário	Ritmito	Calcário + Ritmito	Calcário + Gesso	Calcário + Fidagran
POL (caldo)						
Ekosil	16,01 Aa	16,13 Aa	16,42 Aa	16,44 Aa	16,54 Aa	16,41 Aa
FC	16,04 Aa	16,37 Aa	16,40 Aa	16,37 Aa	16,23 Aa	16,30 Aa
Pureza (caldo)						
Ekosil	87,33 ABa	86,00 Ba	87,33 ABa	88,00 ABa	88,33 Aa	87,67 ABa
FC	86,33 Aa	87,33 Aa	87,00 Aa	87,00 Aa	87,67 Aa	88,00 Aa
Açúcar redutor						
Ekosil	0,61 ABa	0,66 Aa	0,61 ABa	0,59 ABa	0,58 Ba	0,60 ABa
FC	0,65 Aa	0,61 Aa	0,63 Aa	0,63 Aa	0,60 Aa	0,59 Aa
Fibra (cana)						
Ekosil	12,97 Aa	12,94 Aa	12,87 Ab	12,98 Aa	12,99 Aa	12,98 Aa
FC	12,89 Ba	12,89 Ba	13,00 ABa	12,98 ABa	13,06 Aa	12,98 ABa
POL (cana)						
Ekosil	13,32 Aa	13,42 Aa	13,68 Aa	13,67 Aa	13,75 Aa	13,65 Aa
FC	13,36 Aa	13,64 Aa	13,64 Aa	13,62 Aa	13,48 Aa	13,56 Aa
ATR						
Ekosil	131,33 Ba	132,67 ABa	134,77 ABa	134,47 ABb	135,17 Aa	134,37 ABa
FC	132,00 Aa	134,37 Ab	134,43 Aa	134,23 Aa	132,80 Aa	133,43 Aa
BRIX (cana)						
Ekosil	15,82 Ba	16,18 ABa	16,26 Aa	16,12 ABa	16,14 ABa	16,15 ABa
FC	16,05 Aa	16,16 Aa	16,28 Aa	16,21 Aa	15,97 Aa	16,01 Aa

\* Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 39. Valores médios de atributos químicos do solo na profundidade 0-20 cm 364 DAR da cultura da cana-de-açúcar (ciclo soca) submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K.

Subparcela	Parcela					
	Testemunha	Calcário	Ritmito	Calcário + Ritmito	Calcário + Gesso	Calcário + Fidagran
pH (CaCl <sub>2</sub> )						
Ekosil	4,98 Ba	5,63 ABa	5,83 Aa	6,20 Aa	5,58 ABa	6,05 Aa
FC	4,95 Ba	5,80 Aa	5,95 Aa	6,18 Aa	5,55 ABa	6,08 Aa
P - resina (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	13,50 Aa	20,00 Aa	37,35 Aa	25,00 Aa	44,75 Aa	17,90 Aa
FC	11,50 Aa	13,75 Aa	22,90 Aa	27,50 Aa	22,75 Aa	33,00 Aa
K <sup>+</sup> - resina (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	0,06 ABa	0,05 Ba	0,11 Aa	0,05 Ba	0,07 ABa	0,09 ABa
FC	0,03 Aa	0,03 Aa	0,04 Ab	0,03 Aa	0,05 Aa	0,04 Ab
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	0,93 Ca	1,15 BCa	1,58 BCa	1,73 BCa	1,78 ABa	2,58 Aa
FC	1,05 Ba	1,20 Ba	1,55 Ba	1,73 ABa	1,78 ABa	2,45 Aa
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	0,53 BCa	0,83 ABa	1,10 Aa	1,20 Aa	0,45 BCa	0,38 Ca
FC	0,60 BCa	0,88 ABCa	0,98 ABa	1,28 Aa	0,48 Ca	0,68 BCa
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	9,75 B	10,00 B	12,00 B	11,50 B	15,00 Bb	23,25 Aa
FC	9,50 B	8,75 B	13,75 AB	12,00 B	20,00 Aa	14,00 ABb
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	0,55 Aa	0,63 Aa	0,55 Aa	0,55 Aa	0,48 Aa	0,53 Aa
FC	0,73 Aa	0,58 Aa	0,50 Aa	0,55 Aa	0,65 Aa	0,63 Aa
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	15,00 Aa	8,50 Ba	9,75 Ba	8,75 Ba	10,75 Ba	7,75 Ba
FC	16,50 Aa	7,50 Ca	10,25 BCa	7,25 Ca	11,75 Ba	8,25 BCa
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	18,48 Aa	12,78 Aa	13,63 Aa	14,13 Aa	14,00 Aa	13,60 Aa
FC	18,88 Aa	12,68 Ba	13,98 ABa	13,15 ABa	14,25 ABa	13,80 ABa
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	1,90 Aa	0,88 ABa	0,53 Ba	0,90 ABa	0,65 Ba	0,88 ABa
FC	0,53 Ab	0,63 Aa	0,70 Aa	0,58 Aa	0,58 Aa	0,88 Aa
Si - solúvel (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	3,41 Aa	3,85 Aa	3,24 Aa	4,03 Aa	3,32 Aa	4,16 Aa
FC	3,43 Aa	3,41 Aa	3,27 Aa	3,29 Aa	3,39 Aa	3,58 Aa

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 40. Valores médios de atributos químicos do solo na profundidade 20-40 cm 364 DAR da cultura da cana-de-açúcar (ciclo soca) submetida a aplicação de insumos fontes de Ca, Mg, S e K.

Subparcela	Parcela					
	Testemunha	Calcário	Ritmito	Calcário + Ritmito	Calcário + Gesso	Calcário + Fidagran
pH (CaCl <sub>2</sub> )						
Ekosil	4,93 C	5,43 BC	5,88 AB	6,25 A	5,45 B	6,03 A
FC	4,83 C	5,40 B	6,00 A	6,00 A	5,38 B	5,78 AB
P - resina (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	66,85 Aa	80,75 Aa	91,68 Aa	51,80 Aa	133,25 Aa	99,75 Aa
FC	62,00 Aa	87,50 Aa	73,65 Aa	45,75 Aa	95,25 Aa	89,50 Aa
K <sup>+</sup> - resina (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	0,04 Ba	0,06 Ba	0,05 Ba	0,07 ABa	0,10 Aa	0,06 Ba
FC	0,03 Aa	0,03 Ab	0,03 Aa	0,02 Ab	0,03 Ab	0,03 Ab
Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	1,35 Ba	1,40 ABa	1,75 ABa	1,98 ABa	1,35 Ba	2,15 Aa
FC	1,40 Ba	1,78 ABa	2,05 ABa	1,60 ABa	1,78 ABa	2,23 Aa
Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	0,35 Ba	0,55 Ba	1,05 Ab	1,20 Aa	0,30 Ba	0,35 Bb
FC	0,53 BCa	0,80 Ba	1,33 Aa	1,15 Aa	0,45 Ca	0,70 BCa
S-SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	8,50 Aa	8,00 Aa	8,75 Aa	8,25 Aa	12,00 Aa	13,50 Aa
FC	7,25 Ba	7,25 Ba	8,00 Ba	9,00 Ba	17,50 Aa	8,50 Ba
Cu (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	0,98 Aa	0,80 Aa	0,70 Aa	0,78 Aa	0,68 Aa	0,65 Aa
FC	0,90 Aa	0,68 Aa	1,00 Aa	0,90 Aa	0,93 Aa	0,78 Aa
Fe (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	15,00 Aa	12,00 ABa	9,00 Ba	7,25 Ba	11,75 ABa	8,00 Ba
FC	17,50 Aa	11,00 BCa	8,00 Ca	8,75 Ca	14,25 ABa	7,75 Ca
Mn (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	13,25 Aa	10,75 Aa	8,90 Aa	9,15 Aa	12,73 Aa	9,18 Aa
FC	15,25 Aa	10,53 ABa	8,08 Ba	8,05 Ba	11,65 ABa	8,50 Ba
Zn (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	0,50 Aa	0,68 Aa	0,50 Aa	0,40 Aa	0,50 Aa	0,40 Aa
FC	0,55 Aa	0,50 Aa	0,30 Aa	0,30 Aa	0,43 Aa	0,25 Aa
Si - solúvel (mg dm <sup>-3</sup> )						
Ekosil	3,58 Aa	3,58 Aa	3,27 Aa	3,61 Aa	3,66 Aa	3,94 Aa
FC	3,08 Aa	3,08 Aa	2,88 Aa	2,63 Aa	3,05 Aa	3,30 Aa

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula na coluna e minúscula na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.