



Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente



---

LARISSA RUAS GALDEANO

**FERTILIDADE E MINERALOGIA DO SOLO SUJEITO À  
DISPOSIÇÃO DE VINHAÇA DE UMA FAZENDA EM SANTA  
CRUZ DAS PALMEIRAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Coorientador: Prof. Dr. Guillermo Rafael Beltran Navarro

Rio Claro - SP

2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

LARISSA RUAS GALDEANO

FERTILIDADE E MINERALOGIA DO SOLO SUJEITO À  
DISPOSIÇÃO DE VINHAÇA DE UMA FAZENDA EM  
SANTA CRUZ DAS PALMEIRAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Coorientador: Prof. Dr. Guillermo Rafael Beltran Navarro

Rio Claro - SP

2019

G149f

Galdeano, Larissa Ruas

Fertilidade e mineralogia do solo sujeito à disposição de vinhaça de uma fazenda em Santa Cruz das Palmeiras / Larissa Ruas Galdeano. -- Rio Claro, 2019

104 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Marcelo Loureiro Garcia

Coorientador: Guillermo Rafael Beltran Navarro

1. Propriedades químicas e físicas do solo. 2. Fertilidade de solos. 3. Vinhaça. 4. Análise mineralógica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

LARISSA RUAS GALDEANO

ANÁLISE QUÍMICA, MINERALÓGICA E DA FERTILIDADE  
DE SOLOS SUJEITOS À DISPOSIÇÃO DE VINHAÇA.<sup>1</sup>

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof..Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Dr. João Gabriel Thomaz Queluz

Dr. Lucas Tadeu Fuess

Prof. Dr, Dagoberto Yukio Okada

Prof. Dr. Antenor Zanardo

Rio Claro, SP 26 de Abril de 2019.

Conceito: Aprovada

---

<sup>1</sup> Mudança de título para “FERTILIDADE E MINERALOGIA DO SOLO SUJEITO À DISPOSIÇÃO DE VINHAÇA DE UMA FAZENDA EM SANTA CRUZ DAS PALMEIRAS”

*Às vítimas de Brumadinho,  
Que Deus os acolha em seus braços e tenham a paz que merecem.*

*“Minas não tem mar,  
Mas fizeram dois mares de lama nas minas.  
Cadê minha casa que estava aqui?  
Cadê meu boi, meu cavalo?  
Cadê meu cachorro?  
Cadê meu pé de mamão?  
Meu carrinho de mão?  
Cadê meu pé de limão?  
Cadê meus livros?  
Cadê meu arroz, feijão?  
Cadê meu colchão?  
Cadê meu pai, minha mãe, meus irmãos?  
A lama levou....  
A lama levou minha vida  
Meus sonhos,  
Meu porto seguro,  
Meu chão.  
Não foi a lama não,  
Foi o homem que fez a lama, que jogou Mariana e Brumadinho no chão.  
Tingiu de marrom as águas do meu Rio Doce,  
Coloriu de terra meu Paraopeba,  
Vai tingir meu Velho Chico.  
Vai calar a voz dos passarinhos,  
Matar os peixes,  
Que será de mim?  
Quem devolverá tudo que levaram de mim?”*

(Autor Desconhecido)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu agradeço a Deus, não apenas pelos momentos em que quase perdi minha saúde física e mental como também poupou a mim e a minha família de sermos atingidos pela tragédia de Brumadinho. Se não fosse por ele, eu não estaria mais aqui e essa dissertação nunca teria sido finalizada.

Gostaria de agradecer imensamente ao meu orientador o Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia, pela sua paciência, orientação e por ter me colocado no caminho certo quando a minha pesquisa não estava indo em uma boa direção.

Gostaria de agradecer o meu coorientador o Prof. Dr. Guillermo Rafael Beltran Navarro e ao Prof. Dr. Antenor Zanardo por me instruírem na parte das análises das amostras de solo coletados.

Expresso minha gratidão ao encarregado do setor de Meio Ambiente e Qualidade da usina sucroalcooleira Marcelo Santos Pádua Diniz, primeiro por ter nos deixado fazer a pesquisa com os dados desta usina e por ter nos recebido no campo de coleta das amostras.

Agradeço ao Alan de Oliveira e ao Henrique Bazzo Martins por terem participado e auxiliado no trabalho de campo de amostragem e aos técnicos administrativos Fábio de Oliveira Thomazini e Vladimir Barbosa Júnior pela ajuda na análise granulométrica e pela realização dos ensaios de FRX das amostras.

Queria agradecer imensamente a minha querida amiga Cibele Montibeller, que não apenas participou do campo de amostragem e fez as análises de DRX, como também me orientou em praticamente todo o desenvolvimento das análises das amostras, sentou comigo para me ajudar a finalizar a dissertação para a qualificação e me auxiliou muitas vezes mesmo estando ocupada com os trabalhos na UNESP. Se não fosse por sua colaboração eu não teria conseguido fazer essa dissertação amiga.

E finalmente, gostaria de agradecer às pessoas mais importantes da minha vida, os meus pais Marcos Manzano Galdeano e Luzia Alegre Ruas Galdeano e a minha querida irmã Priscila Ruas Galdeano. Deixei de fazer muitas coisas do mestrado para poder ajudá-los nos desafios que tivemos, mas eu faria tudo de novo porque vocês são os maiores amores da minha vida. Obrigada por terem me apoiado quando eu não conseguia mais avançar na dissertação e por toda a orientação, amo muito vocês.

## RESUMO

Com a crescente produção de etanol no Brasil, houve o aumento da geração da vinhaça, que em certas condições pode ser utilizada para a fertirrigação de lavouras de cana-de-açúcar com o intuito de elevar a fertilidade do solo. A pesquisa consistiu na análise temporal e espacial de dados das características químicas e físicas dos solos de uma lavoura de cana-de-açúcar e da vinhaça aplicada, além da análise granulométrica, química e mineralógica de seis amostras de solo coletadas na área de estudo. A partir dos resultados obtidos, observou-se que elevados volumes de vinhaça foram calculados em 2014, sendo que os resultados indicaram baixas condições de fertilidade com altas concentrações de  $H+Al$  e de CTC total. A análise temporal de uma das glebas da fazenda demonstrou que, em dosagens previamente calculadas, a aplicação de vinhaça pode melhorar a fertilidade do solo e promover a redução da acidez e da toxicidade por alumínio. As análises granulométricas, químicas e mineralógicas caracterizaram o latossolo vermelho da área de estudo como um solo arenoso muito fino a médio com altas concentrações de silicatos e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio com minerais de gibbsita, hematita, quartzo e argilominerais do grupo da caulinita. O estudo avaliou a possibilidade de lixiviação dos cátions de base e de concentração de íons  $H^+$  e  $Al^{3+}$  pela hidrólise total e parcial da caulinita e da gibbsita e da decomposição da Matéria Orgânica no período chuvoso, sendo que a fertirrigação repõe a umidade do solo, o fornecimento de macronutrientes e reposição de MO no período de seca. Contudo, outros fatores como as variações climáticas e o tipo de manejo também influenciaram nas variações dos parâmetros de fertilidade do solo além da aplicação de vinhaça, sendo necessária a análise conjunta destes fatores ao planejar a fertirrigação e conseqüentemente aprimorar a produtividade das lavouras de cana-de-açúcar.

**Palavras-chave: Propriedades químicas e físicas do solo, fertilidade de solos, vinhaça, análise mineralógica.**

## ABSTRACT

As the ethanol production has been developing in Brazil, it resulted on the increase of vinasse generation, which under certain conditions can be used for fertirrigation of sugarcane plantations in order to increase soil fertility. The research consisted of temporal and spatial data analysis of chemical and physical characteristics of soils of the soils of a sugar cane yield and the applied vinasse, in addition to the granulometric, chemical and mineralogical analysis of six soil samples collected in the research area. From the results obtained, it was observed that high volumes of vinasse were calculated in 2014, as the results had also indicated low fertility conditions with high concentrations of  $H^+Al$  and total CEC. The temporal analysis of the plot 15 demonstrated that, in controlled doses, the application of vinasse can improve soil fertility and promote reduction of acidity and toxicity by aluminum. The granulometric, chemical and mineralogical analyzes characterize the red latosol of the research area as a very fine to medium sandy soil with high concentrations of silicates and oxides and hydroxides of iron and aluminum with minerals of gibbsite, hematite, quartz and clay minerals of the kaolinite group. The research evaluated the possibility of leaching of base cations and concentration of  $H^+$  and  $Al^{3+}$  ions by total and partial hydrolysis of kaolinite and decomposition of Organic Matter (OM) in rainy season, with soil moisture restoring and reposition of macronutrients and OM by vinasse fertirrigation in dry season. However, other factors such as climatic variations and type of soil management also influenced the variations of soil fertility parameters in addition to the application of vinasse, as the integrated analysis of these factors is required at the moment of fertirrigation planning and to consequently improve the sugarcane productivity.

**Keywords: Chemical and physical properties of soil, soil fertility, vinasse, mineralogical analysis.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Mapa da produção de cana-de-açúcar e das usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil.....	5
Figura 2. Fluxograma da produção de etanol e de açúcar usando cana-de-açúcar como matéria-prima (as setas e as bordas tracejadas representam as águas residuárias e demais resíduos produzidos na planta industrial).....	7
Figura 3. Equipamentos utilizados na Fertirrigação: A) Hidro holl (carretel enrolador); B) Aspensor; C) Rede adutora móvel. ....	10
Figura 4. Tanques de armazenamento de vinhaça da usina sucroalcooleira. ....	12
Figura 5. Estrutura da primeira área de carregamento próxima da indústria: A) Construção do tanque de contenção de derramamentos; B) Plataforma de carregamento; C) Tanque de contenção impermeabilizado com manta de PEAD de 2mm; D) Construção do tanque de contenção de derramamentos.....	13
Figura 6. Estrutura da segunda área de carregamento situada na área agrícola: A) Construção do tanque de contenção de derramamentos; B) Plataforma de carregamento; C) Plataforma de carregamento; D) Vista da Plataforma e tanque de contenção impermeabilizado com manta PEAD de 2 mm.....	14
Figura 7. Tetraedro de silício e oxigênios e folhas de arranjo hexagonal de tetraedros, formando uma folha de siloxana. ....	17
Figura 8. Octaedros de Magnésio, Alumínio ou Ferro e folhas octaédricas em arranjo hexagonal.....	18
Figura 9. (a) folha de brucita com configuração trioctaédrica; (b) folha de gibbsita com configuração dioctaédrica.....	18
Figura 10. Figura esquemática da estrutura T-O dos argilominerais do grupo da caulinita.....	19
Figura 11. Figura esquemática da estrutura T-O-T dos argilominerais do grupo da esmectita e/ou montmorillonita. ....	20
Figura 12. Configuração da estrutura do grupo das cloritas.....	21
Figura 13. Mapa Geológico simplificado da Bacia do Paraná, com referências geográficas e profundidade do embasamento.....	23
Figura 14. Relação entre as unidades estratigráficas do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. ....	24
Figura 15. Mapa geomorfológico da Bacia do Rio Mogi Guaçu. A localização aproximada do município de Santa Cruz das Palmeiras está marcado por um quadrado (□). ....	27

Figura 16. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu no estado de São Paulo. O município de Santa Cruz das Palmeiras está marcado no mapa por um quadrado com fundo verde (■). .....	30
Figura 17. Gráfico das Temperaturas e precipitações médias para o município de Pirassununga do período de 1971 a 1990. ....	32
Figura 18. Gráfico do Balanço Hídrico Normal Mensal do município de Pirassununga e região, com as variações milimétricas de Precipitação, Evapotranspiração Potencial (ETP) e Evapotranspiração Real. ....	35
Figura 19. Extrato do Balanço Hídrico Mensal do município de Pirassununga e região, construído a partir dos dados de Plano de Aplicação de Vinhaça (2017). ....	35
Figura 20. Imagem do Google Earth das três amostragens da Fazenda. ....	39
Figura 21. Coleta das amostras de solo de profundidades de 30 cm e 100 cm no primeiro ponto da Fazenda (P1) usando um trado. ....	40
Figura 22. Identificação dos sacos plásticos com a identificação das amostras, coordenadas e profundidades. ....	40
Figura 23. Coleta da amostra de profundidade de 100 cm no segundo ponto da fazenda (P2) usando um martelinho para desprender o solo do trado para dentro dos sacos plásticos. ....	41
Figura 24. Amostragem de perfil de solo de profundidade de 30 cm no terceiro ponto da Fazenda (P3). ....	41
Figura 25. Desagregação de torrões de solo com o auxílio de um almofariz e um pistilo. ....	42
Figura 26. Pesagem de 100g de amostras de solo usando um Béquer em uma balança de precisão. ....	43
Figura 27. Peneiramento das amostras de solo usando um agitador de peneiras. ....	44
Figura 28. Disposição da amostra de solo na pastilha prensada. ....	46
Figura 29. Pastilhas prensadas das seis amostras de solo da Fazenda da área de estudo. ....	46
Figura 30. Inserção da pastilha com a amostra no difratômetro de Raios-X. ....	47
Figura 31. Dosagens da vinhaça aplicada na Fazenda no ano de 2014. ....	54
Figura 32. Dosagens de vinhaça aplicada na Gleba 15 da Fazenda no período de 2012 a 2017. ....	55
Figura 33. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro de V% (●) no ano de 2014. ....	57
Figura 34. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro de V% (●) analisados na gleba 15 da Fazenda. ....	58

Figura 35. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro dos cátions de base $\text{Ca}^{2+}$ (●), $\text{Mg}^{2+}$ (▲) e $\text{K}^+$ (■) da Fazenda no ano de 2014. ....	60
Figura 36. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro dos cátions de base $\text{Ca}^{2+}$ (●), $\text{Mg}^{2+}$ (▲) e $\text{K}^+$ (■) analisados na gleba 15 da Fazenda. ....	61
Figura 37. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro CTC (■) no ano de 2014. ....	62
Figura 38. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro CTC (■) analisados na gleba 15 da Fazenda. ....	63
Figura 39. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro do pH (●) da Fazenda analisados no ano de 2014. ....	64
Figura 40. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro do pH (●) analisados na gleba 15 da Fazenda. ....	65
Figura 41. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro do cátion $\text{Al}^{3+}$ (■) no ano de 2014. ....	66
Figura 42. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro do cátion $\text{Al}^{3+}$ (■) analisados na gleba 15 da Fazenda. ....	67
Figura 43. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro H + Al (▲) no ano de 2014. ....	68
Figura 44. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro H + Al (▲) analisados na gleba 15 da Fazenda. ....	69
Figura 45. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro de m% (▲) no ano de 2014. ....	70
Figura 46. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro de m% (▲) analisados na gleba 15 da Fazenda. ....	71
Figura 47. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com a MO do solo (x) da Fazenda analisados no ano de 2014. ....	72
Figura 48. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com a MO do solo (x), analisados na gleba 15 da Fazenda. ....	73
Figura 49. Curva granulométrica das seis amostras coletadas da Fazenda. ....	78
Figura 50. Difratoograma da amostra P1-30 cm da Gleba 27. ....	84
Figura 51. Difratoograma da amostra P1-100 cm da Gleba 27. ....	84
Figura 52. Difratoograma da amostra P2-30 cm da Gleba 29. ....	85
Figura 53. Difratoograma da amostra P2- 100 cm da Gleba 29. ....	85
Figura 54. Difratoograma da amostra P3- 30 cm da Gleba 56. ....	86

Figura 55. Difratoograma da amostra P3- 100 cm da Gleba 56.....86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol – Safra 2016/2017. ....	6
Tabela 2. Produção de Etanol Total (Anidro e Hidratado) em milhões de m <sup>3</sup> no estado de São Paulo entre 2012/2013 a 2016/2017. ....	6
Tabela 3. Dados da Capacidade de moagem de cana-de-açúcar diárias, anual e previsão da capacidade anual do período de 2012 a 2017 obtidos através dos PAVs. ....	8
Tabela 4. Dados da Produção de Vinhaça obtidos através dos PAVs de 2012 a 2017. ....	8
Tabela 5. Tanques de armazenamento de vinhaça. ....	11
Tabela 6. Balanço Hídrico mensal de Pirassununga e Região: <i>T</i> , temperatura; <i>P</i> , precipitação; <i>ETP</i> , Evapotranspiração Potencial; <i>P-ETP</i> , diferença da precipitação com a Evapotranspiração Potencial; <i>NEG-AC</i> , Negativo acumulado; <i>ARM</i> , armazenamento de água no solo; <i>ALT</i> , alteração da umidade do solo ; <i>ETR</i> , Evapotranspiração real ou efetiva; <i>DEF</i> , Deficiência Hídrica; <i>EXC</i> , Excedente hídrico. ....	33
Tabela 7. Parâmetros analisados da caracterização físico-química da vinhaça e do solo a partir dos Planos de Aplicação da Vinhaça, de acordo com a Norma Técnica P4.231. ....	37
Tabela 8. Tabela de informações das amostragens da Fazenda. ....	39
Tabela 9. Caracterização físico-química da vinhaça do período de 2012 a 2017 e comparação com os resultados de Fuess (2013). ....	49
Tabela 10. Relação de adsorção de sódio calculada para os resultados de vinhaça de 2012 a 2017. ....	52
Tabela 11. Cálculos das dosagens de Vinhaça da Fazenda do período de 2012 a 2017. ....	53
Tabela 12. Resultados analíticos das propriedades físico-químicas das amostras de solo da Fazenda do período de 2012 a 2017 com suas respectivas glebas e datas de análise, em que: <i>V</i> , Saturação por Bases; <i>m</i> , Saturação por Alumínio; <i>SB</i> , Soma de Bases; <i>CTC</i> , Capacidade de Troca Catiônica; <i>MO</i> , Matéria Orgânica. ....	56
Tabela 13. Número de aplicações de dosagens de vinhaça e classificação dos solos das áreas analisadas por Zolin et al. (2011). ....	75
Tabela 14. Resultados das propriedades físico-químicas das amostras de solo analisados por Zolin et al. (2011) nas profundidades de 20 e 40 cm. ....	75
Tabela 15. Porcentagens das frações granulométricas das seis amostras de solo da Fazenda. ....	78
Tabela 16. Porcentagens das frações granulométricas apresentadas no PAV de 2013 na região de influência da usina sucroalcooleira da área de estudo. ....	79
Tabela 17. Análise granulométrica dos solos analisados por Zolin et al. (2011). ....	80

Tabela 18. Caracterização química dos óxidos (elementos maiores) presentes nas amostras de solo da fazenda de estudo. ....	81
Tabela 19. Caracterização química dos elementos traços das amostras de solo da fazenda de estudo. ....	82
Tabela 20. Composição mineralógica das amostras de solos da fazenda da área de estudo obtidas por meio da DRX, com suas respectivas fórmulas químicas. ....	83
Tabela 21. Comparação das concentrações de elementos menores obtidas na análise química por FRX com os resultados de Figueira et al. (2016). ....	90

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AID:** Área de Influência Direta
- AII:** Área de Influência Indireta
- Al<sup>3+</sup>:** Alumínio
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:** Óxido de alumínio
- Al(OH)<sub>3</sub>:** Gibbsita
- Al<sub>4</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>3</sub>:** Caulinita
- Al<sub>4</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>8</sub>:** Halloysita
- Al<sub>4</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>12</sub>.3H<sub>2</sub>O:** Dickita
- Al<sub>4</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>8</sub>:** Nacrita
- ALT:** Alteração da umidade do solo
- AvHm:** Complexo Varginha
- Ba:** Bário
- BH:** Balanço Hídrico
- Ca<sup>2+</sup>:** Cálcio
- CaCO<sub>3</sub>:** Carbonato de cálcio
- CaO:** óxido de cálcio
- CBH-MOGI:** Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu
- CETESB:** Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- Ce:** Cério
- CIDE:** Contribuição de Intervenção de Domínio Econômico
- Co:** Cobalto
- Cofins:** Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
- CONAMA:** Conselho Nacional do Meio Ambiente
- Cpa:** Formação Aquidua
- CPRM:** Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
- Cr:** Crômio
- CTC:** Capacidade de troca Catiônica
- Cu:** Cobre
- Cwa:** Clima de invernos secos

**DBO:** Demanda Bioquímica de Oxigênio

**DEF:** Deficiência Hídrica

**DPM:** Departamento de Petrologia e Metalogenio

**DQO:** Demanda Química de Oxigênio

**DRX:** Difração de Raios-X

**EIA:** Estudo de Impacto Ambiental

**Eq.:** Equação

**ETE:** Estação de Tratamento de Esgoto

**ETP:** Evapotranspiração Potencial

**ETR:** Evapotranspiração real ou efetiva

**EXC:** Excendente Hídrico

**Fe<sup>2+</sup>:** Ferro

**FeCO<sub>3</sub>:** Siderita

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:** Óxido de ferro (hematita)

**FeOOH:** Goethita

**FRX:** Fluorescência de Raios-X

**Ga:** Gálio

**H<sup>+</sup>:** íon hidrogênio

**H + Al:** Hidrogênio e alumínio

**hab:** habitantes

**IBGE:** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**IPT:** Instituto de Pesquisas Tecnológicas

**JKb:** Formação Botucatu

**JKβ:** unidades intrusivas básicas

**JKsg:** Formação Serra Geral

**K<sup>+</sup>:** Potássio

**K<sub>2</sub>O:** Óxido de potássio

**ks:** Concentração de potássio no solo

**kvi:** Concentração de potássio na vinhaça.

**La:** Lantânio

**LOI:** diferença entre o peso total dos óxidos e do pesa da amostra (relação de 1 de amostra +5 de fluxo).

**m%:** Saturação por alumínio

**Mg<sup>2+</sup>:** Magnésio

**MgCO<sub>3</sub>:** Magnesita

**MgO:** Óxido de magnésio

**Mn:** Manganês

**MnO:** Óxido de manganês

**MO:** Matéria Orgânica

**N:** Nitrogênio

**Na<sup>+</sup>:** Sódio

**(Na<sub>0,7</sub>Ca<sub>0,3</sub>)Mn<sub>7</sub>O<sub>14.2</sub>.8H<sub>2</sub>O:** Birnessita (rica em Na)

**Na<sub>2</sub>O:** Óxido de sódio

**Nb:** Nióbio

**NH<sub>3</sub>:** Nitrogênio Amoniacal

**Ni:** Níquel

**NO<sup>3-</sup>:** Nitrato

**NO<sup>2-</sup>:** Nitrito

**O:** folha octaédrica

**P:** Precipitação

**P:** Fósforo

**P1, P2, P3:** Pontos de amostragens

**PAV:** Planos de Aplicação de Vinhaça

**Pc:** Formação Corumbataí

**PEAD:** Polietilieno de alta densidade

**PIB:** Produto Interno Bruto

**Pis:** Programa de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servidor Público

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:** Pentóxido de fósforo

**ppm:** Partes por milhão

**PROÁLCOOL:** Programa Nacional do Alcool

**Qa:** Sedimentos aluvionares

**RAS:** Relação de adsorção de sódio

**Rb:** Rubídio

**R<sub>DQO/DBO</sub>:** Razão DQO e DBO

**RIMA:** Relatório de Impacto ao Meio Ambiente

**SB:** Soma de Bases

**SIGEP:** Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos

**SiO<sub>2</sub>:** Sílica

**SiO<sub>3</sub>:** Quartzo

**SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>:** Sulfato

**Sr:** Estrôncio

**SSRH:** Secretaria de Estado de Saneamento e Recursos Hídricos

**SST:** Sólidos Suspensos Totais

**T:** folha tetraédrica

**Ti:** Titânio

**TiO<sub>2</sub>:** Óxido de titânio

**TiO<sub>3</sub>:** Anatásio

**TQi:** Coberturas da Serra de Santana

**TQir:** Formação Rio Claro/Pirassununga

**TrJp:** Formação Pirambóia

**UGRHI:** Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

**UNICA:** União da Indústria de Cana-de-Açúcar

**USEPA:** *United States Environmental Protection Agency*

**UTM:** Universal Transversa de Mercator

**V:** Vanádio

**V%:** Saturação por bases

**VP:** Valores de Prevenção

**Y:** Ítrio

**Zn:** Zinco

**Zr:** Zircônio

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
3.1. Evolução da indústria sucroalcooleira no Brasil.....	4
3.2. Produção de vinhaça e seu uso na fertirrigação de fazendas de cana-de-açúcar .....	6
3.3. Propriedades físico-químicas do solo. ....	14
3.4. Argilominerais .....	16
<b>4. ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>22</b>
4.1. Aspectos físicos .....	22
4.1.1. Geologia regional .....	22
4.1.2. Geologia local .....	25
4.1.3. Geomorfologia .....	26
4.1.4. Pedologia.....	28
4.1.5. Recursos hídricos .....	29
4.1.6. Clima.....	31
4.1.7. Balanço hídrico .....	32
<b>5. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
5.1. Descrição dos trabalhos de campo.....	38
5.2. Granulometria .....	41
5.3. Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX).....	45
5.4. Difração de Raios-X (DRX) .....	45
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>48</b>
6.1. Parâmetros físico-químicos da vinhaça .....	48
6.2. Cálculos da dosagem de volume de vinhaça.....	52
6.3. Propriedades físico-químicas do solo .....	55
6.4. Análises granulométricas .....	78
6.5. Análise química por FRX .....	81
6.6. Análise mineralógica por DRX.....	83
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>92</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>93</b>

<b>ANEXO A.....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>104</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Desde a implantação do Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), o Brasil apresentou uma grande expansão da produção de cana-de-açúcar e conseqüentemente da indústria sucroalcooleira ao longo dos anos como uma tecnologia alternativa na geração de energia e com o intuito de expandir a exportação do etanol. Todavia, a expansão crescente da produção desse combustível no país também tem representado um cenário de impactos ambientais devido aos resíduos e efluentes gerados que podem comprometer a qualidade das águas subterrâneas e afetar as propriedades físicas e químicas dos solos, a exemplo da produção de vinhaça (MORTATTI, 2010; CASARINI; MURGEL BRANCO, 1989).

A vinhaça (ou restilo ou vinhoto) é o principal resíduo oriundo da produção do etanol durante a etapa de destilação da mistura alcoólica gerada da fermentação (OLIVEIRA, 2015). Esse resíduo possui elevadas concentrações de matéria orgânica com elevadas quantidades de macro e micronutrientes (o qual apresenta expressivas concentrações de Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) com menores quantidades de Nitrogênio (N) e Fósforo (F)) e possui características ácidas e corrosivas (FUESS, 2013).

Este autor explica que a vinhaça apresenta um alto risco à contaminação de solos e águas subterrâneas e superficiais pela presença de amônia e secundariamente pela possibilidade de metais tóxicos. A disposição excessiva de matéria orgânica (principalmente de fósforo e nitrogênio) presente no efluente pode gerar a eutrofização dos corpos hídricos, além de causar alterações no OD (oxigênio dissolvido) em corpos hídricos e de salinização e aumento da acidez no solo. Contudo, o autor expõe que essa contaminação ocorre em casos de super-dosagem da aplicação da vinhaça, uma vez que o uso desse efluente em doses adequadas pode aumentar a disponibilidade de alguns nutrientes, no aumento do pH e na melhora da estrutura física do solo e no aumento da atividade microbiana, que podem resultar em altas produtividades agrícolas.

Em vista do possível risco ambiental proveniente da aplicação de vinhaça no solo, foram estabelecidas normas e legislações que visam o manejo apropriado da Vinhaça, a exemplo da *Norma Técnica P4.231 - Vinhaça: Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola* (CETESB, 2015). Essa norma tem como finalidade definir critérios e procedimentos quanto ao armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça, oriunda da atividade sucroalcooleira através do processamento da cana-de-açúcar. Dentre os critérios estabelecidos, a Norma Técnica P4.231 prevê que sejam feitos anualmente os “Planos de

Aplicação de Vinhaça” (PAV) para fins de acompanhamento e fiscalização através da amostragem de solos e de vinhaça e dessa forma observar se as concentrações químicas analisadas não ultrapassam os respectivos valores de prevenção (VP).

Além da Norma Técnica P4.231, existem outras legislações, instrumentos normativos e documentos com diretrizes ambientais que visam a preservação da qualidade do solo e dos efluentes usados na fertirrigação, tais quais: *Resolução CONAMA 420/2009* (BRASIL, CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009) que dispõe critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas; *Resolução CONAMA 430/11* (BRASIL, CONAMA nº 430, de 13 de Maio de 2011), que estabelece as condições de lançamento de efluentes em corpos d’ água; e, *Guidelines for Water Reuse* (USEPA, 2012), o qual avalia o reúso de águas residuárias a fim de obter benefícios ao meio ambiente e à saúde humana.

Quando aplicados segundo as diretrizes das normas técnicas, alguns estudos apontaram que tanto a vinhaça como a aplicação de lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) tem auxiliado na melhora dos parâmetros de fertilidade do solo e em sua produtividade. Trabalhos como os de Pereira (2015), Lopes (1984), Nascimento et al. (2004) avaliaram os efeitos da adubação com lodo de esgoto semelhante aos que ocorrem com a aplicação da vinhaça, enquanto que Barros et al. (2010), Canellas et al. (2003) e Zolin et al. (2011) analisaram a aplicação da vinhaça na fertirrigação de diferentes tipos de solos de lavouras de cana-de-açúcar.

A pesquisa de Barros et al. (2010) avaliou o efeito da aplicação de vinhaça nas propriedades químicas de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com lavouras de cana-de-açúcar no município de Laranjeiras (SE), em que foram obtidas análises indicativas de maiores quantidades da Matéria Orgânica (MO), de Ca e Mg, Capacidade de Troca Catiônica (CTC), Saturação por bases (V%), Soma de bases (SB) e de macro e micronutrientes na área que teve dosagens de vinhaça, tendo estabelecido um aumento de fertilidade devido a aplicação do efluente.

Canellas et al. (2003) analisaram amostras de um Cambissolo nas profundidades de 0-0,20 m e 0,20 a 0,40 m de quatro áreas do município de Campos dos Goytacazes (RJ), onde observou-se que, nas áreas com manejo de cana crua e com aplicação de vinhaça, houve um aumento na fertilidade do solo pela adição de MO a longo prazo com o aumento da quantidade de substâncias húmicas alcalino-solúveis. Também foi constatado um aumento dos cátions de K, Ca e Mg e uma correlação entre os teores de CTC com os teores de carbono

fornecidos pela MO, no qual houve maior aumento da CTC na área com aplicação de vinhaça.

Por sua vez, Zolin et al. (2011) fez um estudo do efeito da aplicação da vinhaça nas propriedades de solos cultivados com cana-de-açúcar no município de Cidade Gaúcha (PR) em áreas com tempos de aplicação de 1, 2, 3, 4, 12 e 20 anos (com dosagens de vinhaça de  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  em cada período) e uma área testemunha onde não houve fertirrigação. Os autores observaram uma relação entre a CTC e o teor de carbono proveniente da matéria orgânica, os quais tenderam a aumentar conforme a aplicação do efluente. Também foi observado que os valores de saturação por bases foram maiores na área testemunha e nas áreas com tempos de aplicação de até três anos (próximo do valor recomendado de 60%), tendo uma redução ao longo dos anos seguintes de aplicação de vinhaça.

Nesses estudos, observaram-se o aumento da concentração de matéria orgânica, diminuição do pH no momento da aplicação do efluente com posterior retorno aos valores originais após determinado tempo, aumento da CTC, acréscimo expressivo de cátions como K, Ca e Mg e o consequente aumento da soma e saturação por bases, além da redução do Al trocável e do parâmetro da saturação por alumínio. Em casos de super dosagem de volume aplicado de vinhaça, impactos nas propriedades físico-químicas do solo e da sua fertilidade (como CTC, adsorção de íons e moléculas de água, variação química a depender do pH e da salinidade do meio, entre outros), incluindo a sua mineralogia e o comportamento dos argilominerais.

Segundo Ribeiro et al. (1983), quando a vinhaça é aplicada no solo em quantidades mínimas permitidas pela legislação, a matéria orgânica presente no efluente pode auxiliar no aumento do estado de agregação, da capacidade de retenção de água, da condutividade hidráulica, entre outros fatores, porém o excesso de cátions de  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  pode ocasionar um efeito de dispersão ou floculação nos coloides do solo a depender de sua valência, raio hidratado e concentração, em que o efeito da floculação segue a seguinte sequência:  $\text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$ . O autor esclarece que a vinhaça tem um efeito dispersante sobre a argila do solo, a depender da quantidade e tipo de cátions presentes, sua proporção e da natureza das partículas coloidais, que podem resultar na compactação dessas argilas e causar sérios problemas à cultura da cana-de-açúcar. Por sua vez, Ribeiro et al. (2011) expõe que a vinhaça produz alterações no solo como mudanças de pH, aumento no carbono orgânico, na CTC e na atividade microbiológica, e a disposição elevada de cátions presentes nesse efluente podem influenciar nas cargas presentes na superfície das partículas do solo.

Desta forma, o estudo do comportamento das argilominerais às condições de pH e salinidade do meio e a avaliação de sua CTC pode auxiliar na análise das mudanças de fertilidade do solo quando fertirrigado com vinhaça ao longo do tempo. As propriedades granulométricas e o tipo de argilominerais presentes neste solo podem ser fatores que influenciam nas mudanças físico-químicas do solo, na lixiviação parcial ou total de alguns macros e micronutrientes e a percolação ou não da vinhaça nos perfis de alteração, sendo um possível estudo complementar que auxiliaria no cálculo dos volumes de aplicação de vinhaça na fertirrigação das fazendas de cana-de-açúcar.

## **2. OBJETIVOS**

O estudo teve como objetivo analisar as variações das propriedades físico-químicas e mineralógicas do solo em uma fazenda devido à aplicação sucessiva de volumes de vinhaça.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1. Evolução da indústria sucroalcooleira no Brasil**

De acordo com Lamonato (2014), o programa PROÁLCOOL foi estabelecido pelo governo através do Decreto nº 76.593 em 14 de Novembro de 1975, que tem como objetivo suprir as necessidades do mercado interno e externo e da política de combustíveis automotivos através do incentivo da produção de álcool oriundo da cana-de-açúcar, da mandioca e de outros insumos por meio da expansão da produção agrícola e da modernização e ampliação das destilarias (BRASIL, 1975).

Como consequência, o PROÁLCOOL tem favorecido em demasia o crescimento do cultivo da cana-de-açúcar e da produção de etanol a fim de atender a demanda energética do país e suprir o mercado externo e o interno. Segundo uma notícia do Portal Brasil (2016), em 2015 a produção brasileira de etanol alcançou o recorde de 30 bilhões de litros, o que representou um crescimento de 6% em relação a 2014. Os principais fatores desse crescimento salientados por essa notícia foram a excelente safra de cana-de-açúcar naquele ano e as medidas governamentais que proporcionaram o aumento da atratividade do etanol ao elevar o percentual de anidro na gasolina C, além do retorno da Contribuição de Intervenção de Domínio Econômico (Cide) e a elevação do PIS/Cofins para a gasolina A.

De acordo com os dados fornecidos pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2017a), as regiões que possuem maiores concentrações da produção brasileira de cana-de-açúcar são correspondentes às regiões Centro-Sul e Nordeste do país (Figura 1).

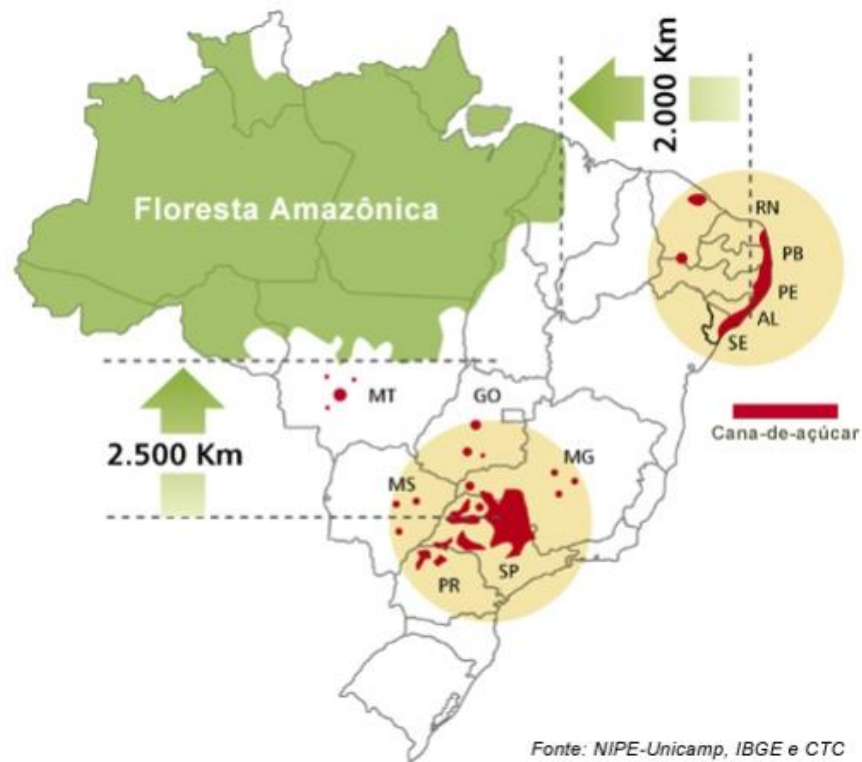


Figura 1. Mapa da produção de cana-de-açúcar e das usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil (UNICA, 2017a).

Desta forma, a alta produção de cana-de-açúcar no Brasil também reflete no aumento da geração de seus produtos derivados como o açúcar, o etanol anidro e o etanol hidratado. A Tabela 1 expõe dados recentes da União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2017b) sobre a produção da Safra 2016/2017 de cana-de-açúcar e seus derivados. A Tabela 1 mostra que a produção nacional de cana-de-açúcar do período de 2016 a 2017 foi de 651,84 milhões de toneladas, o que gerou a produtividade de 38,73 milhões de toneladas de açúcar e 27,25 milhões de m<sup>3</sup> de Etanol (considerando 11,58 milhões m<sup>3</sup> de Etanol Anidro e 15,66 milhões de m<sup>3</sup> de Etanol Hidratado). Também é exposta a produção do Estado de São Paulo no mesmo período, no qual houve uma safra de cana-de-açúcar de 365,99 milhões de toneladas que representou na geração de 13,19 milhões de m<sup>3</sup> de Etanol.

Tabela 1. Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol – Safra 2016/2017 (UNICA, 2017b).

<b>Estados</b>	<b>Cana-de-açúcar (milhões de toneladas)</b>	<b>Açúcar (milhões de toneladas)</b>	<b>Etanol Anidro (milhões de m<sup>3</sup>)</b>	<b>Etanol Hidratado (milhões de m<sup>3</sup>)</b>	<b>Etanol Total (milhões de m<sup>3</sup>)</b>
São Paulo	365,99	24,24	6,15	7,04	13,19
Brasil	651,84	38,73	11,58	15,66	27,25

Por sua vez, a Tabela 2 indica a produção nacional e do estado de São Paulo do Etanol Anidro e Hidratado do período entre 2012 a 2017 (UNICA, 2017c). A produção nacional indicada expõe um aumento de 17,34% nos últimos cinco anos, ao passo que no estado de São Paulo esta teve um acréscimo de aproximadamente 11,6% no mesmo período.

Tabela 2. Produção de Etanol Total (Anidro e Hidratado) em milhões de m<sup>3</sup> no estado de São Paulo entre 2012/2013 a 2016/2017 (UNICA, 2017c).

<b>Estado</b>	<b>2012/2013</b>	<b>2013/2014</b>	<b>2014/2015</b>	<b>2015/2016</b>	<b>2016/2017</b>
São Paulo	11.830	13.944	13.723	14.577	13.197
Brasil	23.226	27.476	28.480	30.232	27.254

### **3.2. Produção de vinhaça e seu uso na fertirrigação de fazendas de cana-de-açúcar**

Independente do tipo de matéria- prima usada (cana-de-açúcar, milho, beterraba, entre outros), a produção do etanol ocorre principalmente nas etapas de fermentação de uma solução açucarada (denominada mosto) e da destilação da mistura alcoólica resultante do processo fermentativo. A vinhaça é o principal resíduo (ou água residuária) da produção etanol (Figura 2), gerada na etapa de destilação da solução alcoólica gerada na fermentação (FUESS, 2013).

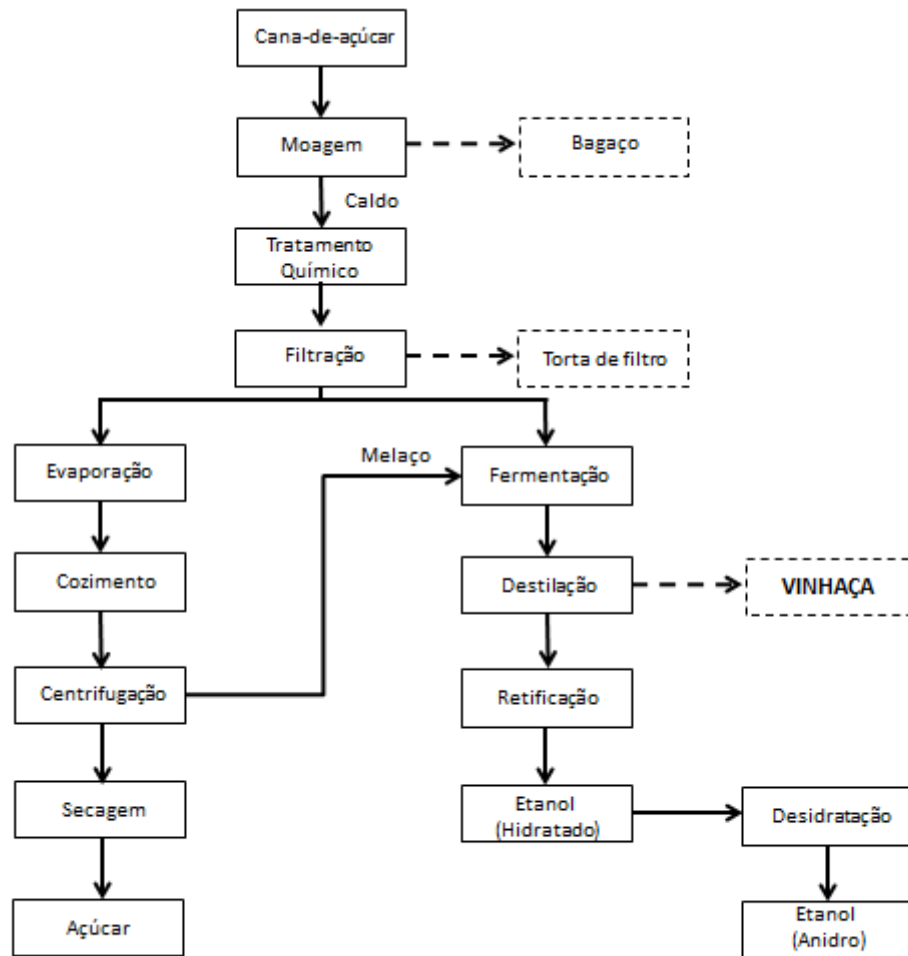


Figura 2. Fluxograma da produção de etanol e de açúcar usando cana-de-açúcar como matéria-prima (as setas e as bordas tracejadas representam as águas residuárias e demais resíduos produzidos na planta industrial). (FUESS, 2013).

Para cada tonelada de cana-de-açúcar, 70 a 90L de etanol são produzidos, resultando na produção de 800 a 1000L de vinhaça. Em diversos trabalhos, é descrito que para cada 1L de etanol destilado são produzidos 13L de vinhaça (ARCADIS TETRPLAN, 2011; FUESS, 2013; NETO, 2016).

No caso da usina sucroalcooleira da área de estudo, as informações adquiridas através dos PAVs também forneceram as medidas de capacidade da moagem da cana-de-açúcar (Tabela 3), da quantidade produzida de vinhaça na produção de etanol e da produção de vinhaça por safra (período de Abril a Dezembro) aplicada nas fazendas da Área de Influência Direta (AID) da usina (Tabela 4) ao longo do período de 2012 a 2017.

Tabela 3. Dados da Capacidade de moagem de cana-de-açúcar diárias, anual e previsão da capacidade anual do período de 2012 a 2017 obtidos através dos PAVs.

<b>Capacidade de moagem de cana-de-açúcar</b>			
<b>Anos</b>	<b>Capacidade diária de moagem (t/dias efetivos)</b>	<b>Previsão da Capacidade anual (t/dias corridos)</b>	<b>Previsão da Capacidade anual (toneladas)</b>
2017	15568	12860	3253668
2016	15000	12691	2300000
2015	14300	12290	2900000
2014	14800	12340	2850000
2013	13700	11446	2850000
2012	13500	10790	2470000

Tabela 4. Dados da Produção de Vinhaça obtidos através dos PAVs de 2012 a 2017.

<b>Produção de Vinhaça (caracterização quantitativa)</b>						
<b>Anos</b>	<b>Dias de Safra</b>	<b>Produção total de álcool (m<sup>3</sup>/safra)</b>	<b>Produção média de álcool (m<sup>3</sup>/dia corrido)</b>	<b>Relação média de vinhaça/álcool (lts/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Produção média de vinhaça (m<sup>3</sup>/dia)</b>	<b>Produção média de vinhaça/safra (m<sup>3</sup>)</b>
<b>2017</b>	253 dias	116301	460	14.0	6282	1589319
<b>2016</b>	265 dias	121471	458	14.0	6417	1700000
<b>2015</b>	236 dias	115000	490	14.0	6860	1619000
<b>2014</b>	231 dias	95300	410	15.0	6188	1430000
<b>2013</b>	249 dias	89397	360	15.0	5400	1344600
<b>2012</b>	229 dias	92354	400	14.8	5968	1367000

Décadas atrás, a vinhaça e as demais águas residuárias do processo produtivo do etanol eram despejadas em rios e lagos. Este despejo era um fator causador de contaminação destes corpos hídricos, uma vez que o lançamento destes efluentes pode promover o rápido consumo de OD e a consequente eutrofização e elevada morticidade da biota aquática, além da

contaminação de aquíferos pela infiltração das impurezas da vinhaça nas zonas de recarga dos aquíferos.

Em vista disso, buscaram-se outras maneiras de despejo da vinhaça cujo impacto ambiental fosse reduzido, sendo o mais utilizado o seu uso de forma controlada na fertirrigação de lavouras de cana-de-açúcar devido a sua elevada quantidade de potássio e de outros macro e micronutrientes necessários para produtividade dessas culturas (FUESS, 2013; OLIVEIRA, 2015).

Além destes motivos, o uso da vinhaça por meio da fertirrigação visou substituir ou complementar a carga de potássio pelo adubo mineral, que é um fertilizante de alto custo, e de aumentar o teor de MO do solo (ARCADIS TETRPLAN, 2011; NETO, 2016). Antes de ser aplicada nas lavouras, a vinhaça é misturada com outras águas residuárias geradas na planta industrial da usina sucroalcooleira (como a água de lavagem das dornas, de pisos e equipamentos, de colunas barométricas e da água de descarga das caldeiras) que não apresentam valor nutritivo.

Antes de ser encaminhado para as lavouras de cana-de-açúcar, o volume de aplicação da vinhaça é previamente calculado com base nas propriedades físico-químicas do solo, na concentração de potássio presente no efluente e na extração média desse nutriente pela cultura, conforme a Norma Técnica P4.231 (CETESB, 2015).

O cálculo da dosagem de volume máximo de vinhaça é feita a partir do teor de  $K_2O$  a ser aplicado no solo, usado como indicativo para a qualidade da aplicação do efluente no meio. A norma mencionada define que a concentração máxima de potássio no solo não poderá exceder 5% da CTC, sendo necessária a reposição de 185 kg de  $K_2O$  por hectare por corte quando este limite for atingido. Desta forma, a dosagem máxima de vinhaça aplicada no solo depende tanto da concentração de potássio do solo e quanto da CTC, sendo definida pela seguinte equação:

$$m^3 \text{ de Vinhaça/ha} = [(0,05 \times CTC - ks) \times 3744 + 185] / kvi \quad (1)$$

Onde:

**0,05** = 5% da CTC

**CTC** = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em  $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ .

**ks** = concentração de potássio no solo, expresso em  $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ., à profundidade de 0 a 0,80 metros.

**3744** = constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em  $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ . ou  $\text{meq}.100\text{cm}^{-3}$ , para kg de potássio em um volume de 01 (um) hectare por 0,80 metros de profundidade.

**185** = massa, em kg, de  $\text{K}_2\text{O}$  extraído pela cultura por hectare, por corte.

**kvi** = concentração de potássio na vinhaça, expressa em  $\text{kg de K}_2\text{O}.\text{m}^{-3}$ .

Uma vez definidos os volumes de dosagem, a vinhaça é então distribuída no solo através de condutos livres, redes adutoras fixas e móveis e caminhões, sendo que dependendo da localização o transporte pode utilizar como alternativas os canais com rede adutora, canal com rede móvel e caminhão com rede móvel (PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2017; ARCADIS TETRPLAN, 2011). A irrigação pode ser feita por meio de conjuntos de aspersores, hidro holl e moto bomba pelo método de aspersão, com possível uso de sistemas de carretel enrolador para a fertirrigação das lavouras (Figura 3).

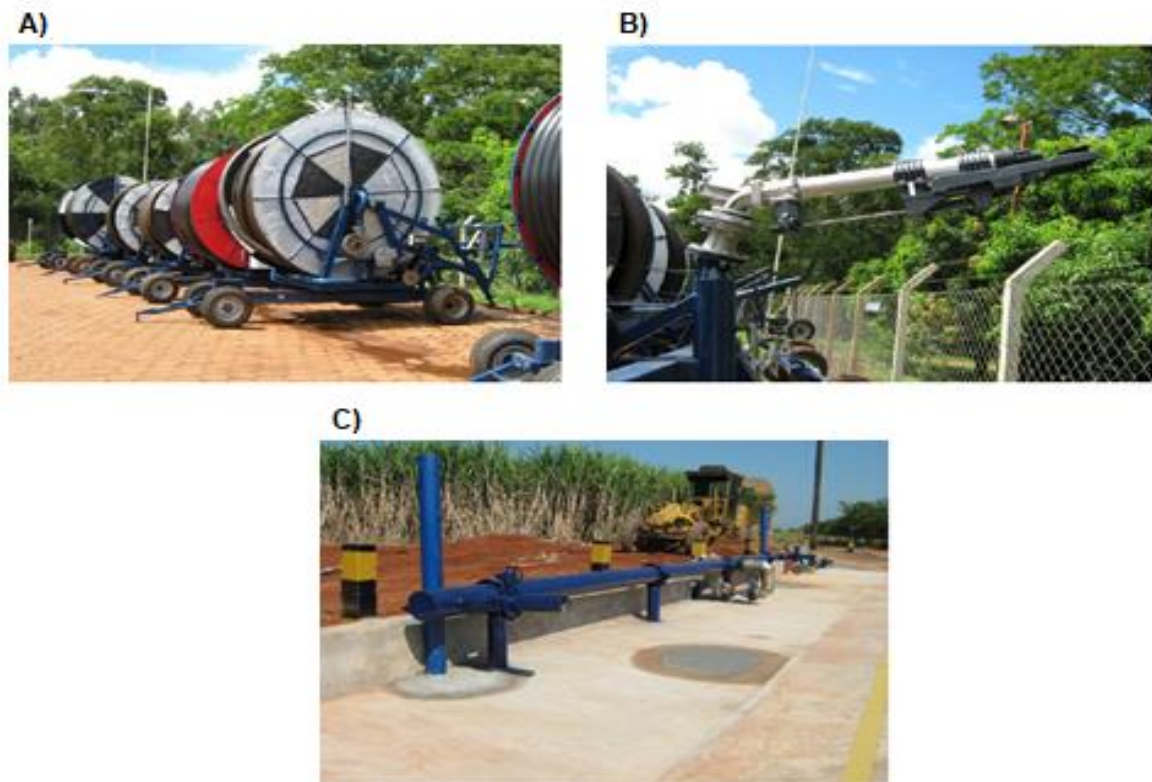


Figura 3. Equipamentos utilizados na Fertirrigação: A) Hidro holl (carretel enrolador); B) Aspersor; C) Rede adutora móvel (ARCADIS TETRPLAN, 2011).

A vinhaça produzida é transportada por meio de tubulações de aço da destilaria até os tanques pulmão de acumulação, onde é misturada com as águas residuárias dos diversos setores do parque industrial. Em seguida a mistura vinhaça + águas residuárias é distribuída

em dois canais principais e logo depois é transportada para diversos canais de fertirrigação por meio de adutoras de gravidade e tubulações de gravidade. Todas as áreas fertirrigadas possuem curvas de nível e terraços, além de sistemas de segurança no caso de um possível vazamento de vinhaça.

A usina sucroalcooleira da área de estudo possui três tanques pulmões de armazenamento de vinhaça (Tabela 5). Os tanques são revestidos com uma geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD) com 2 mm de espessura e contem drenos testemunho para a detecção de possíveis vazamentos (Figura 4). A usina também dispõe de duas áreas para carregamento de caminhões, sendo uma delas situada em frente à entrada principal da indústria perto do pátio de compostagem e a outra localizada na área agrícola (Figuras 5 e 6).

Tabela 5. Tanques de armazenamento de vinhaça (ARCADIS TETRPLAN, 2011; PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2017).

Descrição	Capacidade (m <sup>3</sup> )	Local	Coordenadas Geográficas		
			UTM-N	UTM-E	Altitude
Tanque A	2200	Indústria (saída da destilaria)	7582293 m	256003 m	604 m
Tanque B	2000	Área Agrícola	758376 m	255782 m	658 m
Tanque C	1000	Área Agrícola	7584899 m	255736 m	767 m



Figura 4. Tanques de armazenamento de vinhaça da usina sucroalcooleira (ARCADIS TETRPLAN, 2011; PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2017).

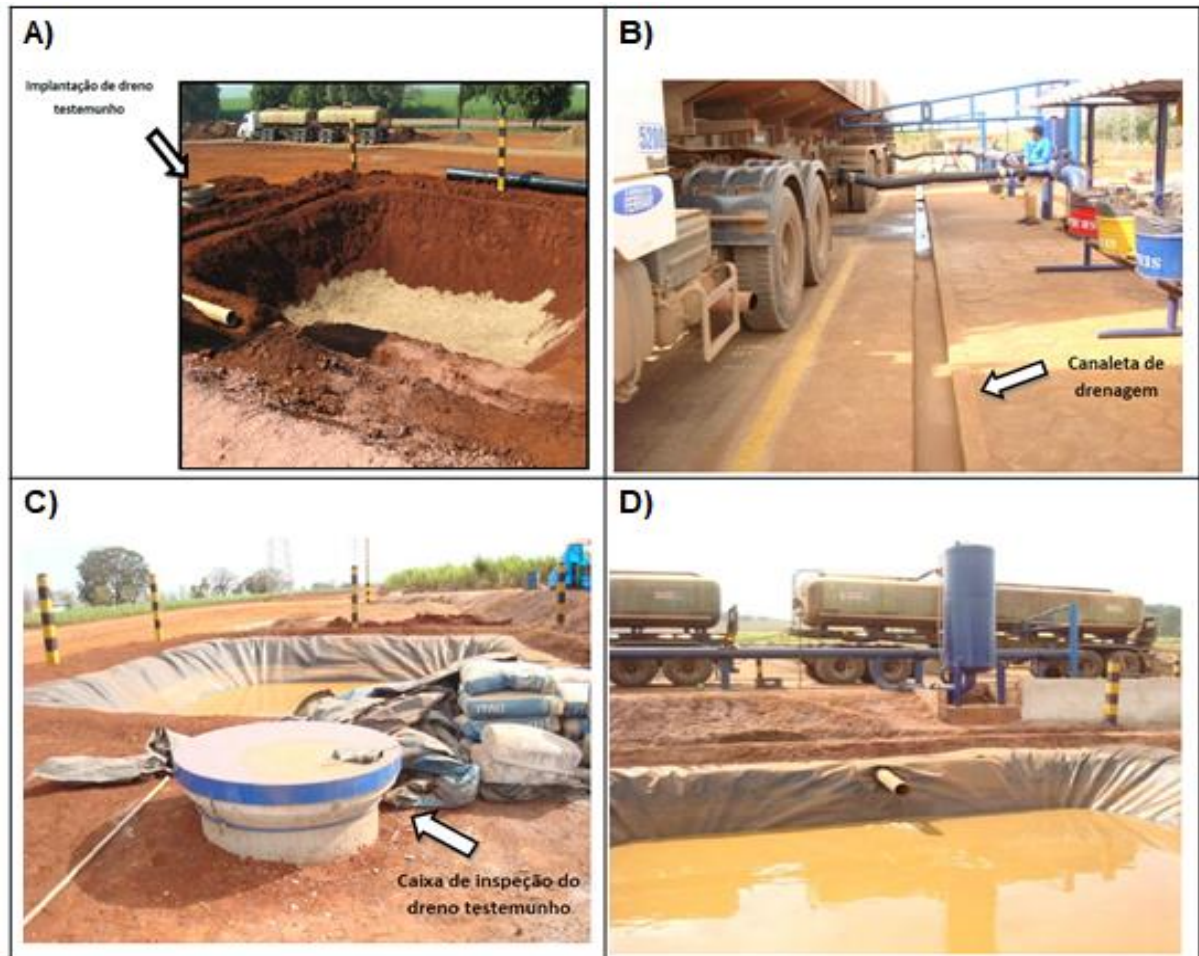


Figura 5. Estrutura da primeira área de carregamento próxima da indústria: A) Construção do tanque de contenção de derramamentos; B) Plataforma de carregamento; C) Tanque de contenção impermeabilizado com manta de PEAD de 2mm; D) Construção do tanque de contenção de derramamentos (ARCADIS TETRPLAN, 2011; PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2017).

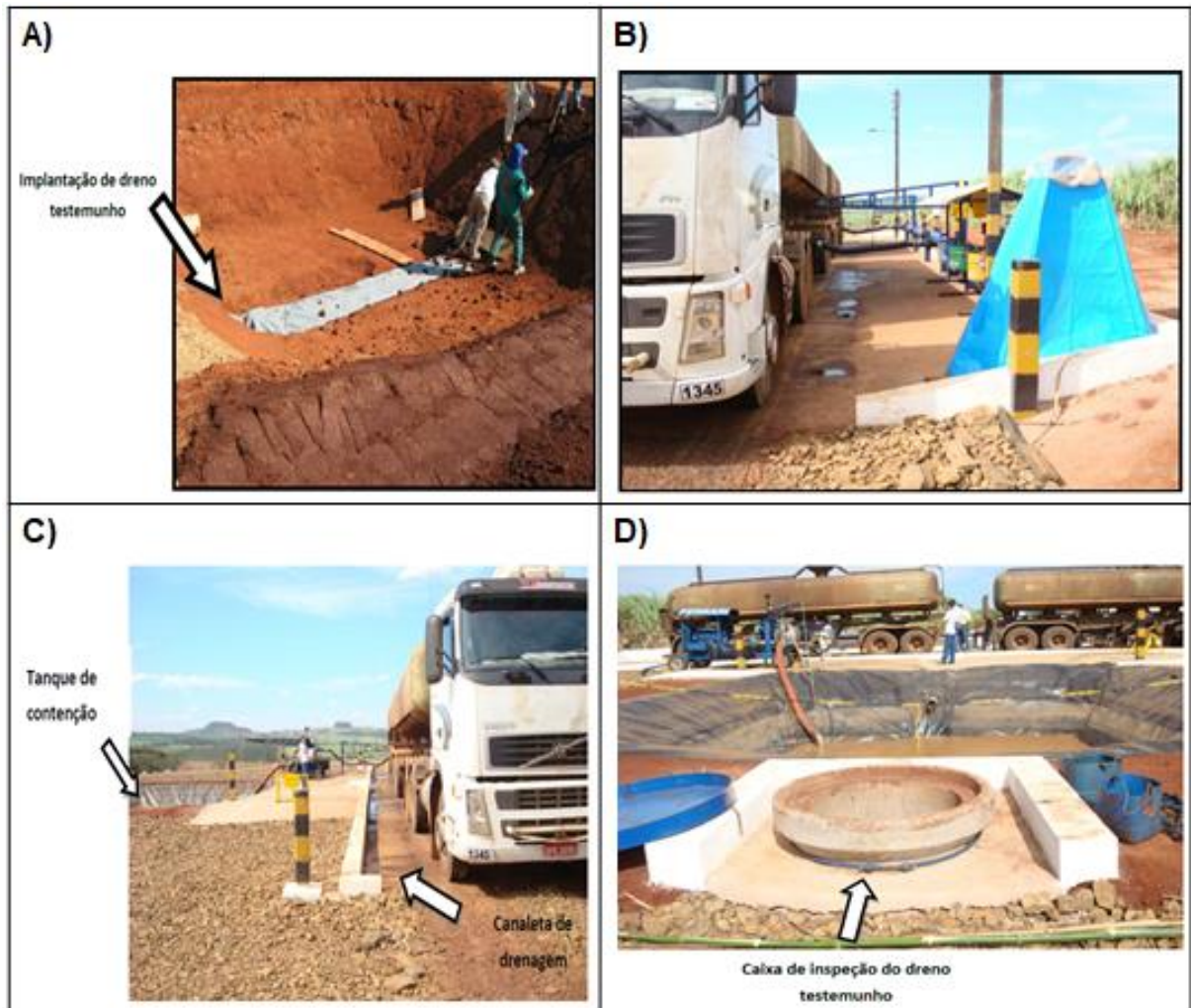


Figura 6. Estrutura da segunda área de carregamento situada na área agrícola: A) Construção do tanque de contenção de derramamentos; B) Plataforma de carregamento; C) Plataforma de carregamento; D) Vista da Plataforma e tanque de contenção impermeabilizado com manta PEAD de 2 mm (ARCADIS TETRPLAN, 2011; PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2017).

### 3.3. Propriedades físico-químicas do solo.

A avaliação das propriedades físico-químicas do solo é de extrema importância para a definição das quantidades e os tipos de fertilizantes, corretivos e tipos de manejo que podem ser utilizados para cada tipo de cultura produzida, através da reposição de macro e micronutrientes necessários para seu crescimento. Dentre os principais parâmetros para a análise da fertilidade do solo, estudam-se os parâmetros de pH, CTC, SB, V%, MO, Saturação por alumínio (m%) e concentrações de cátions como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ .

Os cátions de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  e  $Al^{3+}$  são cátions trocáveis (ou permutáveis) presentes no solo e que podem ser adsorvidos pelas plantas, cujos teores são usados no cálculo da CTC, SB, V% e m% (LOPES, 1984; PEREIRA, 2015; RONQUIM, 2010). Os cátions de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $K^+$ , também conhecidos como cátions de base, são considerados como macronutrientes para as plantas e influenciam na fertilidade do solo. Por sua vez, a SB é um parâmetro que expressa a somatória de todos os cátions de base presentes no solo (Eq. 2):

$$SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ \quad (2)$$

Além da SB, os cátions de base também são considerados no cálculo da CTC total e efetiva. A CTC pode ser definida como a propriedade de partículas coloidais (como argilominerais, substâncias húmicas e óxidos de ferro e alumínio) de possuírem uma superfície de troca capaz de adsorver cátions. A CTC total é correspondente à somatória de todos os cátions permutáveis do solo ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $H^+$  e  $Al^{3+}$ ) e, no caso da CTC efetiva, é correspondente a soma de todos os cátions permutáveis, com exceção do íon  $H^+$  ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  e  $Al^{3+}$ ).

A partir dos índices dos cátions permutáveis e de SB e CTC, é possível obter os percentuais da Saturação por bases e por alumínio do solo. De acordo com Ronquim (2010), o parâmetro da Saturação por bases (identificado por V%) é determinado pela razão da SB pela CTC total em porcentagem (Eq. 3), devido à dependência deste fator à retenção de cátions no solo, usado principalmente como um indicativo das condições de fertilidade deste.

$$V\% = SB/CTC_{total} \times 100 \quad (3)$$

O parâmetro de V% é usado como um indicativo das condições de fertilidade dos solos, em que solos com  $V\% \geq 50\%$  são considerados como solos eutróficos (férteis), enquanto que solos com índices de V% inferiores que 50% são caracterizados como solos distróficos ou inférteis (BRITO, 2013; RONQUIM 2010) .

Todavia, a fertilidade do solo também depende das concentrações de íons  $H^+$  e  $Al^{3+}$ , que podem ser prejudiciais às culturas. O aumento da concentração de íons  $H^+$ , que pode ser fornecido através de efluentes com pH ácido, possibilita a conseqüente acidificação do solo, seguida de uma transição do pH do ácido para índices mais alcalinos conforme o consumo de  $H^+$  através da atividade microbiana (FUESS, 2013; MORTATTI, 2010; SILVA, GRIEBELER

E BORGES, 2007). Dependendo do tipo de cultura, esta pode ser ou não resistente a condições de pH muito ácidas, e que possibilita a redução de sua produtividade.

As variações do alumínio no solo são decorrentes principalmente da decomposição intempérica das argilas caulínicas (argilominerais constituídas predominantemente por alumínio), minerais do grupo dos caudatos, gibbsitas, hematitas e óxidos de ferro e alumínio mal cristalizados, comuns na maioria dos solos tropicais brasileiros com elevados graus de intemperismo (FUESS, 2013; RONQUIM, 2010).

A decomposição destes minerais libera os cátions de alumínio para o solo e são absorvidos pelas lavouras. Contudo, altas concentrações de  $Al^{3+}$  podem aumentar a toxicidade do solo, a depender da resistência da cultura. A avaliação de toxicidade por meio das concentrações de  $Al^{3+}$  do solo pode ser feita através do cálculo do parâmetro m% (Eq. 4), que corresponde a relação em porcentagem dos teores de  $Al^{3+}$  com a CTC efetiva (BRAGA, 2013, RONQUIM, 2010):

$$m\% = Al^{3+} / CTC_{efetiva} \times 100 \quad (4)$$

Em casos em que os percentuais de m% são maiores que 20%, estes podem representar um risco de toxicidade a algumas culturas que não são resistentes a essas condições (PEREIRA, 2015; LOPES, 1984). Em alguns solos distróficos, as concentrações de m% podem ser superiores a 50% com teores de alumínio muito elevado e conseqüentemente possuem baixas quantidades de cátions de base, sendo considerados como solos muito pobres ou álicos (RONQUIM, 2010).

Além destes parâmetros, outro fator que influencia na fertilidade do solo é a quantidade de MO disponível, cuja degradação produz substâncias húmicas coloidais que aumentam a CTC ao fornecerem cargas negativas que aumentam o potencial de retenção de cátions no solo, além de contribuir em menor quantidade na adição dos cátions de base de K, Ca e Mg (BARROS et al., 2010; RONQUIM, 2010; ZOLIN et al., 2011 ).

### 3.4. Argilominerais

Como mencionado anteriormente, as partículas coloidais como as substâncias húmicas geradas pela degradação da MO e os argilominerais são de extrema importância para a definição da fertilidade do solo devido a sua capacidade de trocar cátions. Contudo, os

argilominerais podem ter CTC variáveis, sendo que alguns têm maiores capacidades de trocar cátions que as outras.

Os argilominerais são minerais da família dos filossilicatos presentes em grandes quantidades nas argilas, que são materiais naturais constituídos por minerais de granulometria abaixo de  $4\mu\text{m}$  e que apresentam características de plasticidade na presença de um determinado teor de água e de rigidez quando estão secas ou queimadas (LAESPIGA, 2008).

De acordo com Dana e Hurlbut (1960) e Laespiga (2008), os Filossilicatos são caracterizados por um grupo de minerais cuja estrutura é semelhante a várias camadas em forma de folhas (phylion = folhas), os quais são classificados nos grupos da Serpentina, da Caulinita, das Micas, da Clorita e dos Argilominerais. A estruturação básica dos filossilicatos é constituída por folhas de tetraedros formados por um átomo de silício rodeado por quatro átomos de oxigênio, unidas a folhas de octaedros de magnésio ou de alumínio. As camadas e/ou folhas de tetraedros de silício possuem três dos quatro oxigênios de cada tetraedro compartilhados com tetraedros vizinhos, formando uma folha siloxana ou simplesmente folha tetraédrica (T) em um arranjo hexagonal (Figura 7).

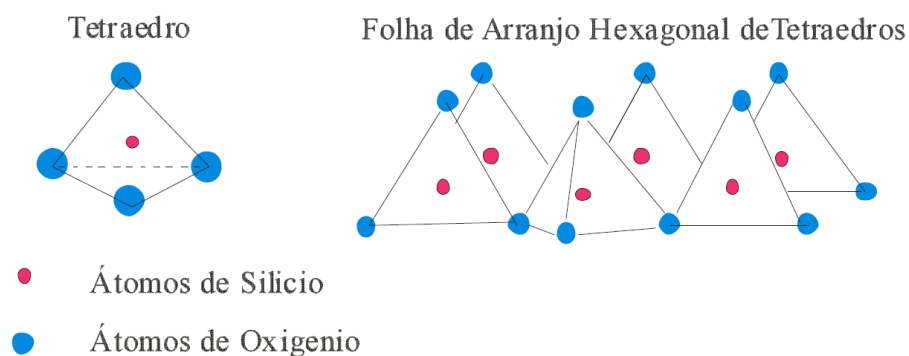


Figura 7. Tetraedro de silício e oxigênios e folhas de arranjo hexagonal de tetraedros, formando uma folha de siloxana (LAESPIGA, 2008).

As camadas e/ou folhas octaédricas são compostas por octaedros constituídos por um cátion di ou trivalente ( $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ) rodeados por seis átomos de oxigênio ou hidroxilas, ligados entre si e distribuídos bidimensionalmente, formando uma folha octaédrica (O) de arranjo hexagonal (Figura 8), sendo a folha de  $\text{Mg}^{2+}$  denominada de *brucita* e a folha de  $\text{Al}^{3+}$  intitulada de *gibbsita*.

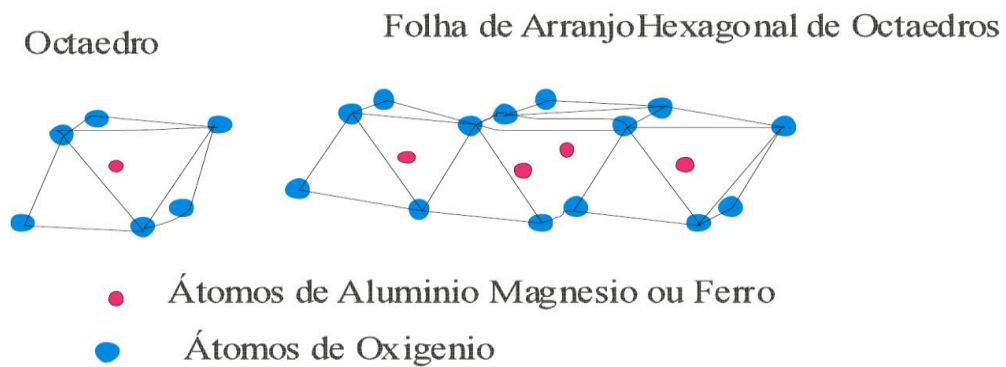


Figura 8. Octaedros de Magnésio, Alumínio ou Ferro e folhas octaédricas em arranjo hexagonal (LAESPIGA, 2008).

As folhas de brucita compostas por octaedros de magnésio possuem coordenação 6 e ocupam todos os espaços da folha da estrutura cristalina, formando uma folha *trioctaédrica* (Figura 9a). Apesar das folhas de gibbsita também exibirem uma configuração octaédrica de coordenação 6 com a hidroxila, os octaédricos ocupam apenas dois terços da estrutura da folha devido a carga mais elevada do cátion de alumínio, sendo esta configuração denominada de *dioctaédrica* (Figura 9b). Independente das folhas de brucitas e gibbsitas serem eletricamente neutras, a folha de siloxana é eletronicamente instável, e por isso é necessária a combinação com as folhas octaédricas através da ocupação dos oxigênios presentes nos vértices da folha siloxana nos espaços das hidroxilas das folhas octaédricas para obter uma estrutura eletronicamente neutra.

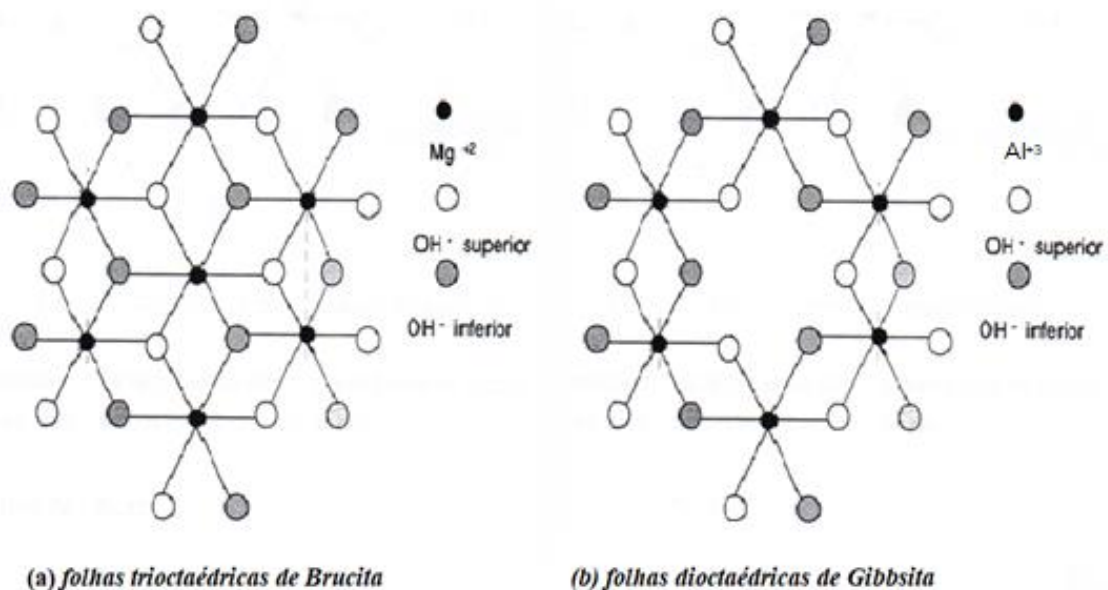


Figura 9. (a) folha de brucita com configuração trioctaédrica; (b) folha de gibbsita com configuração dioctaédrica- Extraído de Nobile e Marques Júnior (2008).

A partir da estrutura de seus minerais, o grupo de argilominerais que compõem as argilas pode ser caracterizado pelos grupos do Alofano, da Caulinita, da Illita, da Montmorilonita ou Esmectitas, da Vermiculita, da Palygorskita/attapulguita e da Clorita, sendo que os mais usados para exemplificação os dos grupos da Caulinita, da Esmectita e/ou Montmorilonita e o da Clorita.

O grupo da caulinita é caracterizada pela ligação de apenas uma camada de tetraedros de silício com uma camada de octaedros, o que forma um arranjo cristalino do tipo T-O (Tetraedro de Silício+ Octaedro de Al/Mg) de proporção 1:1 (Figura 10). Por apresentar uma estrutura eletronicamente neutra e estável, a estrutura das caulinitas possui maior atração entre as camadas T-O e conseqüentemente não possui CTC tão acentuada como às apresentadas pelo grupo das esmectitas.

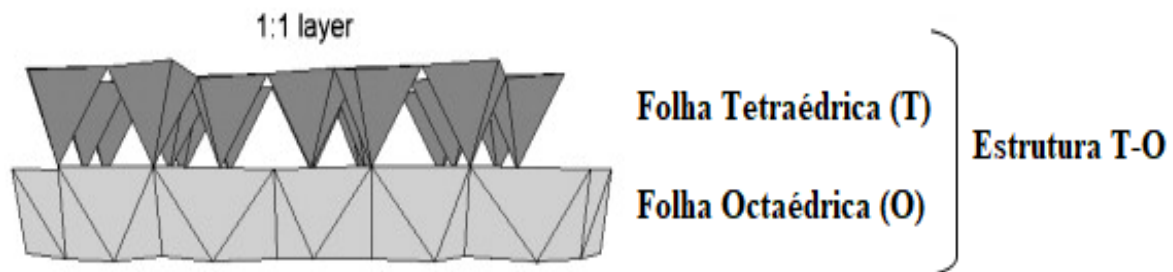


Figura 10. Figura esquemática da estrutura T-O dos argilominerais do grupo da caulinita (modificado de BRIGATTI et al., 2006).

A estrutura do grupo da esmectita e/ou montmorillonita (Figura 11) consiste em estratos constituídos por uma folha octaédrica (O) entre duas folhas de tetraedros (T), gerando uma estrutura do tipo T-O-T (ou 2:1), com “folhas e/ou camadas” de água molecular e cátions entre as camadas T-O-T. A estrutura T-O-T das esmectitas/montmorillonitas é do tipo pirofilita, ou seja, é composta por duas folhas tetraédricas unidas a uma folha octaédrica do tipo gibbsita.

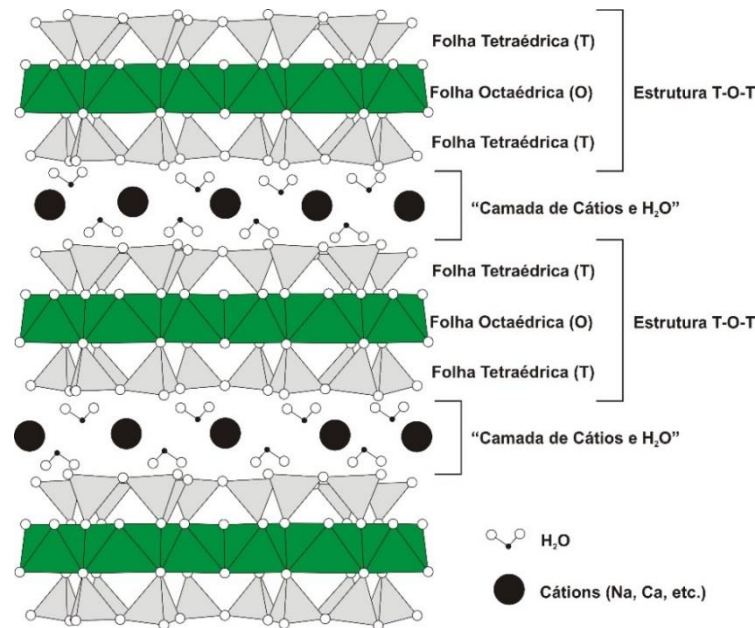


Figura 11. Figura esquemática da estrutura T-O-T dos argilominerais do grupo da esmectita e/ou montmorillonita (modificado de BRIGATTI et al., 2006).

Como a estrutura T-O-T (tipo pirofilita) é eletricamente neutra, a presença de camadas de água e cátions se deve ao fato de que, nas esmectitas e/ou montmorillonitas, existe a substituição de átomos de Si (por átomos de Al) nas folhas tetraédricas e de Al (por átomos de Mg, Fe<sup>2+</sup>, etc.) nas folhas octaédricas, o que torna as folhas eletricamente carregadas. Dado que a substituição isomórfica ocorre somente ao longo da cristalização do argilomineral, as cargas geradas permanecem imutáveis durante a existência do mineral e são denominadas de “cargas permanentes” (GATIBONI, 2017).

Uma vez formados, é necessária grande energia para quebrar as ligações e realocar átomos nas camadas T e O, o que num ambiente geológico se traduz em calor e/ou pressão mais a adição ou remoção de cátions e/ou ânions que causam a desestabilização da estrutura do argilomineral. Deste modo, as cargas permanentes geradas pela substituição isomórfica não podem ser alteradas por fatores externos como as variações de pH e salinidade do meio. Por conseguinte, a compensação de cargas geradas é feita pela presença de cátions entre os estratos (geralmente Na<sup>+</sup> e Ca<sup>2+</sup>) por meio da CTC e pela adsorção de moléculas de água por meio de ligações de hidrogênio, o que caracteriza os elevados índices de CTC presentes nestes minerais (DEER et al., 1981).

Por último, os argilominerais também podem expor uma configuração T-O-T-O de 2:1:1 (Tetraedro de Silício + Octaedro de Al/Mg + Tetraedro de Silício + Octaedro de Al/Mg) representativa do grupo da Clorita (Figura 12), que se diferencia das demais estruturas por

possuir uma folha octaédrica adicional entre as camadas como resultado da compensação das deficiências de carga por célula unitária (LAESPIGA, 2008)

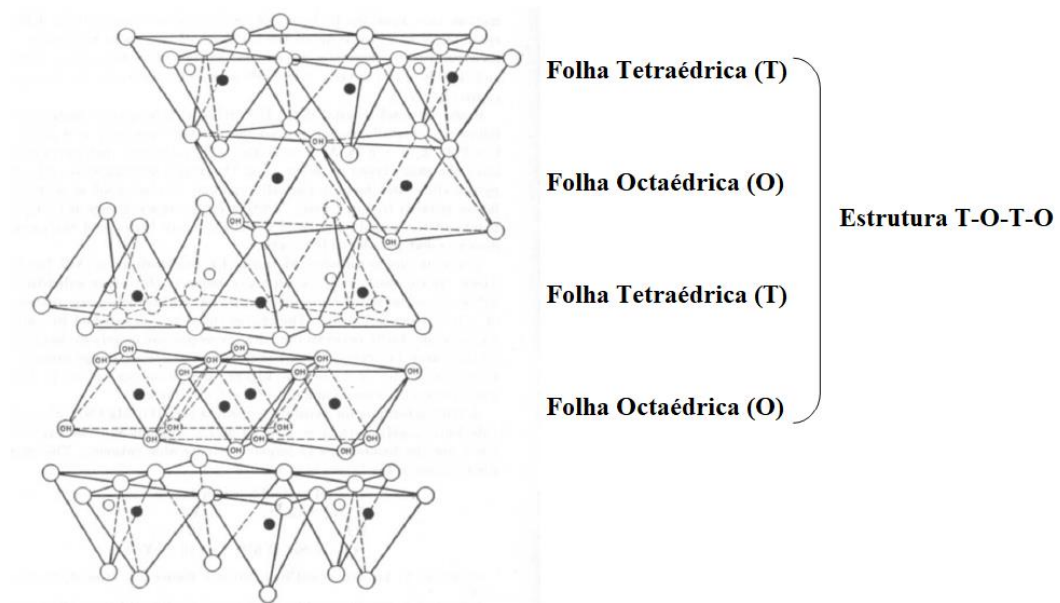


Figura 12. Configuração da estrutura do grupo das cloritas (modificado a partir de LAESPIGA, 2008).

## 4. ÁREA DE ESTUDO

A fazenda estudada situa-se dentro dos limites municipais de Santa Cruz das Palmeiras. Esse município está situado no estado de São Paulo (Anexo A) na região Sudeste do Brasil dentro da Mesorregião de Campinas e da Microrregião de Pirassununga (IBGE, 2008).

O município de Santa Cruz das Palmeiras se encontra nas coordenadas 21°49'36" S e 47°15'03" W com altitude de 644m (SANTA CRUZ DAS PALMEIRAS, 2018), cujos municípios limítrofes são Porto Ferreira, Tambaú, Casa Branca, Pirassununga e Aguai. (IBGE, 2018). O município possui área de 312 km<sup>2</sup>, onde a área urbana é equivalente à 7.856.261m<sup>2</sup>, a área de mata atlântica é correspondente a 2.760 ha e áreas de reflorestamento de 186 ha. (SANTA CRUZ DAS PALMEIRAS, 2018). A população estimada em 2017 foi de 33.455 habitantes, sendo que a população levantada no último censo feito pelo IBGE em 2010 foi 29.974 habitantes. Desta população, 29.042 habitantes vivem nas áreas urbanas e 932 moram nas zonas rurais com densidade demográfica de 101,35 hab/km<sup>2</sup> e PIB per capita de R\$12632,09 (IBGE, 2018; SANTA CRUZ DAS PALMEIRAS, 2018). As principais atividades econômicas da região são constituídas pela produção agrícola de lavouras de cana-de-açúcar, laranja e café e por atividades industriais na produção de cerâmica de telhas, refrigerantes, serralheria, confecções e aguardente.

### 4.1. Aspectos físicos

#### 4.1.1. Geologia regional

A geologia da bacia do Rio Mogi Guaçu é caracterizada por rochas neoproterozóicas de corpos graníticos do complexo Gránssico-Magmatítico e do Grupo Açungui (inseridos no contexto geológico da Província Mantiqueira) na porção mais a leste, e por sequências sedimentares paleozóicas e mesozóicas pertencentes à Bacia do Paraná em sua porção oriental (PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2013; CBH-MOGI *et.al.*, 1999).

De acordo com Milani *et.al.* (2007) e Milani (1997), a Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica localizada no continente sul-americano, situada nos territórios do Brasil meridional, leste do Paraguai, nordeste da Argentina e porção norte do Uruguai (Figura 13), totalizando uma área de cerca de 1,5 milhão de quilômetros quadrados com cerca de 5000 metros de espessura preenchida por sedimentos do Paleozóico e Mesozóico além de coberturas cenozóicas e derrames basálticos (SCHNEIDER *et. al.*, 1974).

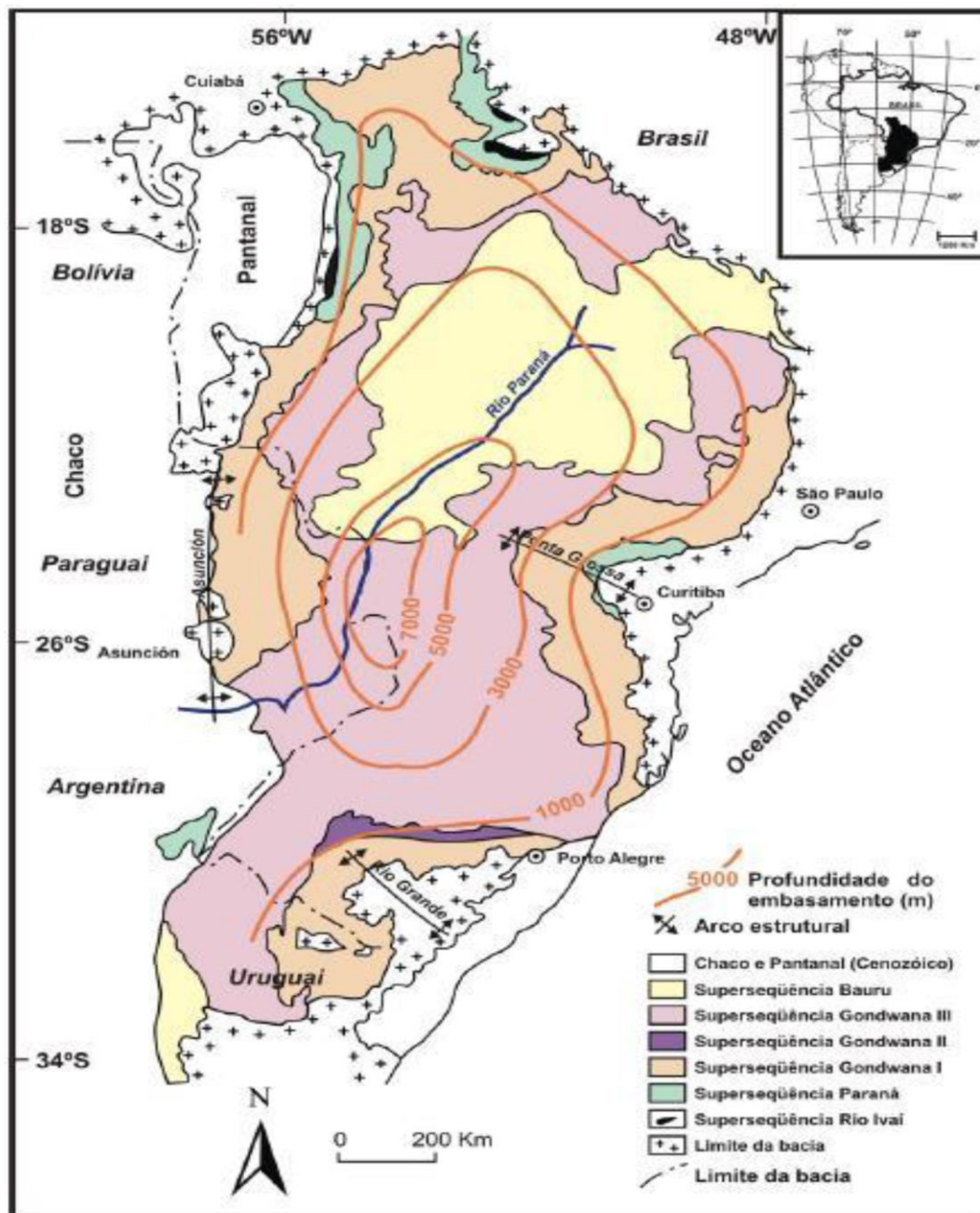


Figura 13. Mapa Geológico simplificado da Bacia do Paraná, com referências geográficas e profundidade do embasamento. Extraído de Milani (1997).

Quanto à geologia estrutural, o arcabouço tectônico da Bacia do Paraná é descrito por Siqueira (2011) como sendo marcado por grandes lineamentos estruturais orientados nas direções preferenciais NW-SE, NE-SW e E-W, sendo estas associadas a reativações de falhas do embasamento durante a evolução da bacia. Além dos lineamentos e das zonas de falha, a Bacia do Paraná também apresenta altos estruturais, que são em alguns casos associados aos grandes lineamentos regionais, cuja formação dos altos estruturais é provavelmente atribuída às reativações desses lineamentos.

Dentro do contexto da Bacia do Paraná no interior do estado de São Paulo, estão presentes as sequências litoestratigráficas do Grupo Bauru (Figura 14), localizada nas bordas leste e norte da bacia (PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2013). O Grupo Bauru está inserido dentro da Bacia do Bauru e é parcialmente cronocorrelato ao Grupo Caiuá (FERNANDES, 1998). Este Grupo é descrito por Schalch et.al. (2009) como marcado pelo soerguimento epirogênico em toda a Plataforma Sul Americana no território brasileiro após o término dos derrames de rochas básicas da Formação Serra Geral, o qual determinou o fim dos eventos deposicionais e vulcânicos generalizados na Bacia do Paraná.

Por outro lado, a porção Norte da Bacia manifestou-se como uma área negativa que causou uma fase de embaciamentos localizados na região. Durante o Cretáceo Superior, sedimentos do Grupo Bauru foram depositados nessas áreas deprimidas em sobreposição as rochas basálticas do Planalto Ocidental em grande parte do Estado de São Paulo.

Neste contexto, ocorrem depósitos arenosos oriundos de ambiente fluvial entrelaçado com lagos subordinados das Formações Adamantina e Ubereba, além de leques aluviais rudáceos marginais da Formação Marília (PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2013). Em algumas formações ocorrentes no Estado de São Paulo, há indícios de paleocorrentes com direção predominante para oeste e noroeste, que podem indicar um possível aporte de sedimentos vindos de terras topograficamente elevadas situadas a leste e a sudeste da Bacia.

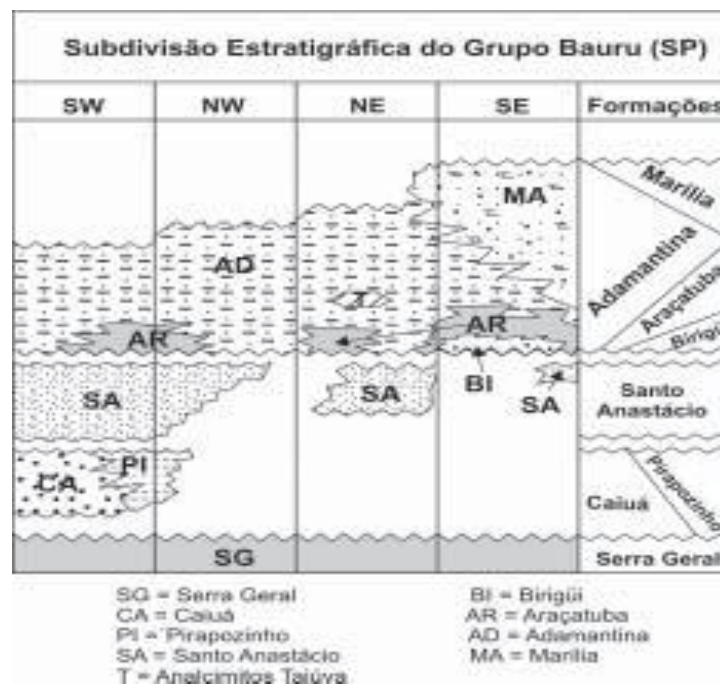


Figura 14. Relação entre as unidades estratigráficas do Grupo Bauru no Estado de São Paulo (SILVA et.al., 2005).

#### 4.1.2. Geologia local

No contexto da geologia da área de estudo da fazenda estudada, a região é caracterizada por afloramentos de rochas sedimentares da Formação Corumbataí e intrusões básicas da Formação Serra Geral. A AID também apresenta expressivas extensões das Formações Botucatu, Pirassununga e Adamantina e de depósitos cenozóicos aluvionares, além de alguns afloramentos do Complexo Varginha no Nordeste da AID e coberturas da serra de Santana na porção sudoeste (Anexo B).

A Formação Corumbataí (Pc) é constituída em sua parte inferior de argilitos, folhelhos e siltitos cinza escuros e na parte superior de argilitos, folhelhos e siltitos arroxeados a avermelhados com intercalação de carbonatos e camadas de arenito fino. Possui estruturas de laminação plano- paralela, laminação flaser, laminação cruzada, fendas de ressecamento, marcas onduladas e estruturas de estromatólitos em conjunto com calcários oolíticos. Seu pacote inferior indica paleoambiente marinho redutor de águas rasas, ao passo que sua porção superior apresenta condições de ambiente oxidante devido à progradação da sedimentação litorânea (SCHNEIDER *et.al.*, 1974).

As Formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral estão enquadradas no Grupo São Bento e são datadas nos Períodos Triássico a Jurássico (SCHALCH *et.al.*, 2009), as quais ocupam mais de 27% da AID (ARCADIS TETRAPLAN, 2011). A Formação Pirambóia (TrJp) é descrita por Schneider *et.al.* (1974) como sendo atribuída ao período Triássico e é constituída por arenitos esbranquiçados, amarelados ou avermelhados de granulometria média a muito fina com grãos subarredondados intercalados com camadas de argilito e siltito, cujas estruturas mais comuns são a estratificação cruzada planar e acanalada e estratificações planoparalelas. A Formação Botucatu (JKb) é descrita pelos autores supracitados como datada do período Jurocretáceo e é composta por arenitos avermelhados de granulometria fina a média de grãos foscos bem arredondados, sendo que em alguns afloramentos há a ocorrência de arenitos argilosos mal selecionados na base da formação.

Segundo Massoli (1983) e Silva e Antonini (1995), a Formação Pirassununga é caracterizada por sedimentos inconsolidados areno-argilosos de cor castanho claro, com ausência de estruturas sedimentares e granulação variável entre areias finas e silte grosso com baixa seleção. Também pode apresentar linhas de seixos ou cascalheiras com seixos de quartzo, quartzito e limonita na base desta unidade litoestratigráfica, além de poder atingir espessuras variáveis de até 15 metros. Em alguns trabalhos, como do EIA-RIMA de Arcadis Tetraplan (2011) e da SSRH-CSAN (2014), classificaram as unidades areno-argilosas como

pertencentes à Formação Rio Claro (como indicado no Mapa Geológico da Figura 12), ao passo em que outros autores como Massoli (1983) e Silva e Antonini (1995) as descrevem como pertencentes à Formação Pirassununga. Sobre essa questão, Silva e Antonini (1995) explicam que os sedimentos pertencentes à Formação Pirassununga são correlacionáveis à Formação Rio Claro, tendo desta forma características semelhantes entre si.

Por sua vez, a Formação Serra Geral (JKsg) é descrita como sendo correspondente a uma sequência de derrames basálticos intercalados com lentes e camadas arenosas. Suas rochas máficas são de composição toleítica de textura afanítica com cores cinza- escuras com amígdalas no topo e juntas verticais e horizontais (SCHNEIDER et.al., 1974). Na região da área de estudo, existem várias ocorrências de diques, sills e soleiras de intrusões básicas (JKβ) que ocupam 18% da AID, os quais são representantes sub-vulcânicos da Formação Serra Geral (ARCADIS TETRAPLAN, 2011).

Por último, depósitos de sedimentos cenozóicos aluvionares (Qa) são presentes principalmente como faixas alongadas e delgadas que acompanham os Rios Pardo e Mogi-Guaçu e em áreas com topografia plana lateralmente adjacentes às drenagens dos canais. Esses sedimentos são formados por camadas arenosas inconsolidadas e com alguns níveis de composição pelítica, cuja deposição ocorreu por meio de suspensão e de leques de avulsão de dique marginal nas planícies de inundação.

#### **4.1.3. Geomorfologia**

A Bacia Hidrográfica do Mogi Guaçu possui quatro grandes províncias geomorfológicas, sendo estas o Planalto Atlântico, a Depressão Periférica, as Cuestas Basálticas e o Planalto Ocidental, como retratado na Figura 15 (CBH-MOGI *et.al.*,1999).

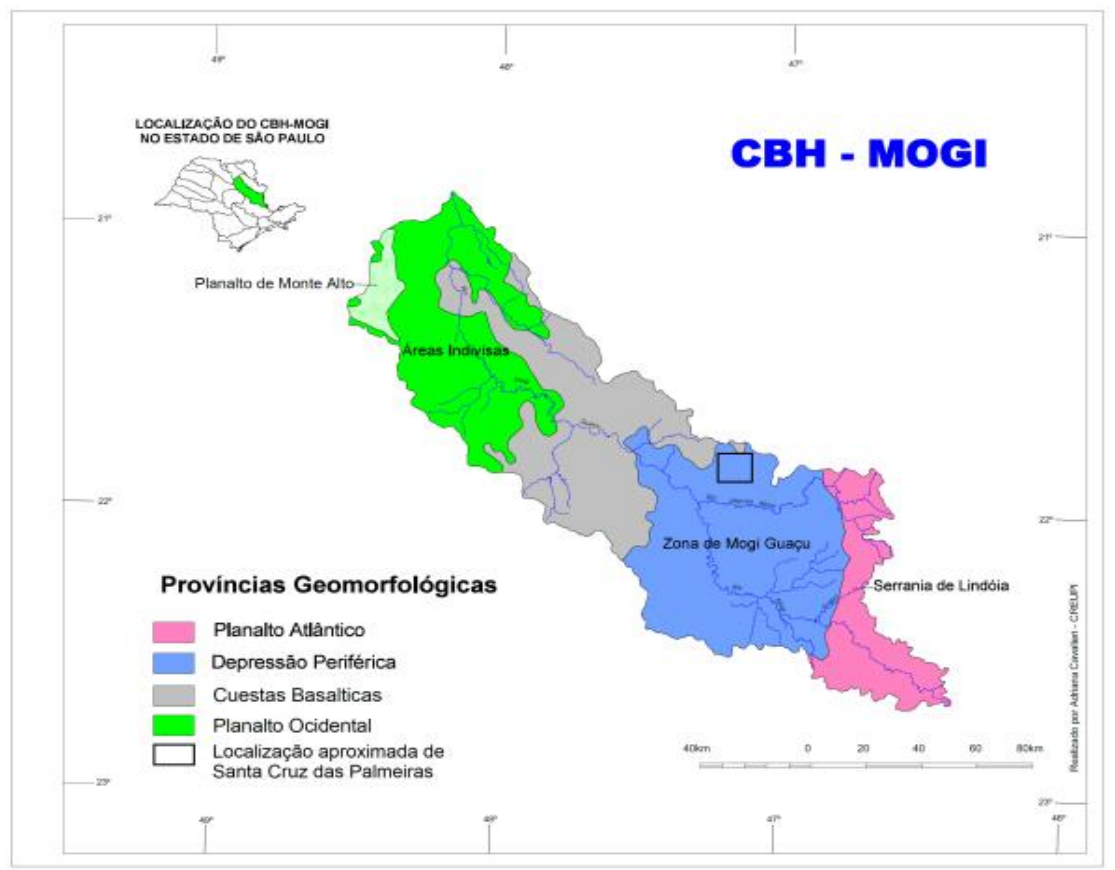


Figura 15. Mapa geomorfológico da Bacia do Rio Mogi Guaçu (CBH-MOGI et al., 1999). A localização aproximada do município de Santa Cruz das Palmeiras está marcado por um quadrado (□).

A fazenda da área de estudo e a usina sucroalcooleira da qual foi produzida a vinhaça para a fertirrigação das lavouras de cana-de-açúcar situam-se na Unidade Geomorfológica da Depressão Periférica da Zona Mogi Guaçu, sendo a segunda divisão formal usada no Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (IPT, 1981).

A unidade ou província da Depressão Periférica é caracterizada como um compartimento topográfico deprimido, que se localiza entre as serras cristalinas da faixa SE paulista pertencente à Unidade no Planalto Atlântico e as Cuestas Basálticas com direção NW. Essa unidade é correspondente à faixa de ocorrência de unidades litoestratigráficas paleozóicas e mesozóicas sotopostas pelos derrames basálticos do noroeste paulista, além de intrusões de diabásio e afloramentos de rochas do Pré-Cambriano. A oeste, as áreas da Depressão Periférica possuem composição litológica majoritária formada por areias, o que resulta na formação de solos ácidos e com baixa fertilidade (PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2017; CBH-MOGI et al., 1999).

As principais propriedades geomorfológicas da Depressão Periférica incluem a presença de formas denudacionais pouco movimentadas, formadas por áreas topograficamente

rebaixadas e relativamente homogêneas. Na área de estudo, tem-se diversos tipos de terrenos geomorfológicos, dentre eles (Anexo C): Colinas Amplas; Colinas Médias; Morros Amplos; Morrotes Alongados e Espigões; Planícies Aluviais; Morros Arredondados; Encostas Sulcada por Vales Subparalelos; Encostas com Cânions locais; Escarpas Festonadas; Mesas Basálticas e Mesas Sedimentares.

A geomorfologia local da área de estudo é composta por de *Morros Arredondados* (241), situado localmente na unidade litoestratigráfica da Formação Corumbataí e na Formação Pirambóia ao norte da fazenda (Anexos B e C). Os morros arredondados possuem declividade média acima de 15% (declives moderados a fortes na classificação apresentada por VIEIRA, 1988) e amplitudes a aproximadamente 100 a 300m. Podem ter vertentes convexas às retilíneas com feições erosivas, a exemplo de ravinas e possíveis exposições de maciços rochosos, além de topos arredondados a achatados. A densidade de drenagem pode variar de alta a média com padrões dentríticos a subdentríticos, associados à ocorrência de vales fechados (ARCADIS TETRPLAN, 2011).

Além dos Morros Arredondados, a área de estudo também apresenta na sua borda a leste relevos de *Morros Amplos* (221) localizado em alguns locais na Formação Corumbataí, parte da Formação Pirambóia nas áreas vizinhas a nordeste da área de estudo e nos derramamentos basálticos da Formação Serra Geral em sua circunvizinhança (Anexos B e C). Esse relevo é caracterizado por amplitudes entre 100 a 300 m com declividade de até 15%, topos extensos e aplainados e vertentes com perfis que variam entre retilíneos a convexas (ARCADIS TETRPLAN, 2011).

Á oeste e a sul da área de estudo, há a ocorrência de áreas de relevo de *Encostas com cânions locais* (512) com rochas sedimentares da Formação Corumbataí e de intrusões básicas (Anexos B e C). Suas principais características são definidas por amplitudes locais maiores de 100 m, declividades entre 15 a 30% (declives fortes segundo VIEIRA, 1988) e por vertentes retilíneas localmente adjacentes a áreas topograficamente rebaixadas (ARCADIS TETRPLAN, 2011).

#### **4.1.4. Pedologia**

O tipo de solo predominante na área de estudo é caracterizado por latossolos vermelhos escuros. Os latossolos vermelhos escuros presentes na fazenda da área de estudo são solos muito intemperizados e muito profundos com altas concentrações de argilominerais (garantindo-lhe uma textura argilosa) e altos teores de óxidos de ferro, que lhe dão uma

coloração avermelhada muito intensa, e de óxidos de alumínio. Sua classe textural característica varia de média a muito argilosa, sendo possível a tendência para frações mais arenosas.

Uma vez que este tipo de solo é associado a relevos pouco movimentados e com baixa declividade, este é considerado adequado para à agricultura, além de conter boas propriedades físicas como elevada porosidade total e alta friabilidade que facilitam o cultivo. Todavia, os latossolos vermelho-escuros podem apresentar baixa disponibilidade de nutrientes em solos distróficos e também elevadas concentrações de  $Al^{3+}$  que podem representar em alta toxicidade às plantas, sendo necessário um correto manejo para este tipo de solo se torne produtivo.

Além da presença dos latossolos vermelhos escuros, a região também apresenta áreas consideráveis contendo latossolos vermelho-amarelos, além de algumas zonas que possuem outras variedades de solos como argissolos (ou podzólicos) vermelho-amarelos, gleissolos háplicos e neossolos flúvicos, litólicos e quartzênicos, os quais são distribuídos de acordo com o relevo e a litologia do substrato (ARCADIS TETRAPLAN, 2011; PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2017; CBH-MOGI *et.al.*,1999).

#### **4.1.5. Recursos hídricos**

A área de estudo está inserida na 9ª Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI 9) na Bacia do Rio Mogi Guaçu, sob a responsabilidade do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu, cuja sigla é *CBH MOGI* (PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2017; CBH-MOGI *et.al.*,1999). Essa bacia ocupa parte da região nordeste do Estado de São Paulo e o sudoeste de Minas Gerais, tendo como área de 14.653 Km<sup>2</sup> (Figura 16).

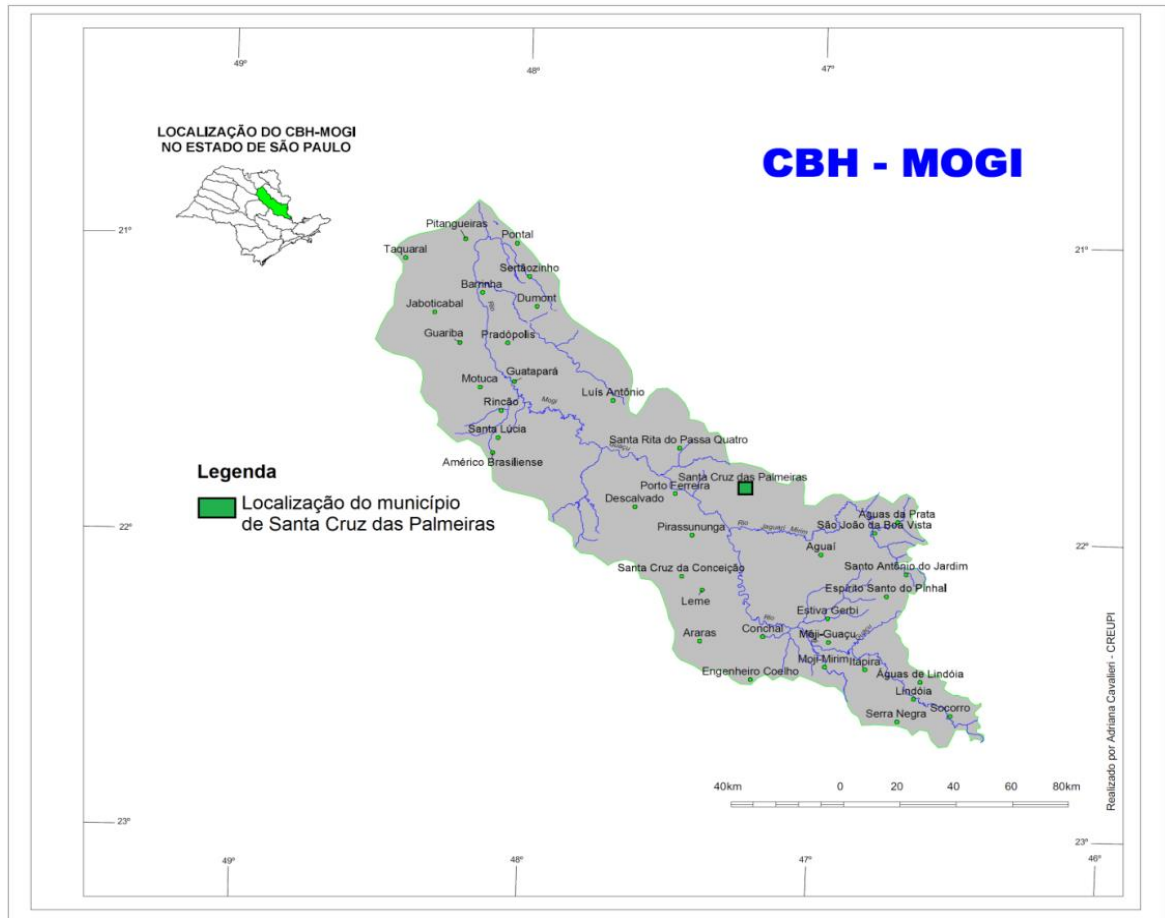


Figura 16. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu no estado de São Paulo (CBH-MOGI et al.,1999). O município de Santa Cruz das Palmeiras está marcado no mapa por um quadrado com fundo verde (■).

A nascente do Rio Mogi Guaçu é localizada no Morro do Curvado no município de Bom Repouso (MG), a qual aflora do planalto cristalino a uma altura aproximada de 1650 m. Ao todo percorre uma distância de 473 km nos estados de São Paulo e Minas Gerais, até desaguar no Rio Pardo no município de Pontal. Seus principais afluentes são os rios Oricanga, Itupeva, Cloro, Jaguari Mirim, Eleutério, do Peixe, do Roque, Quilombo e Mogi Mirim.

Na região da área de estudo, as nascentes comumente afloram entre o contato das Formações Pirambóia/Botucatu com a Formação Corumbataí/Estrada Nova, e os arenitos da Formação Pirassununga. Em aspectos hidrogeológicos, a área possui aquíferos subterrâneos do tipo livre principalmente nas Formações Pirambóia/Botucatu e Pirassununga e possuem elevada permeabilidade e transmissibilidade, com vazões que variam entre 10 m<sup>3</sup>/h a 50 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.1.6. Clima

O clima da região aonde se encontra a área de estudo é caracterizado por ser do tipo tropical subsequente úmido, com temperaturas médias entre 15°C e 18°C em pelo menos um mês e situado à aproximadamente 600 metros acima do nível do mar (ARCADIS TETRPLAN, 2011).

De acordo com a classificação climática do Sistema Internacional de Koeppen-Geiger, a área se encontra dentro do clima CWA do tipo mesotérmico de inverno seco e verão quente e chuvoso, cuja temperatura média do mês mais frio atinge valores inferiores à 18°C e apresenta temperaturas médias superiores à 22°C no mês mais quente. Os ventos predominantes na região são do tipo alísios com velocidades médias de 5,4 km/h, com a capacidade de alcançar velocidades máximas de 7 km/h, e com direção preferencial de norte-leste com maior tendência à leste (ARCADIS TETRPLAN, 2011; PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2017).

A precipitação e temperatura anual média da área de estudo (Figura 17) expõe que a estação seca ocorre nos meses de abril a setembro, sendo congruente com o período com menores temperaturas nos meses de maio, junho, julho e agosto, cuja temperatura mais baixa equivalente a 17°C no mês de julho.

Em contrapartida, a estação mais chuvosa ocorre nos meses de outubro a março, a qual também indica temperaturas mais elevadas com valores máximos de aproximadamente 25°C em fevereiro. Os meses mais quentes e com maiores índices de precipitação são os meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Desta forma, o padrão de precipitação e temperaturas desta área resume-se a uma época seca com baixas temperaturas no meio do ano intercalada com uma época chuvosa e quente nos primeiros e últimos meses (apresentando um gráfico de parábola), que indica um comportamento climático característico de clima tropical.

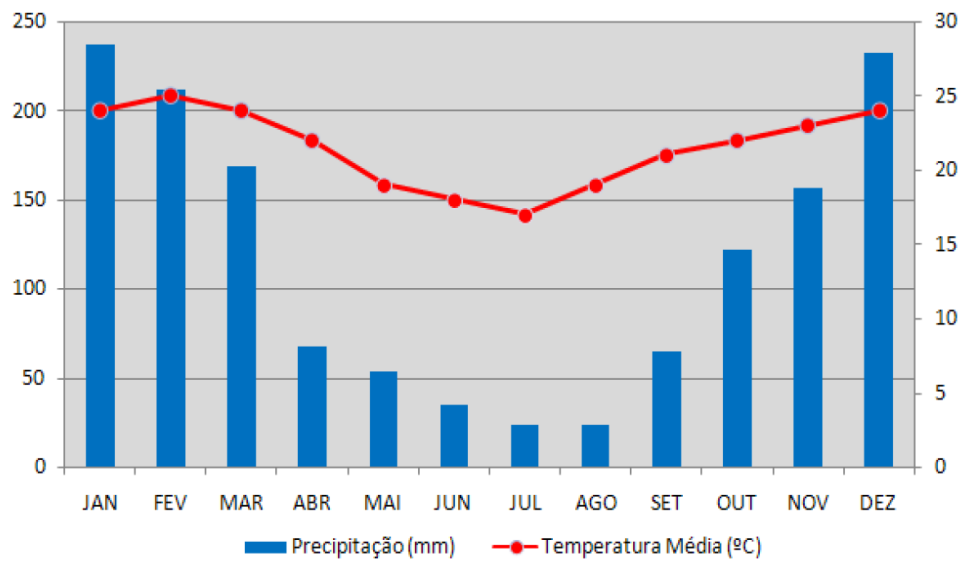


Figura 17. Gráfico das Temperaturas e precipitações médias para o município de Pirassununga do período de 1971 a 1990 (ARCADIS TETRPLAN, 2011).

#### 4.1.7. Balanço hídrico

Segundo o Plano de Aplicação de Vinhaça (2017), o estudo do balanço hídrico de uma região é de extrema importância para a correta aplicação da vinhaça pela fertirrigação, uma vez que este efluente é aplicado no período de déficit hídrico correspondente à época de seca de inverno como forma de fornecer nutrientes para a fertilização do solo e de abastecimento de água para a safra em condições de extremo estresse hídrico. A Tabela 6 mostra os parâmetros médios do balanço hídrico climático mensal de Pirassununga e de seus arredores, que expõe os índices médios de precipitação, temperatura e evapotranspiração.

Tabela 6. Balanço Hídrico mensal de Pirassununga e Região: *T*, temperatura; *P*, precipitação; *ETP*, Evapotranspiração Potencial; *P-ETP*, diferença da precipitação com a Evapotranspiração Potencial; *NEG-AC*, Negativo acumulado; *ARM*, armazenamento de água no solo; *ALT*, alteração da umidade do solo ; *ETR*, Evapotranspiração real ou efetiva; *DEF*, Deficiência Hídrica; *EXC*, Excedente hídrico (Plano de Aplicação de Vinhaça, 2017).

<b>Meses</b>	<b>T</b> °C	<b>P</b> mm	<b>ETP</b> mm	<b>P-ETP</b> mm	<b>NEG-AC</b>	<b>ARM</b> mm	<b>ALT</b> mm	<b>ETR</b> mm	<b>DEF</b> mm	<b>EXC</b> mm
Jan	24,2	329,0	120,88	208,1	0,0	100,00	0,00	120,9	<b>0,0</b>	<b>208,1</b>
Fev	24,3	285,1	111,2	173,9	0,0	100,00	0,00	111,2	<b>0,0</b>	<b>173,9</b>
Mar	23,8	158,3	112,5	46,0	0,0	100,00	0,00	112,3	<b>0,0</b>	<b>46,0</b>
Abr	21,8	48,0	82,76	-34,7	-34,7	70,67	-29,33	77,4	<b>5,4</b>	<b>0,0</b>
Mai	19,5	113,5	61,55	52,0	0,0	100,00	29,33	61,5	<b>0,0</b>	<b>22,6</b>
Jun	18,3	7,7	48,89	-41,2	-41,2	66,24	-33,76	41,5	<b>7,4</b>	<b>0,0</b>
Jul	18,1	26,8	48,79	-22,0	-63,2	53,16	-13,08	39,9	<b>8,9</b>	<b>0,0</b>
Ago	20,0	28,5	64,29	-35,8	-99,0	37,17	-15,99	44,5	<b>19,8</b>	<b>0,0</b>
Set	21,6	65,2	79,22	-14,0	-113,0	32,31	-4,86	70,1	<b>9,2</b>	<b>0,0</b>
Out	22,6	119,2	96,67	22,5	-60,1	54,84	22,53	96,7	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
Nov	23,1	211,1	103,81	107,3	0,0	100,00	45,16	103,8	<b>0,0</b>	<b>62,1</b>
Dez	23,6	329,6	116,79	212,8	0,0	100,00	0,00	116,80	<b>0,0</b>	<b>212,8</b>
<b>Totais</b>	<b>260,9</b>	<b>1722,0</b>	<b>1047,09</b>	<b>674,9</b>	<b>-----</b>	<b>914,0</b>	<b>0,00</b>	<b>996,40</b>	<b>50,7</b>	<b>725,6</b>

A partir destes dados, os gráficos foram construídos referentes ao balanço hídrico normal mensal com os valores de precipitação, Evapotranspiração Potencial (ETP) e Evapotranspiração real ou efetiva (ETR) do município de Pirassununga (Figura 18), e o gráfico da Figura 19 do extrato do balanço hídrico com os índices de deficiência e excedente hídricos.

Segundo Arcadis Tetraplan (2011), a ETP é um parâmetro que expressa máxima capacidade de água que pode ser perdida na forma de vapor de acordo com uma condição climática específica, através de um meio contínuo de vegetação que cobre toda a superfície do solo e se apresenta na capacidade de campo ou acima desta. Por conseguinte, a ETP é caracterizada pela evaporação do solo e pela transpiração da vegetação contida em um espaço específico em um dado período.

Por sua vez, a Evapotranspiração real ou efetiva (ETR) representa a soma total da transferência de vapor para o meio atmosférico quando evaporada pela superfície e transpirada pelas plantas em circunstâncias indicadas por parâmetros atmosféricos atuais, pela umidade do solo e pelo manejo de cultura.

Em relação ao gráfico do extrato do balanço hídrico (BH), este é calculado através da diferença da precipitação (P) com a ETP subtraída da alteração da umidade do solo ou ALT, expresso pela fórmula  $BH = (P - ETP) - ALT$ , onde o excedente hídrico é correspondente aos valores positivos  $[(P - ETP) - ALT \geq 0]$  e a deficiência hídrica aos valores negativos  $[(P - ETP) - ALT < 0]$  do cálculo de BH (SANTOS, 2002).

A deficiência hídrica mensal também pode ser calculada através da diferença entre a ETP e a ETR ( $DEF = ETP - ETR$ ). Esta ocorre em períodos em que a quantidade de precipitação é insuficiente para suprir totalmente a ETP com redução do armazenamento de água do solo para valores nulos (TUBELIS; NASCIMENTO, 1986), resultando em valores negativos de (P-ETP) nos meses de deficiência hídrica apresentados na área de estudo (Tabela 6).

Desta forma, o gráfico do balanço hídrico mensal (Figura 18) demonstra que grande parte das chuvas ocorreu no período entre os meses de Outubro a Abril, com destaque nos meses de dezembro com taxas de precipitação de 329,6 mm, janeiro com 326 mm e fevereiro com 285,1 mm. Em contrapartida, os meses de junho a setembro expõem um período com baixos índices de precipitação e, portanto, é a época do ano mais seca na região de Pirassununga, sendo o mês de junho o que apresentou o menor valor com 7,7 mm.

Por sua vez, os meses de abril, junho, julho, agosto e setembro apresentaram deficiência hídrica ao longo do ano, com valor total de 50,7 mm/anual (Figura 19). Os meses de julho, agosto e setembro foram os que demonstraram maiores índices de deficiência, correspondentes a 8,9 mm, 19,8 mm e 9,2 mm, respectivamente. Em relação às variações do excedente hídrico (Figura 19), estes foram detectados no período entre outubro até o fim de março e o mês maio, resultando em um total de 725,6 mm/ano, sendo que os maiores valores de excedente foram observados nos meses de dezembro e janeiro com valores respectivos de 212,8 mm e 208,1 mm (PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2017; AMARAL et al., 2014).

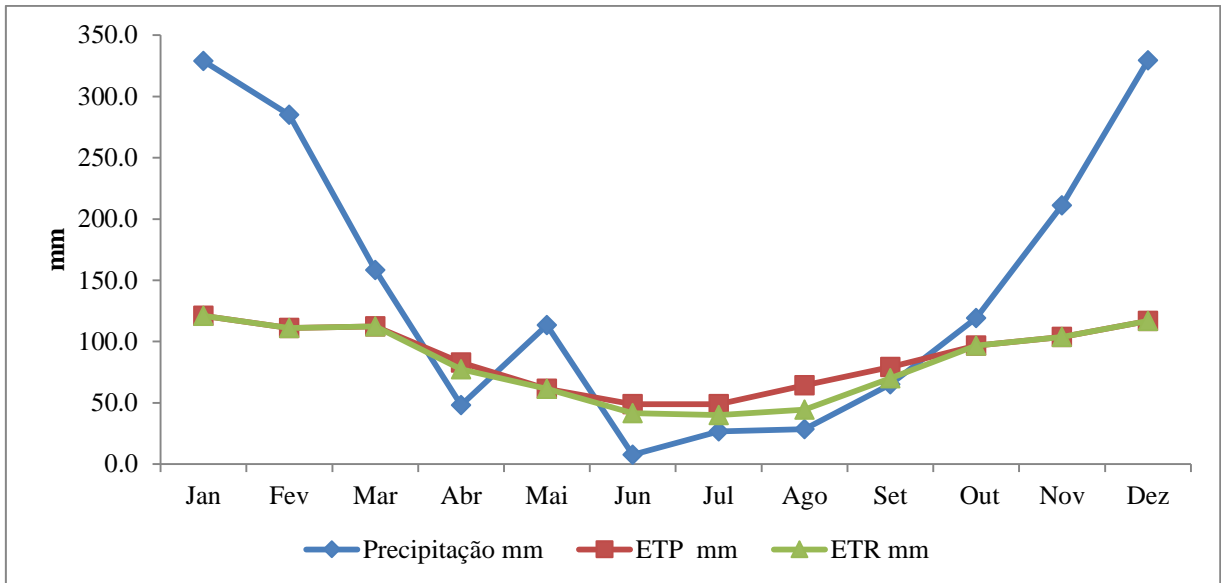


Figura 18. Gráfico do Balanço Hídrico Normal Mensal do município de Pirassununga e região, com as variações milimétricas de Precipitação, Evapotranspiração Potencial (ETP) e Evapotranspiração Real (Plano de Aplicação de Vinhaça, 2017).

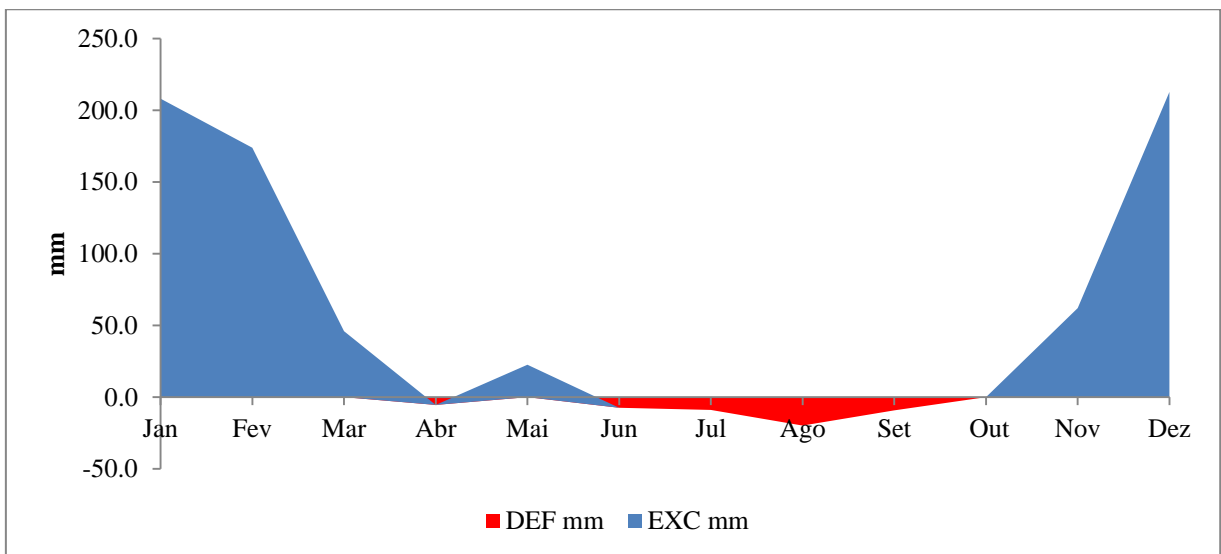


Figura 19. Extrato do Balanço Hídrico Mensal do município de Pirassununga e região, construído a partir dos dados de Plano de Aplicação de Vinhaça (2017).

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada constitui-se, primariamente, pelo levantamento bibliográfico de dados da aplicação da vinhaça no solo e pela definição das características físico-químicas dos solos consultados nos relatórios dos PAVs da Fazenda do município de Santa Cruz das Palmeiras, referente ao período de 2012 a 2017. Também foi feito um campo realizado no dia 27 de Março de 2018, onde foram coletadas seis amostras em três locais da Fazenda (P1, P2, P3), obtidas nos perfis de solo com 30 cm e 100 cm de profundidade.

Os relatórios dos PAVs usados no estudo foram consultados na sede da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) de Mogi Guaçu, os quais são apresentados anualmente ao órgão ambiental contendo informações sobre o monitoramento da qualidade ambiental e fertilidade dos solos das fazendas fertirrigadas, sobre a dosagem da vinhaça produzida pela usina sucroalcooleira e o impacto ao meio físico subterrâneo através da análise de poços de monitoramento, de acordo com a Norma Técnica P4.231 – Vinhaça: Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola (CETESB, 2015).

Os dados dos cálculos da dosagem de vinhaça na fazenda (Eq.1 da página 9) foram comparados com as propriedades físico-químicas do solo, além da análise das propriedades físico-químicas do efluente. Os principais parâmetros das propriedades físico-químicas da vinhaça e da fertilidade do solo estão indicados na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros analisados da caracterização físico-química da vinhaça e do solo a partir dos Planos de Aplicação da Vinhaça, de acordo com a Norma Técnica P4.231(CETESB, 2015).

<b>Vinhaça - Norma Técnica P4.231</b>	<b>Solo - Parâmetros de Fertilidade apresentados nas PAVs</b>
pH	Matéria Orgânica (g.dm <sup>-3</sup> )
Sólidos Suspensos Totais (SST)	pH CaCO <sub>2</sub>
Dureza ou alcalinidade total (mgCaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Potássio K <sup>+</sup> (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> ) <sup>2</sup>
Condutividade elétrica;	Sódio Na <sup>+</sup> (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )
Nitrogênio nitrato NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N L <sup>-1</sup> );	Cálcio Ca <sup>2+</sup> (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )
Nitrogênio nitrito NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg N L <sup>-1</sup> )	Magnésio Mg <sup>2+</sup> (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )
Nitrogênio amoniacal NH <sub>3</sub> (mg N L <sup>-1</sup> );	Alumínio Al <sup>3+</sup> (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )
Nitrogênio Kjeldhal (mgL <sup>-1</sup> );	Hidrogênio e Alumínio H + Al (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )
Sódio Na <sup>+</sup> (mgL <sup>-1</sup> );	Hidrogênio H <sup>+</sup> (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )
Cálcio Ca <sup>2+</sup> (mgL <sup>-1</sup> );	Soma de bases (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )
Potássio K <sup>+</sup> (mgL <sup>-1</sup> );	CTC (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )
Sulfato SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mgL <sup>-1</sup> );	Saturação de Al - m (%)
Fósforo P <sub>Total</sub> (mgL <sup>-1</sup> )	Saturação de Bases - V (%)
DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio)	K na CTC (%)
DQO (Demanda Química de Oxigênio)	Ca na CTC (%)
	Mg na CTC (%)
	Na na CTC (%)

A caracterização das fases minerais constituintes do solo existente na área de estudo foi feita por meio da análise granulométrica, química e mineralógica das amostras de solos coletadas. Essas análises foram feitas através do peneiramento e pesagem das amostras e por meio dos ensaios de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX) e de Difração de Raios-X (DRX), com o intuito de caracterizar os possíveis argilominerais e outros minerais presentes no latossolo vermelho da região de estudo e observar os possíveis efeitos em sua interação com a dosagem de vinhaça.

Desta forma, ao longo do trabalho de pesquisa foram avaliados:

- a. Características químicas e de fertilidade do solo.

<sup>2</sup> Nos PAVs, os dados da fertilidade que estavam em mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> (como na Tabela 3) foram convertidos em cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> nos cálculos da dosagem do volume de vinhaça, porém ambas as unidades estão corretas.

- b. Análise temporal: caracterização do solo no período de 2012 a 2017 para uma mesma gleba.
- c. Análise espacial das glebas da fazenda: Para uma mesma data, efetuar a análise de glebas diferentes de uma mesma fazenda para comparação das condições químicas e de fertilidade do solo.
- d. Correlação entre esses dados e os dados de entrada: localização da área, quantidade de vinhaça destinada a essas áreas, caracterização da vinhaça nas datas e nos pontos escolhidos ou na safra e informações que possam ser de interesse mineralógico ou relacionado à geologia, geomorfologia, pedologia e balanço hídrico.

### **5.1. Descrição dos trabalhos de campo**

As glebas amostradas da fazenda estudada (Figura 20) foram inicialmente escolhidas a partir de coordenadas das glebas 27 e 56 nos dados de aplicação de dosagem de vinhaça no PAV de 2017 (Tabela 8), com a adição de mais um local de coleta da amostra de solo na gleba 29. A amostra de solo obtida no ponto P3 pode ser considerada como uma amostra em branca, uma vez que está localizada no limite da fazenda.

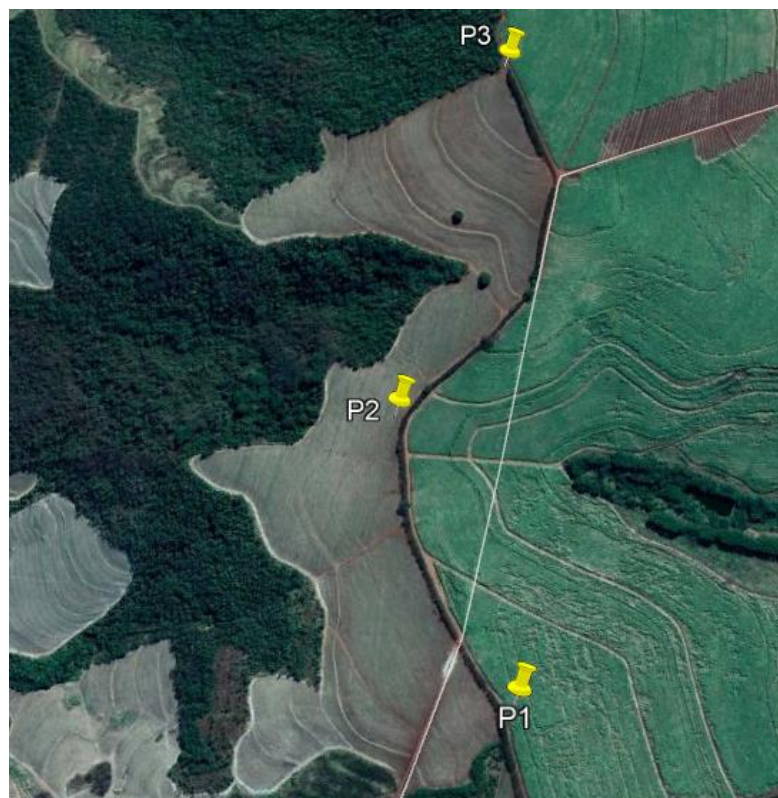


Figura 20. Imagem do Google Earth das três amostragens da Fazenda.

Tabela 8. Tabela de informações das amostragens da Fazenda.

Ponto	Talhão	UTM			Folha IBGE	Código da Folha
		X	Y	Z		
P1	Gleba 27	264257	7588657	792m	Pirassununga	SF-23-V-C-V-3
P2	Gleba 29	264034	7589196	789m	Pirassununga	SF-23-V-C-V-3
P3	Gleba 56	264245	7589916	822m	Pirassununga	SF-23-V-C-V-3

Em cada ponto amostrado, um trado foi utilizado para coletar amostras de profundidades de perfis de solo de 30 cm e 100 cm (Figura 21). As amostras foram então armazenadas dentro de sacos plásticos identificados com o número do ponto de amostragem, fazenda na qual foram situadas, as coordenadas geográficas e a profundidade da amostra de solo coletada (Figura 22). A identificação foi feita tanto na etiqueta como foi escrita com caneta piloto no próprio saquinho, além de ter sido escrita em um pedaço de papel que foi dentro do saquinho junto com a amostra. Ao alcançar a profundidade desejada para cada tipo de amostra, o solo foi retirado da ponta do trado e foi colocado dentro de cada saquinho com sua devida identificação, sendo às vezes necessário o uso de uma marreta para o desprendimento do solo do trado (Figuras 23 e 24).



Figura 21. Coleta das amostras de solo de profundidades de 30 cm e 100 cm no primeiro ponto da Fazenda (P1) usando um trado.

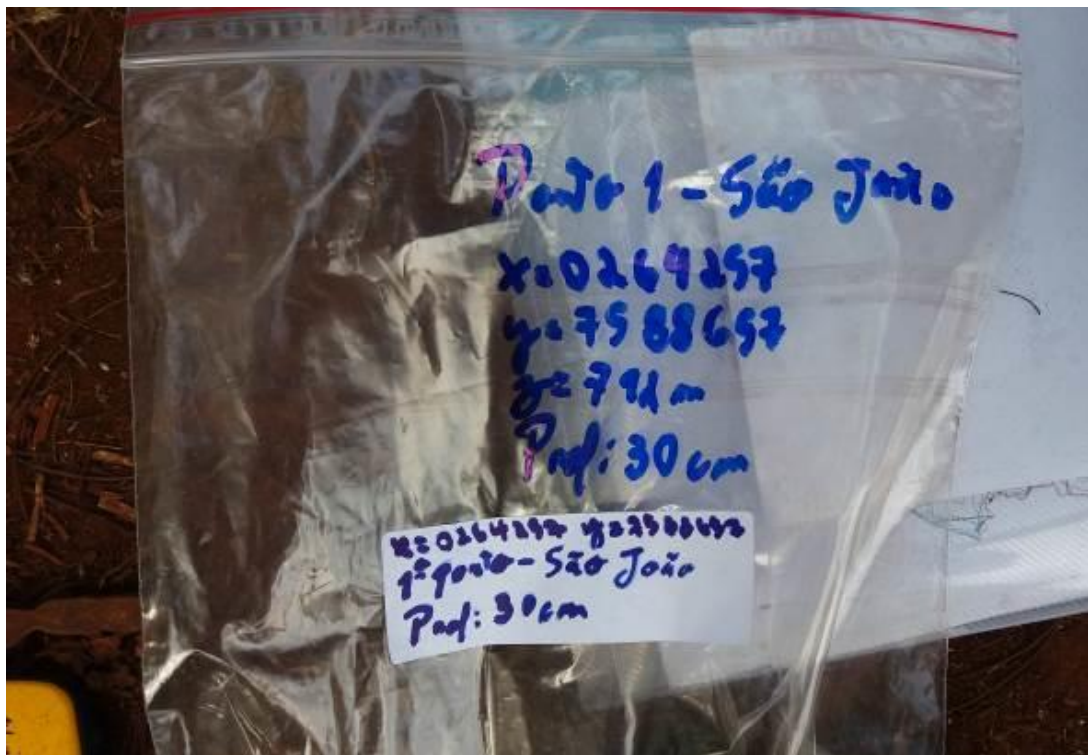


Figura 22. Identificação dos sacos plásticos com a identificação das amostras, coordenadas e profundidades.



Figura 23. Coleta da amostra de amostra de profundidade de 100 cm no segundo ponto da fazenda (P2) usando um martelinho para desprender o solo do trado para dentro dos sacos plásticos.



Figura 24. Amostragem de perfil de solo de profundidade de 30 cm no terceiro ponto da Fazenda (P3).

## 5.2. Granulometria

A análise granulométrica por peneiramento ocorreu através das seguintes etapas: Primeiramente os torrões de solo das amostras foram desagregados antes de serem pesados. Esse processo pôde ser feito tanto manualmente quanto com um auxílio de um martelo. Em caso de torrões muito difíceis de serem despedaçados, foi possível fracionar os torrões usando um almofariz e um pistilo (Figura 25). Os torrões foram colocados aos poucos no almofariz e

fracionados em movimentos suaves para que não ocorresse o tritramento dos grãos do solo que pudesse afetar os resultados da análise.

O almofariz teve que ser lavado usando esponja e detergente após cada uso para que não houvesse nenhum resíduo. Também teve que ser bem enxaguado e seco para que não houvesse gotículas de detergente e água remanescentes, pois poderiam ocorrer reações das partículas coloidais do solo com o detergente. O recomendado foi usar um almofariz de porcelana ao invés de um de plástico, uma vez que um almofariz feito deste material pode apresentar ranhuras que propiciam a retenção das partículas do solo no objeto usado.



Figura 25. Desagregação de torrões de solo com o auxílio de um almofariz e um pistilo.

Após o fracionamento dos torrões, as amostras de solo foram pesadas em balanças de precisão antes de serem peneiradas (Figura 26). O Béquer foi colocado sobre a balança e tarou-se o seu peso para que fosse desconsiderado ao pesar as amostras. As amostras foram depositadas aos poucos dentro do Béquer com uma espátula até alcançar o peso de 100 gramas. Depois de pesada, a amostra teve que ser colocada em um saquinho com sua identificação e o peso medido. Ao retirar a amostra do Béquer, utilizou-se um pincel para recolher todo o resíduo de solo restante no frasco.

O Béquer usado tinha que estar sempre lavado, enxugado e colocado em uma estufa a uma temperatura de 50°C antes de ser usado novamente em uma nova pesagem. Utilizaram-se dois Béqueres nesse processo, pois enquanto um dos frascos estava secando na estufa pôde-se usar o outro para fazer a pesagem da amostra seguinte.



Figura 26. Pesagem de 100g de amostras de solo usando um Béquer em uma balança de precisão.

As peneiras foram colocadas na ordem das malhas de maior abertura (5 mesh) para menor abertura (500 mesh) com um fundo. Depois a amostra de solo de 100 gramas foi despejada na primeira peneira do topo. Em seguida, as peneiras foram colocadas no agitador de peneiras (ou mesa vibratória) e foram rosqueadas com uma tampa, como indicado na Figura 27.



Figura 27. Peneiramento das amostras de solo usando um agitador de peneiras.

Esperou-se um tempo mínimo de 15 minutos para a agitação das peneiras e a consequente obtenção de cada fração granulométrica do solo. Terminada a agitação, cada fração retida nas peneiras foi removida com o auxílio de um pincel para dentro de sacos plásticos identificados com o número da amostra, a malha da peneira utilizada e a massa pesada. As peneiras tinham que ser lavadas com álcool e água toda vez em que foram usadas, usando pincéis e escovas de dente para retirar todos os grãos presos em suas malhas. No caso de peneiras de abertura mais fina, a lavagem foi feita por meio de uma máquina de limpeza de Ultrassom no período mínimo aproximadamente de 12 minutos.

Após o peneiramento, as frações obtidas foram pesadas novamente na balança de precisão. Nesta etapa teve-se que retirar o máximo de material dos sacos plásticos usando pincéis para sua disposição nos Béqueres.

Por último, foi feito o cálculo da porcentagem da massa da fração retida em cada malha peneirada em relação aos 100 gramas iniciais de solo pesado com o intuito de obter um representativo da porcentagem da granulometria do solo estudado. Foi comumente observado através dos cálculos que houve uma porcentagem de perda do material em relação à pesagem inicial da amostra, que poderia ter sido causada devido ao seu manejo no ensaio através da

dispersão de partículas finas do solo no ar ou na retenção de parte do material nos equipamentos usados. Contudo, a perda da amostra em relação à pesagem inicial não deveria ser maior que 5% para que fosse considerada como representativa do solo pesquisado. Caso contrário, a amostra teria que ser desconsiderada e seria necessário fazer uma nova pesagem e o peneiramento de outra amostra do mesmo material coletado para que a perda fosse inferior a 5%.

### **5.3. Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX)**

A análise química das amostras de solo foi feita através da FRX, realizado no laboratório situado no Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM) da UNESP, campus Rio Claro. No ensaio foram analisados os elementos maiores, sendo estes SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, LOI, além das concentrações em ppm de elementos traços de Cr, Ni, Ba, Rb, Sr, La, Ce, Zr, Y, Nb, Cu, Zn, Co, V e Ga.

### **5.4. Difração de Raios-X (DRX)**

A análise mineralógica das amostras de solo foi realizada através do método de DRX, capaz de determinar a estrutura cristalina dos minerais componentes do solo através dos ângulos de incidência e de reflexão das radiações eletromagnéticas de raios X ao interagirem com os planos de átomos paralelos do mineral, formando feixes difratados por interferência construtiva que são detectados pelo difratômetro (LAESPIGA, 2008; SCAPIN, 2013; QUEIROZ; KUROSAWA; BARRETO, 2017).

Após a análise química das amostras pela FRX, as seis amostras da fazenda foram colocadas em pastilhas de pó prensadas para o ensaio da DRX (Figuras 28 e 29). Cada uma das pastilhas foi então inserida no Difratômetro de Raios-X (Figura 30) da marca PANalytical Empyrean, disponível nas dependências do Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM) da UNESP de Rio Claro, em radiação CuK<sub>α1</sub> ( $\lambda=1,54060 \text{ \AA}$ ), com ângulo  $2\theta$  de início em  $3^\circ$  e de término em  $65^\circ$ , passo de 3,81s e tamanho do passo de  $0,008^\circ$ . A operação do equipamento foi realizada com tempo total de análise de 54 minutos, em amperagem de 30 mA e voltagem de 40 mV. Os resultados obtidos foram interpretados com a ajuda do software X'Pert Highscore Plus, com base no banco de dados ICDD PDF2.



Figura 28. Disposição da amostra de solo na pastilha prensada.



Figura 29. Pastilhas prensadas das seis amostras de solo da Fazenda da área de estudo.



Figura 30. Inserção da pastilha com a amostra no difratômetro de Raios-X.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1. Parâmetros físico-químicos da vinhaça

Os resultados da caracterização físico-química da vinhaça adquiridos nos PAVs de 2012 a 2017 (Tabela 9) fornecem dados de pH, cátions de base ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ ),  $R_{DQO/DBO}$  (relacionado a MO) e  $Na^+$  (salinidade), que podem causar efeitos nos parâmetros de fertilidade do solo com a aplicação de vinhaça ao longo dos anos, tendo sido comparados com os valores de referência obtidos por Fuess (2013) no ano de 2010 para a mesma usina da área de estudo.

A variação do pH da vinhaça no período de 2012 a 2017 teve valor mínimo de 3,8 na segunda amostra de vinhaça de 2016 e valor máximo de 6,07 na amostra de 2015. Todos os valores de pH analisados nas amostras de vinhaça foram ácidos, porém a amostra de 2015 foi a mais próxima de um pH neutro. De modo geral, a maioria das medições de pH das amostras de vinhaça no período de 2012 a 2017 foram semelhantes ao pH de 4,59 obtido por Fuess (2013) no ano de 2010.

A variação da concentração de  $K^+$  na vinhaça ao longo do período estudado teve valor máximo de  $4918 \text{ mg.L}^{-1}$  da amostra 1 no ano de 2016 e valor mínimo de  $8,8 \text{ mg.L}^{-1}$  na amostra coletada em 2014. A maioria das concentrações de  $K^+$  foram bastante elevadas, com uma média de  $1857,55 \pm 1718,83 \text{ mg.L}^{-1}$  da concentração de  $K^+$  de todas as amostras obtidas de 2012 a 2017.

Comparando com a média obtida por Fuess (2013) de  $1330,40 \pm 0,10 \text{ mg.L}^{-1}$ , a média e o desvio padrão das amostras analisadas foi consideravelmente maior, porém a média obtida por Fuess (2013) foi apenas para o ano de 2010 utilizando dados de 3 análises ( $n=3$ ) da vinhaça coletada naquele ano, ao passo em que a média dos resultados adquiridos nos PAVs considerou os dados de um período maior de seis anos com várias amostras de vinhaça diferentes, conseqüentemente os resultados tiveram variação maior que a do valor descrito por Fuess (2013).

Tabela 9. Caracterização físico-química da vinhaça do período de 2012 a 2017 e comparação com os resultados de Fuess (2013).

Parâmetro	Unidade	Resultados Analíticos da Vinhaça da Usina Sucroalcooleira								
		2012	2013 <sup>(1)</sup>	2013 <sup>(2)</sup>	2014	2015	2016 <sup>(1)</sup>	2016 <sup>(2)</sup>	2017	2010 <sup>(*)</sup>
pH	---	4.38	4.31	3.94	4.62	6.07	4.68	3.80	4.90	4.59
SST	---	1060	1600	970	1906.67	2860	7880	6740	...	2757.50±150.64 (n=4)
CE	dS/m	6.47	10.58	4.44	0.01	5.29	0.03	13.09	...	8.70
NO <sup>3-</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	3.43	<22.80	<11.4	<0.01	7.81	< 11.40	< 5.70	< 1.14	55.00 ± 5.00 (n=3)
NO <sup>2-</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	<0.012	<6	<3	3.63	<0.15	<0.30	< 0.15	< 0.03	2.25 ± 0.05 (n=3)
NH <sub>3</sub>	mg.L <sup>-1</sup>	2.83	0.44	1.82	...	12.68	9.52	20	12.18	87.50 ± 7.50 (n=3)
N <sub>Kjeldahl</sub>	mg.L <sup>-1</sup>	153.44	178.08	95.20	9.52	117	70.60	360.10	144.50	1130.50
Na <sup>+</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	10.65	<50	<25	36.30	<25	6.15	6.78	58	10.64
Ca <sup>2+</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	493.80	383.85	410.75	10.19	658.25	895	708	54.90	458.40
K <sup>+</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	200.60	2628.50	1348.50	8.80	2267	4918	3177	312	1330.40 ± 0.10 (n=3)
Mg <sup>2+</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	233.80	190.05	153.50	3.96	342.50	360	251	...	235.39
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	1087.12	1766.38	1445.99	<25.00	1752.37	1014	2475	438	3701 ± 1154.70 (n=3)
P <sub>Total</sub>	mg.L <sup>-1</sup>	<0.02	84.92	19.07	<0.02	128.30	< 2.00	< 1.00	5.02	5.58 ± 0.07 (n=3)
DBO	g.L <sup>-1</sup>	3.07	3.84	2.42	2.32	8.18	11.72	6.72	...	14.40 ± 0.53 (n=3)
DQO	g.L <sup>-1</sup>	7.37	13.60	9.18	5.68	19.97	25.42	31.12	...	24.63 ± 0.55 (n=3)
R <sub>DQO/DBO</sub>	---	2.40	3.54	3.80	2.45	2.44	2.17	4.63	...	1.71
Alcalinidade total	mgCaCO <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup>	2196	1741	1657.75	41.75	3054.10	3717	2801	...	137

--- Não se aplica

... Dado não disponível

(1);(2);(3) Número de amostras

(\*) Fuess (2013); n= Número de ensaios. .

As altas concentrações de  $K^+$  observadas comprovam que a vinhaça é realmente uma excelente fonte deste nutriente como fertilizante para as lavouras de cana-de-açúcar, como foi visto na literatura consultada (FUESS, 2013; OLIVEIRA, 2015). Em comparação com a fórmula do cálculo de dosagem de vinhaça (Eq. 1 da página 9), essas concentrações correspondem ao *kvi* com a conversão da unidade de medida de  $mg.L^{-1}$  para  $kgK_2O.m^{-3}$ , e portanto são importantes da definição do volume de vinhaça a ser aplicado na fertirrigação.

A menor concentração de  $Ca^{2+}$  foi observada na amostra de 2014 com  $10,19 mg.L^{-1}$ , da mesma forma que o menor valor de  $3,96 mg.L^{-1}$  de  $Mg^{2+}$  apresentado pela mesma amostra de vinhaça. Por sua vez, os maiores valores de  $Ca^{2+}$  e de  $Mg^{2+}$  de  $895 mg.L^{-1}$  e de  $360 mg.L^{-1}$ , ambos indicados pela amostra 1 do ano de 2016. Desta forma, 2014 foi o ano que apresentou as menores quantidades de cátions de base, enquanto que a amostra 1 coletada em 2016 foi a que possuiu maiores índices desses cátions na vinhaça durante o período analisado.

A média dos valores de  $Ca^{2+}$  no período de 2012 a 2017 foi de  $451,84 mg.L^{-1}$ . No caso das concentrações de  $Mg^{2+}$ , sua média nos anos de 2012 a 2016 (não havia dado disponível em 2017) foi de  $219,26 mg.L^{-1}$ . As médias de  $Ca^{2+}$  e de  $Mg^{2+}$  dos resultados foram semelhantes aos calculados por Fuess (2013) em 2010, que obteve média de  $458,40 mg.L^{-1}$  para o  $Ca^{2+}$  e de  $235,39 mg.L^{-1}$  para o  $Mg^{2+}$  e provavelmente representam a concentração mais comum destes cátions nas amostras de vinhaça.

Quanto às variações de DQO e DBO das amostras, a menor razão de  $R_{DQO/DBO}$  foi de 2,17 da amostra 1 de 2016. A maior razão obtida foi de 4,63 da amostra 2 de 2016, seguida da  $R_{DQO/DBO}$  de 3,80 apresentada pela amostra de vinhaça de 2014. A  $R_{DQO/DBO}$  obtida por Fuess (2013) foi de 1,71, que se assemelha mais com a razão indicada nos resultados da amostra 1 de 2016 do que demais razões adquiridas.

O autor explica que valores de  $R_{DQO/DBO}$  são indicadores da quantidade de MO presente no efluente, onde razões de DQO/DBO inferiores a 2,5 possuem alta concentração de MO (fração biodegradável), razões entre 2,5 e 3,5 possuem concentrações intermediárias de substâncias orgânicas e índices de DQO/DBO maiores que 3,5 possuem escassez de MO no efluente (a fração inerte ou não biodegradável é maior).

Dos resultados observados, as amostras com  $R_{DQO/DBO}$  menores que 2,5 (com teores elevados de MO) foram as amostras de 2012, 2014, 2015 e a amostra 1 de 2016, além do valor de referência de  $R_{DQO/DBO}$  obtido por Fuess (2013) em 2010. Em contrapartida, as amostras de vinhaça coletadas em 2013 e a amostra 2 de 2016 expuseram razões de DQO/DBO superiores a 3,5 e, conseqüentemente, tinham quantidades escassas de MO biodegradável nas amostras de vinhaça coletadas.

Outro parâmetro da caracterização físico-química da vinhaça que deve ser considerado ao usar este efluente na fertirrigação é a concentração de  $\text{Na}^+$  ou de salinidade da amostra. Apesar da maioria dos índices de  $\text{Na}^+$  não terem sido superiores a  $25 \text{ mg.L}^{-1}$ , a amostra de vinhaça de 2017 teve uma concentração anormal de  $58 \text{ mg.L}^{-1}$ , um valor muito alto do que o normal, podendo representar um risco de salinização do solo. Outras amostras também se destacaram como indicadores de alta salinidade na vinhaça, sendo estas a amostra 1 de 2013 com  $\text{Na}^+$  menor que  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  e a amostra de 2014 correspondente a  $36,30 \text{ mg.L}^{-1}$ .

Apesar de não ser considerado um parâmetro de fertilidade, as concentrações de  $\text{Na}^+$  da vinhaça devem ser monitoradas para que não ocorra a salinização do solo das culturas de cana-de-açúcar e a conseqüente perda de sua produtividade. Amostras de vinhaça com concentrações de  $\text{Na}^+$  menores que  $25 \text{ mg.L}^{-1}$ , como do valor de referência apresentado por Fuess (2013), podem conferir a reposição de nutrientes ao solo sem que haja o risco de uma possível salinização.

Por outro lado, Fuess (2013) analisou o risco de salinização por sodificação através da relação de adsorção por sódio (RAS) das amostras de vinhaça avaliadas para a fertirrigação em 2010, usando a seguinte equação (Eq.5):

$$RAS = \frac{Na}{[(Ca + Mg)/2]^{1/2}} \quad (5)$$

Onde: Na, Ca e Mg correspondem às concentrações de sódio, cálcio e magnésio na vinhaça e em águas residuárias utilizadas na irrigação, em  $\text{mEq.L}^{-1}$ .

A partir das concentrações em  $\text{mg.L}^{-1}$  de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  da vinhaça (Tabela 9), os valores obtidos foram convertidos em  $\text{mEq.L}^{-1}$  e calculou-se o valor do parâmetro RAS para os dados da área de estudo (Tabela 10). Os cálculos de RAS dos dados obtidos tiveram intervalo entre  $0,04 \text{ mEq.L}^{-1}$  para  $2,47 \text{ mEq.L}^{-1}$ , correspondentes à primeira amostra de vinhaça analisada em 2016 e da amostra de vinhaça de 2014, respectivamente. Apesar do RAS da amostra de 2014 ter sido mais elevada, todos os valores calculados foram inferiores a  $10 \text{ mEq.L}^{-1}$ , valor apresentado pelo autor supracitado como de baixo risco de sodificação.

Tabela 10. Relação de adsorção de sódio calculada para os resultados de vinhaça de 2012 a 2017.

Parâmetros	Na <sup>+</sup>		Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		RAS
	mg.L <sup>-1</sup>	mEq.L <sup>-1</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	mEq.L <sup>-1</sup>	mg.L <sup>-1</sup>	mEq.L <sup>-1</sup>	
2012	10,652	0,47	493,8	24,69	233,8	19,17	0,10
2013 <sup>(1)</sup>	50	2,20	383,85	19,19	190,05	15,58	0,53
2013 <sup>(2)</sup>	25	1,10	410,75	20,54	153,5	12,59	0,27
2014	36,3	1,60	10,19	0,51	3,96	0,32	2,47
2015	25	1,10	658,25	32,91	342,5	28,09	0,20
2016 <sup>(1)</sup>	6,15	0,27	895	44,75	360	29,52	0,04
2016 <sup>(2)</sup>	6,78	0,30	708	35,40	251	20,58	0,06
2017	58	2,55	54,9	2,75	0	0,00	2,18

(1);(2);(3) Número de amostras

## 6.2. Cálculos da dosagem de volume de vinhaça

Em relação ao volume de vinhaça aplicada nas glebas da fazenda (Tabela 11), as maiores dosagens de vinhaça ocorreram em 2014 na gleba 75 com valor de 1557,98 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> e na gleba 38 com 1019,63 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>. Nos anos de 2013, 2015 e 2016, houve a aplicação de vinhaça na gleba 15, permitindo a análise temporal nesta gleba.

Tabela 11. Cálculos das dosagens de Vinhaça da Fazenda do período de 2012 a 2017.

Equação dosagem: $m^3$ de vinhaça/ha = $((0,05 \times CTC - ks) \times 3744 + 185)/kvi$						Análise segundo a fórmula da Norma P4.231/2015
Ano	Talhão	Ks ( $cmol.dm^{-3}$ )	CTC ( $cmol.dm^{-3}$ )	Kvi ( $kg K_2O.m^{-3}$ )	% Ks/CTC	Dosagem Vinhaça ( $m^3.ha^{-1}$ )
2017	Gleba 56	0,13	7,11	3 <sup>3</sup>	1,76	343,09
2017	Gleba 27	0,29	9,17	3	3,12	271,95
2016	Gleba 28	0,178	3,924	3	4,54	84,38
2016	Gleba 15	0,506	10,545	3	4,8	88,19
2015	Gleba 84	0,519	11,257	3	4,61	116,39
2015	Gleba 15	0,399	9,689	3	4,12	168,31
2014	Gleba 8	0,194	10,413	3	1,86	469,33
2014	Gleba 75	0,244	28,859	3	0,85	1557,96
2014	Gleba 38	0,621	27,772	3	2,24	1019,63
2013	Gleba 15	0,559	10,536	3	5,31	21,48
2013	Gleba 78	0,394	17,069	3	2,31	635,06
2013	Gleba 29	0,097	3,225	3	3,01	141,85
2012	Gleba 40	0,529	15,265	3	3,47	354,01
2012	Gleba 6	0,206	9,04	3	2,28	368,67

<sup>3</sup> O cálculo da conversão de  $1000 mgK.L^{-3}$  para  $kgK_2O.m^{-3}$  resulta em  $1,2 kgK_2O.m^{-3}$ . O valor de  $3 kgK_2O.m^{-3}$  apresentados na tabela foram provavelmente considerados para que os cálculos de dosagens de vinhaça fossem menores que o necessário para que não houvesse o risco de contaminação do meio físico.

As dosagens de vinhaça calculadas em 2014 na gleba 75 e na gleba 38 foram mais elevadas que o padrão normalmente dosado (Figura 31), considerando que as outras dosagens tiveram valores no intervalo entre 21,48 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> na gleba 15 em 2013 a 635,06 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> em 2013 na gleba 78 (Tabela 11).

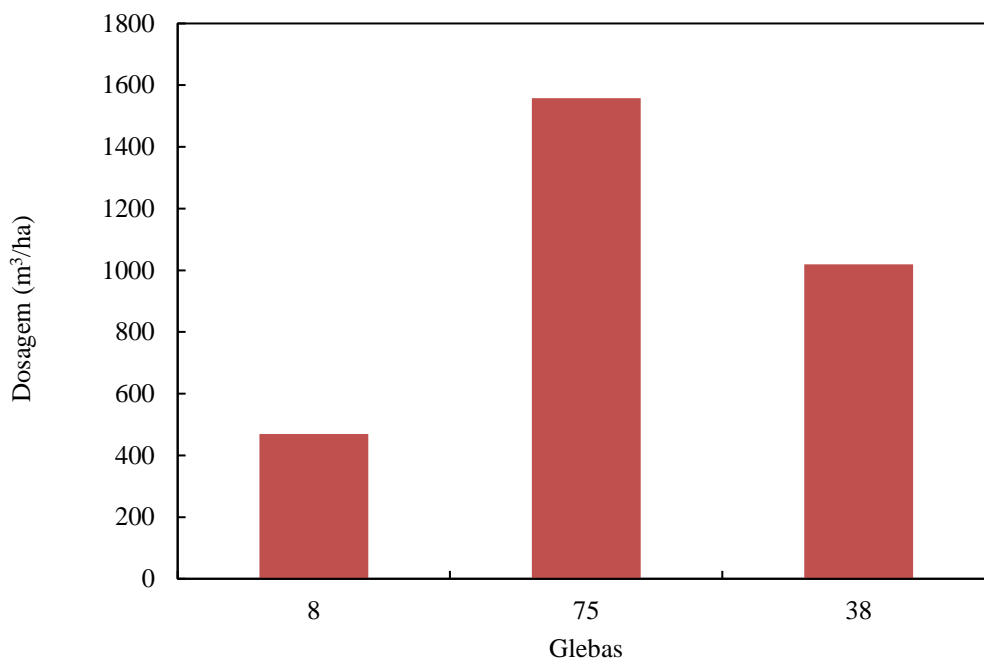


Figura 31. Dosagens da vinhaça aplicada na Fazenda no ano de 2014.

Em relação à uma comparação temporal dos dados na gleba 15 (Figura 32), em 2013 esta gleba apresentou o menor valor de dosagem de vinhaça desta fazenda no período estudado de 2012 a 2017, com 21,48 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>. Em 2015, o cálculo do volume de vinhaça aplicado foi bem maior que o de 2013 (168,31 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>), sendo que em 2016 o valor da dosagem decaiu para 88,19 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.

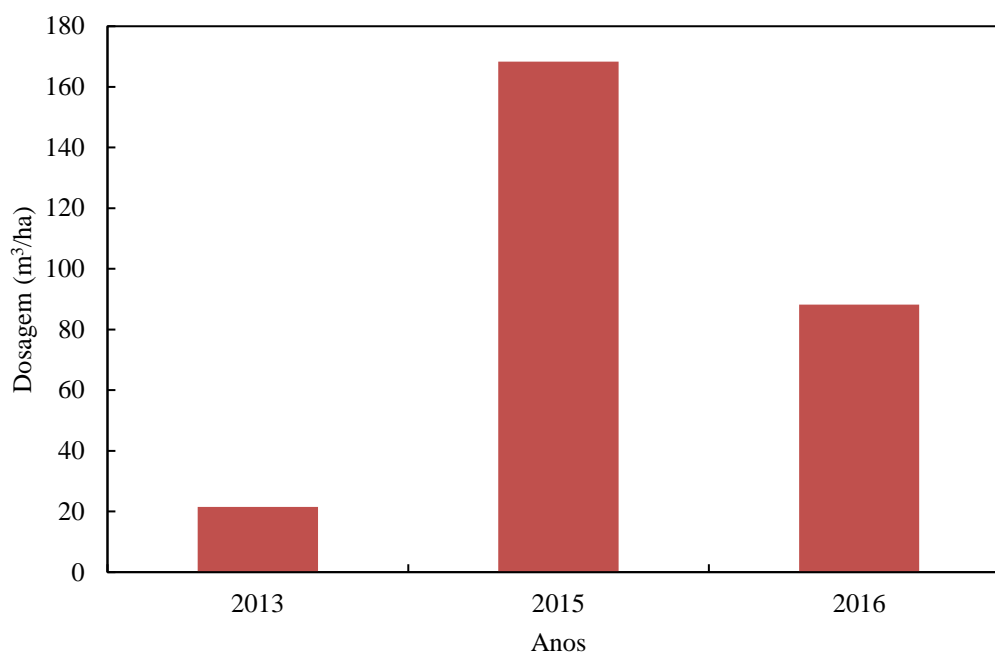


Figura 32. Dosagens de vinhaça aplicada na Gleba 15 da Fazenda no período de 2012 a 2017.

Tanto as variações do cálculo do volume de vinhaça no ano de 2014 e na gleba 15 são provavelmente resultantes das propriedades físico-químicas do solo vigentes no momento em que essas dosagens foram calculadas, uma vez que o cálculo da dosagem considera os parâmetros da CTC e do  $k_s$  do solo para determinar o volume de vinhaça a ser aplicada na fertirrigação (Eq.1 da página 9). Desta forma, a análise das propriedades do solo e suas condições de fertilidade permite determinar sua influência no cálculo da dosagem de vinhaça, além de também definir como a fertirrigação com vinhaça pode afetar nestes parâmetros nos anos seguintes, como discutido no tópico seguinte.

### 6.3. Propriedades físico-químicas do solo

Quanto à caracterização físico-química do solo da fazenda estudada no período de 2012 a 2017 (Tabela 12), o parâmetro indicador da fertilidade V% teve valores mínimos em 2014 nas glebas 75 e 38 de 23,42% e 35,55%, respectivamente. Na gleba 15, os anos de 2015 e 2016 tiveram índices de V% elevados e muito similares de 76,26% e 76,29%, enquanto que em 2013 o valor obtido foi de 63,93%.

Tabela 12. Resultados analíticos das propriedades físico-químicas das amostras de solo da Fazenda do período de 2012 a 2017 com suas respectivas glebas e datas de análise, em que: V, Saturação por Bases; m, Saturação por Alumínio; SB, Soma de Bases; CTC, Capacidade de Troca Catiônica; MO, Matéria Orgânica.

Amostras	Glebas	Data de análise	pH	V	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	m	H+Al	SB	CTC	MO
Unidade	----	----	----	%	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	%	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	g.dm <sup>-3</sup>
2017 <sup>(1)</sup>	56	17/03	5.90	60.59	27.58	14.19	1.25	0.15	0.35	28	43.05	71.05	15
2017 <sup>(2)</sup>	27	17/03	5.50	69.27	55.14	15.24	17.43	0.17	0.19	39	87.93	126.93	21
2016 <sup>(1)</sup>	28	09/03	4.80	36.29	8.6	3.86	1.78	1.02	6.68	25	14.24	39.24	5
2016 <sup>(2)</sup>	15	09/03	5.10	76.29	58.86	16.37	5.06	0.47	0.58	25	80.45	105.45	21
2015 <sup>(1)</sup>	84	02/03	4.40	60.91	43.92	19.28	5.19	14.90	17.85	44	68.57	112.57	17
2015 <sup>(2)</sup>	15	02/03	5.20	76.26	52.11	17.69	3.99	0.14	0.19	23	73.89	96.89	24
2014 <sup>(1)</sup>	8	13/03	5.40	73.11	50.46	23.71	1.94	0.27	0.35	28	76.13	104.13	17
2014 <sup>(2)</sup>	75	13/03	3.80	23.42	43.85	21.26	2.44	47.33	41.19	221	67.59	288.59	14
2014 <sup>(3)</sup>	38	13/03	3.90	35.55	56.44	36.00	6.21	37.05	27.29	179	98.72	277.72	14
2013 <sup>(1)</sup>	15	15/03	5.20	63.93	47.84	13.84	5.59	0.29	0.43	38	67.39	105.36	23
2013 <sup>(2)</sup>	78	15/03	4.30	39.07	40.6	22.00	3.94	25.30	27.50	104	66.69	170.69	16
2013 <sup>(3)</sup>	29	15/03	5.00	56.59	11.63	5.62	0.97	0.95	4.93	14	18.25	32.25	8
2012 <sup>(1)</sup>	40	09/03	5.00	82.31	78.34	41.67	5.29	1.28	1.01	27	125.65	152.65	18
2012 <sup>(2)</sup>	6	09/03	5.10	61.13	38.56	10.78	2.46	0.39	0.75	33	51.89	84.89	30

---- Não se aplica

(1);(2);(3) Número de amostras de cada ano

Em comparação com os cálculos de dosagens de vinhaça em 2014 (Figura 33), houve uma relação inversa entre V% e o cálculo do volume de vinhaça, na qual a gleba 75 que teve o maior cálculo de dosagem também foi a que apresentou o menor valor de V%.

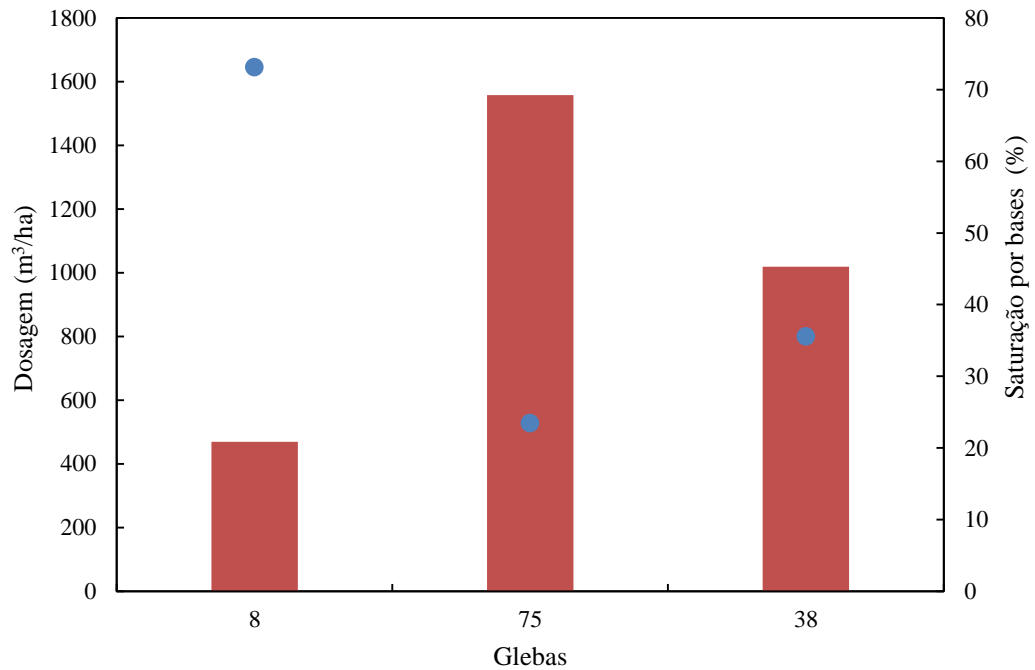


Figura 33. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro de V% (●) no ano de 2014.

No ano de 2013, o valor de V% na gleba 15 foi mais elevado se comparado com a dosagem de vinhaça ( $21,48 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ ), mostrando um contexto totalmente invertido em comparação com a gleba 75 em 2014 (Figura 34). Por sua vez, os valores de V% de 2015 e 2016 não apresentaram uma variação significativa de um ano para o outro, o que contrapõe com os resultados dos cálculos de dosagem em que o volume de vinhaça calculado em 2015 foi maior do que o de 2016.

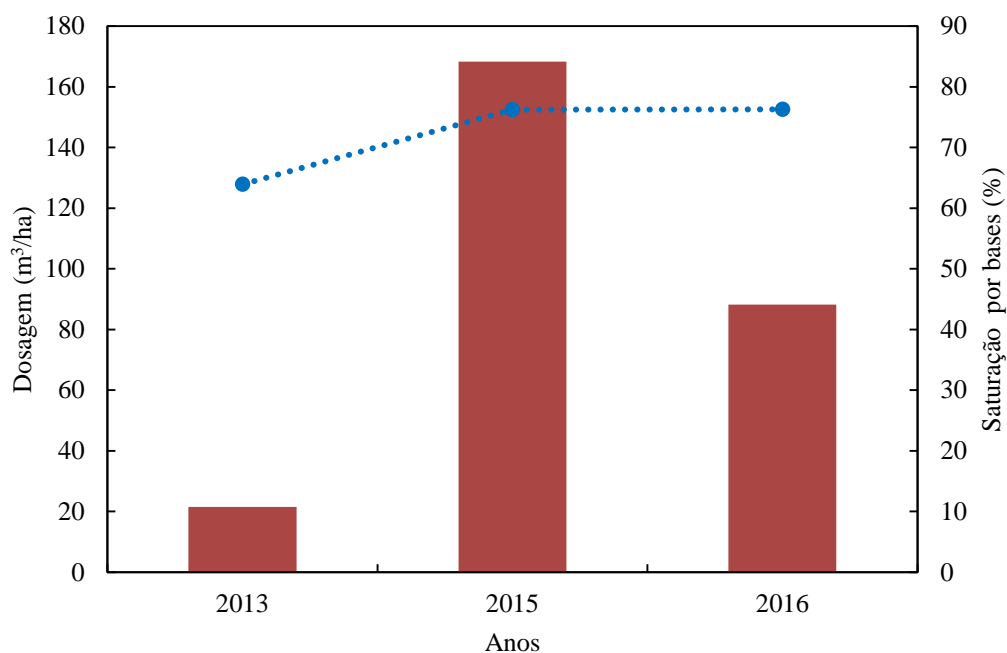


Figura 34. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro de V% (●) analisados na gleba 15 da Fazenda.

Nos casos indicados em 2014 e na gleba 15, os solos das glebas 75 e 38 em 2014 com V% menor que 50% poderiam ser considerados como solos distróficos ou inférteis, ao passo em que o solo da gleba 15 poderia ser classificado como um solo eutrófico ou fértil nos três anos em que foi amostrado. Como V% é diretamente proporcional a SB e inversamente proporcional a  $CTC_{total}$  (Eq. 3 da página 15), sua variação está interligada às alterações desses dois parâmetros e dos cátions que os compõem da mesma forma que o cálculo da dosagem de vinhaça.

Os cátions de base ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $K^+$ ) que constituem tanto a SB como a CTC tiveram seus máximos e mínimos em diferentes glebas e anos distintos no período de 2012 a 2017 (Tabela 12). Os valores máximos de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  ocorreram em 2012 na gleba 40 com concentrações de  $78,34 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  e  $41,67 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ , respectivamente. Seus valores mínimos também foram registrados no mesmo período e local na gleba 28 do ano de 2016, com concentrações respectivas de  $8,6 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  e  $3,86 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ .

Por outro lado, os índices de  $K^+$  não seguiram a mesma tendência que os apresentados para o  $Ca^{2+}$  e o  $Mg^{2+}$ . O maior valor de  $K^+$  foi correspondente a  $17,43 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  e foi adquirido na gleba 27 em 2017, e seu valor mínimo foi de  $0,97 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  registrado na gleba 29 em 2013. Ademais, o valor máximo de  $K^+$  de 2017 foi anormalmente mais elevado

do que as outras concentrações destes cátions, uma vez que a maior parte dos dados não eram superiores a  $6 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ .

Os dados sugerem que as concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  no solo são geralmente mais elevadas que a de  $\text{K}^+$ , além de que aparentemente os cátions de  $\text{Ca}^{2+}$  e de  $\text{Mg}^{2+}$  costumam ocorrer juntos na natureza como mais frequência do que em relação ao  $\text{K}^+$  por terem valores máximos e mínimos em locais e épocas semelhantes. Uma possibilidade seria que o cátion  $\text{K}^+$  poderia ter mais facilidade de ser lixiviado no perfil de solo do que os cátions de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e conseqüentemente não teria grandes concentrações deste cátion no solo em relação aos demais, podendo ser uma das possíveis razões pela qual é necessária a reposição desse macronutriente através da fertirrigação com vinhaça.

Com relação ao ano de 2014 (Figura 35), os maiores valores de  $\text{Ca}^{2+}$  e de  $\text{Mg}^{2+}$  foram de  $56,44 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  e de  $36,00 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  ocorrentes na gleba 38, e seus valores mínimos foram de  $43,85 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  e de  $21,26 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  registrados na gleba 75 correspondente a gleba com maior cálculo de dosagem de vinhaça. O menor valor foi de  $21,26 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ , também na gleba 75. No caso do  $\text{K}^+$ , seu valor máximo de  $6,21 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  também foi analisado na gleba 38 da mesma forma como os do  $\text{Ca}^{2+}$  e do  $\text{Mg}^{2+}$ , porém a menor concentração de  $\text{K}^+$  foi analisada na gleba 8 com  $1,94 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ . Desta forma, a gleba 75 foi a que apresentou a maioria dos valores mínimos das concentrações dos cátions de base em 2014.

Os resultados dos cátions de base registrados em 2014 tiveram um padrão semelhante ao observado nos dados de V% no mesmo ano, visto que a ocorrência de valores reduzidos de V% é resultado de índices de SB relativamente menores do que as concentrações de CTC. Dessa maneira, as baixas quantidades de cátions de base registradas na gleba 75 em 2014 condizem com a redução da fertilidade do solo pela escassez destes cátions que servem de macronutrientes para as lavouras de cana-de-açúcar.

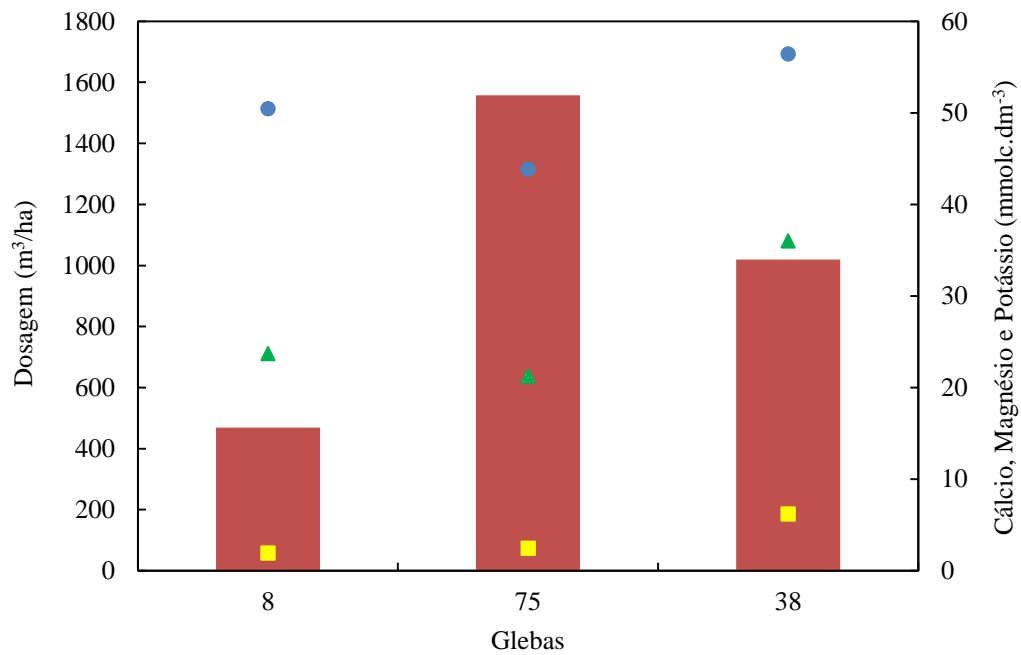


Figura 35. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro dos cátions de base  $\text{Ca}^{2+}$  (●),  $\text{Mg}^{2+}$  (▲) e  $\text{K}^{+}$  (■) da Fazenda no ano de 2014.

No que se refere à gleba 15 (Tabela 12), a maior concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  foi em 2016 com  $58,86 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  e a menor foi em 2013 com  $47,84 \text{ mmolc.dm}^{-3}$ . O valor máximo de  $\text{Mg}^{2+}$  foi registrado em 2015 com  $17,69 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  e mínimo ocorreu em 2013 com  $13,84 \text{ mmolc.dm}^{-3}$ . Por sua vez, o maior valor de  $\text{K}^{+}$  foi de  $5,59 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  em 2013 e o menor foi em  $3,99 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  em 2015.

Comparando com os dados dos cálculos de volume de vinhaça (Figura 36), houve o aumento das concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  de 2013 para 2015, que foram respectivamente o ano de menor dosagem ( $21,48 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ ) e o de maior dosagem de vinhaça ( $168,31 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ ) registrados na gleba 15, porém ocorreu a redução da concentração de  $\text{K}^{+}$  no mesmo período. Padrão semelhante ocorreu da mesma maneira em relação aos valores de V% (houve aumento de V% de 63,93% em 2013 para 76,26% em 2015), o que pode ser mais um indicativo de que o aumento da fertilidade do solo está relacionado com o aumento da concentração de cátions de base nas glebas da fazenda.



Figura 36. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro dos cátions de base  $\text{Ca}^{2+}$  (●),  $\text{Mg}^{2+}$  (▲) e  $\text{K}^{+}$  (■) analisados na gleba 15 da Fazenda.

Ao entender as variações dos cátions de base, é possível observar as mudanças de CTC junto com as modificações das concentrações de  $\text{Al}^{3+}$  e dos íons  $\text{H}^{+}$  com o intuito de compreender as mudanças de fertilidade do solo na fazenda de estudo. As medições de CTC obtidas (Tabela 12) são correspondentes à somatória das concentrações dos cátions de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$  e de  $\text{H}+\text{Al}$  e, portanto, são os valores de CTC total do solo da fazenda estudada.

O maior valor obtido da CTC no período de 2012 a 2017 foi equivalente a 288,59  $\text{mmolc.dm}^{-3}$  na gleba 75 em 2014, seguida do valor de 277,72  $\text{mmolc.dm}^{-3}$  na gleba 38 no mesmo ano. A concentração mínima de CTC foi registrada com 32,25  $\text{mmolc.dm}^{-3}$  na gleba 29 em 2013, além da segunda menor medida deste parâmetro de 39,24  $\text{mmolc.dm}^{-3}$  na gleba 28 em 2016.

Ao comparar esses resultados com os dos cátions de base (Tabela 12 e Figuras 35 e 36), observou-se que os menores valores de  $\text{Ca}^{2+}$  e de  $\text{Mg}^{2+}$  também ocorreram na gleba 28 em 2016, enquanto que a menor concentração de  $\text{K}^{+}$  foi verificada na gleba 29 em 2013, o que indica a dependência das variações de CTC com as alterações dos cátions de base no solo. Todavia, os valores máximos destes cátions não ocorreram da mesma forma que os maiores valores de CTC, onde contrariamente a gleba 75 da maior concentração de CTC também manifestou os menores valores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em 2014.

No ano de 2014, as variações de CTC foram diretamente proporcionais aos cálculos de dosagem de vinhaça (Figura 37), sendo o oposto ao que foi observado nos resultados de V%, provavelmente devido a uma colaboração maior de  $Al^{3+}$  e dos íons de  $H^+$  no aumento da CTC na gleba 75 do que dos cátions de base.

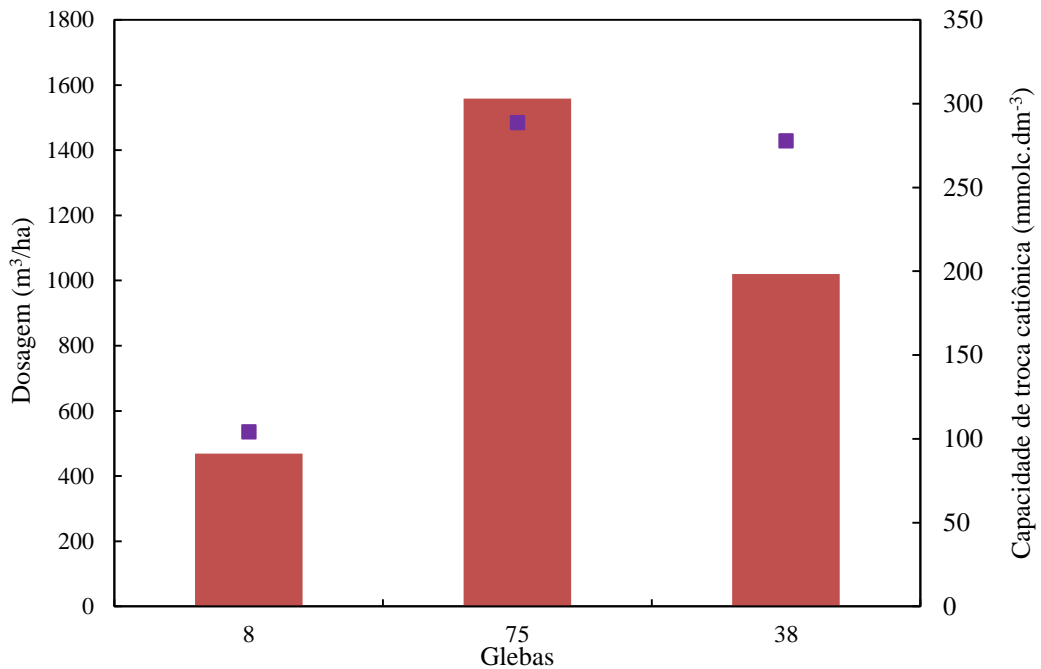


Figura 37. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro CTC (■) no ano de 2014.

Em relação à gleba 15 (Figura 38), a CTC teve valores similares nos anos de 2013 e em 2016 (de 105,36  $mmol_c.dm^{-3}$  e 105,45  $mmol_c.dm^{-3}$ ). Por outro lado, a concentração deste parâmetro foi de 96,89  $mmol_c.dm^{-3}$  em 2015 (ano com maior dosagem de vinhaça nesta gleba), tendo sido a menor registrada na gleba 15.

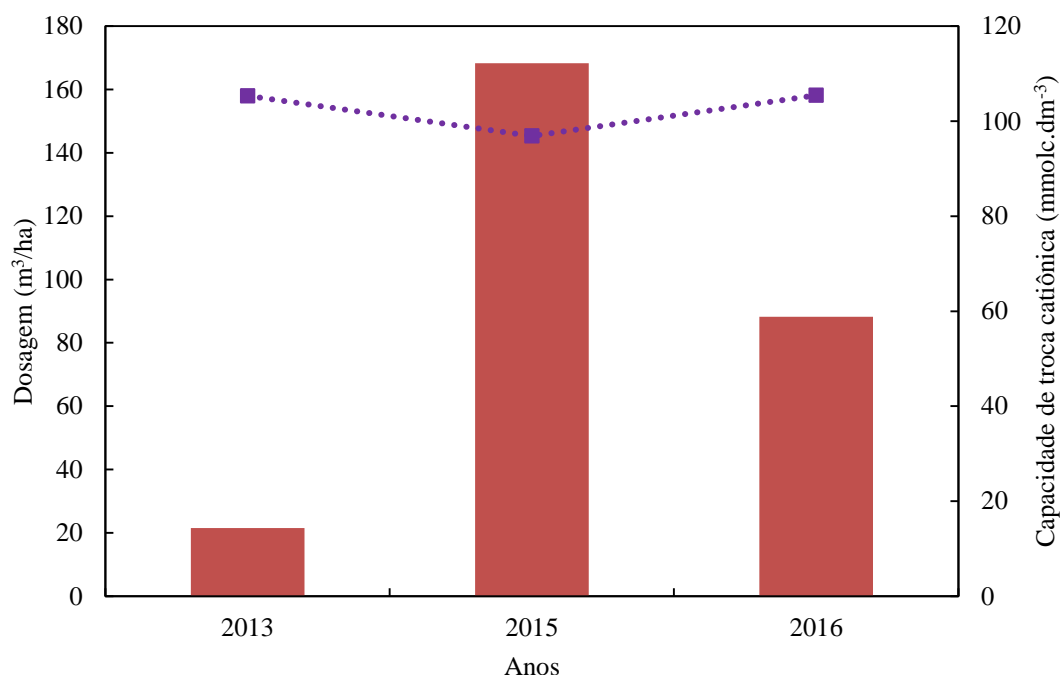


Figura 38. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro CTC (■) analisados na gleba 15 da Fazenda.

A fim de compreender as variações de CTC total na fazenda, foi necessária a avaliação dos resultados de pH, a fim de entender a concentração de  $H^+$ , e de  $Al^{3+}$ , além dos resultados dos cátions de base.

No caso da análise do pH (Tabela 12), o menor valor obtido no período de 2012 a 2017 foi de 3,8 na gleba 75 em 2014, e o segundo menor ocorreu na gleba 38 também em 2014 com 3,9. O valor máximo de pH foi de 5,9 ocorrente na gleba 56 em 2017.

Desta forma, o ano de 2014 foi o que apresentou os dois menores valores de pH do período estudado. Neste mesmo ano, a gleba 75 neste também foi o que apresentou o menor valor de V% da fazenda (23,42%), seguido da gleba 38 com V% de 35,55% (Tabela 12 e Figura 33), podendo ser um indicio de que a alta concentração de íons  $H^+$  estaria relacionada com a redução da fertilidade. Em contrapartida, estas mesmas glebas também foram as que apresentaram os maiores valores de CTC de todo o período igualmente no ano de 2014 (Tabela 12 e Figura 37), podendo ser mais um fator da contribuição da quantidade de  $H^+$  no aumento de CTC total do solo nesta fazenda em 2014.

Todavia, a variação do pH em 2014 não foi tão discordante com a maioria dos valores de pH da Tabela 12 no período de 2012 a 2017 (a maioria dos resultados foi entre 4,30 a 5,50), tampouco os valores de pH medidos nas glebas 75 e 38 foram muito reduzidos. Em comparação com os cálculos de dosagem de vinhaça (Figura 39), ainda que o cálculo da

dosagem na gleba 75 ( $1557,96 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ ) tenha sido maior que o da gleba 38 ( $1019,63 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ ), os valores de pH tiveram apenas 0,1 de diferença, o que pode demonstrar que outros fatores o tipo de manejo de cultura poderiam ter influenciada na variação do pH do solo além da aplicação de vinhaça.

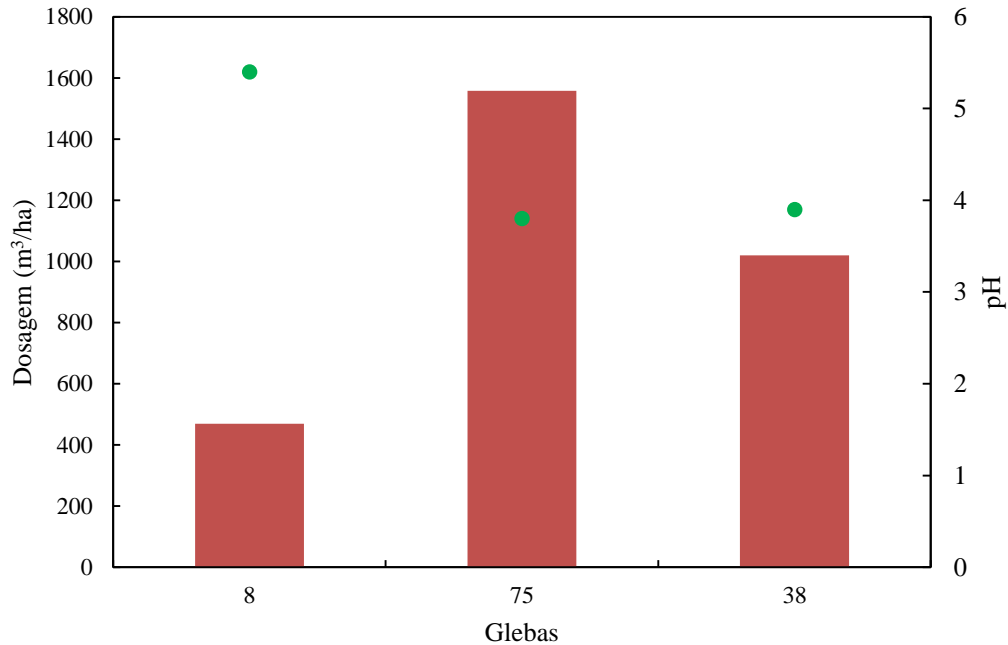


Figura 39. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro do pH (●) da Fazenda analisados no ano de 2014.

No caso da gleba 15 (Figura 40), os valores de pH foram de 5,2 e 5,1 nos anos de 2013, 2015 e 2016, com uma variação temporal mínima do pH nesta gleba de apenas 0,1. Contudo, apesar de o pH de 2015 e 2013 ter sido o mesmo (5,2), o cálculo da dosagem de vinhaça foi maior em 2015 do que em 2013 (de  $21,48$  a  $168,31 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ ).

Em relação a comparação das dosagens de vinhaça e a variação do pH de 2015 e 2016, houve uma inversão de cenário na qual o pH de 2016 diminuiu para 5,1 depois de ter tido um elevado cálculo de dosagem em 2015, podendo ser o efeito da aplicação da vinhaça em 2015 na redução de pH no ano seguinte da aplicação de vinhaça (sendo um indicativo do efeito da aplicação do efluente nos anos seguintes a esta dosagem). Desta forma, mesmo com a observação do efeito da vinhaça na redução de pH em 2016, a mínima variação dos valores na gleba 15 poderia mais uma vez ser resultado de outros fatores como a calagem e das condições climáticas além da aplicação de vinhaça.

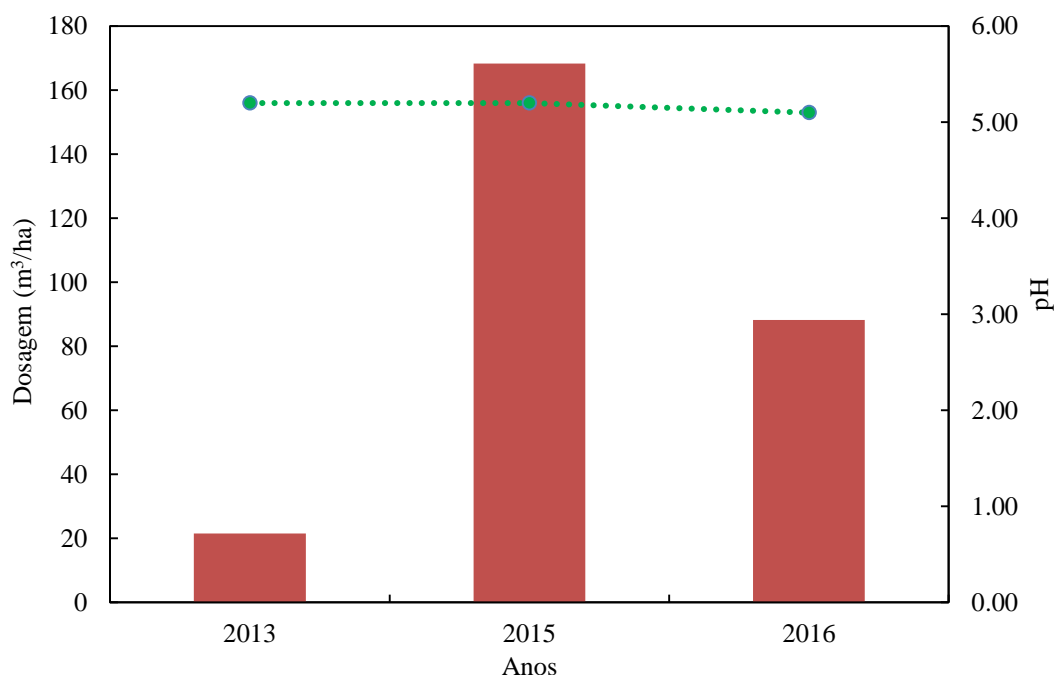


Figura 40. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro do pH (●) analisados na gleba 15 da Fazenda.

Em relação aos resultados de  $\text{Al}^{3+}$ , o valor mínimo obtido do período de 2012 a 2017 foi de  $0,14 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  na gleba 15 em 2015 (Tabela 12). O valor máximo de  $\text{Al}^{3+}$  foi de  $47,33 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  da gleba 75 em 2014, seguida pela concentração de  $37,05 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  da gleba 38 em 2014, sendo estas as glebas que apresentaram os maiores cálculos de dosagem.

Ao comparar com as dosagens de vinhaça de 2014 (Figura 41), a concentração de alumínio na gleba 8 foi de  $0,27 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ , valor que se aproxima de zero no gráfico. Por sua vez, as concentrações de  $\text{Al}^{3+}$  nas glebas 75 e 38 foram diretamente proporcionais com os cálculos de dosagem de vinhaça.

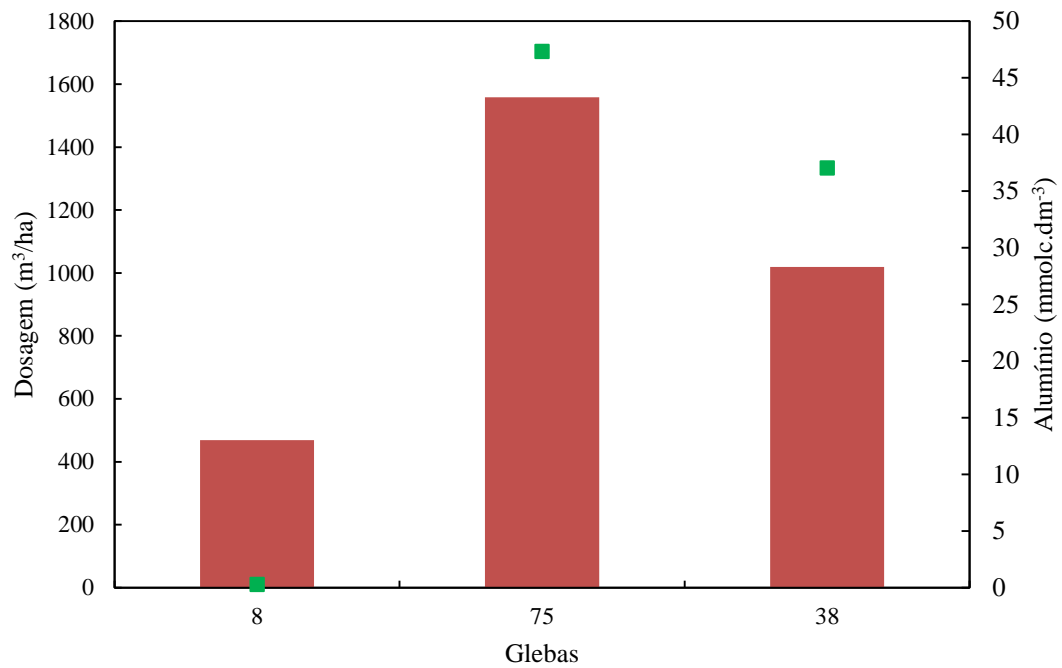


Figura 41. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro do cátion  $\text{Al}^{3+}$  (■) no ano de 2014.

Quanto à gleba 15 (Figura 42), além de o menor valor de  $\text{Al}^{3+}$  ter ocorrido em 2015, os cálculos de dosagem foram inversamente proporcionais à concentração de  $\text{Al}^{3+}$  (em 2013 e em 2016 foram diretamente proporcionais). Uma possibilidade de a CTC total ter sido menor em 2015 na gleba 15 (Figura 38) foi devido à diminuição de  $\text{Al}^{3+}$  nas mesmas condições locais e temporais. Em contrapartida, a fertilidade V% aumentou no mesmo período (Figura 34), da mesma forma que o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Mg}^{2+}$  (Figura 36). Desta forma, a fertilidade do solo da fazenda pode ter elevado em 2015 como resultado do aumento da concentração dos cátions de base e pela diminuição da CTC total com a redução da concentração de  $\text{Al}^{3+}$ .

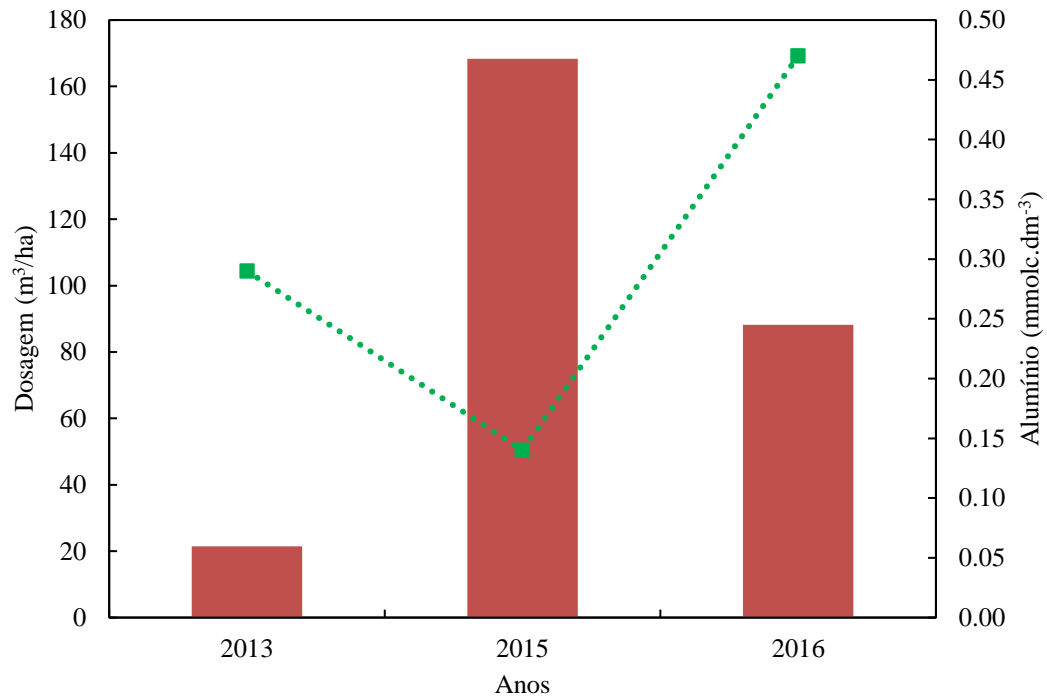


Figura 42. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro do cátion  $\text{Al}^{3+}$  (■) analisados na gleba 15 da Fazenda.

Ao analisar os resultados da somatória da concentração de  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  ( $\text{H}+\text{Al}$ ), os maiores valores foram de  $221 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  na gleba 75 e de  $179 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  na gleba 38, ambos em 2014 (Tabela 12). Os resultados de  $\text{H}+\text{Al}$  são positivamente correlatos aos cálculos de dosagem de vinhaça em 2014 (Figura 43), podendo ser um indicio de que  $\text{Al}^{3+}$  e os íons  $\text{H}^+$  (representado também pelos baixos valores de pH) foram os cátions que mais contribuíram no aumento do cálculo de dosagem naquele ano nas glebas 75 e 38 em 2014.

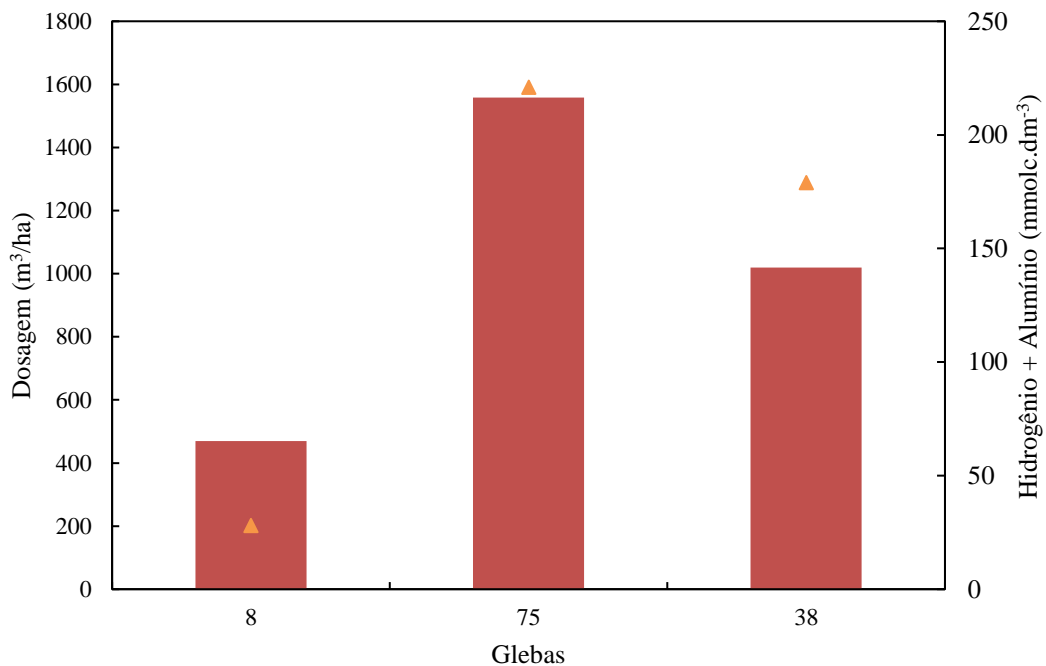


Figura 43. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro H + Al (▲) no ano de 2014.

Por sua vez, os valores mínimos de H+Al foram de 14 mmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup> da gleba 29 (justamente a que teve o menor valor de CTC de 32.25 mmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup>) em 2013 e de 23 mmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup> na gleba 15 em 2015 (Tabela 12), sendo que a menor concentração de Al<sup>3+</sup> da fazenda ocorreu na gleba 15 no mesmo ano.

Os cálculos de dosagem de vinhaça da gleba 15 em 2015 (Figura 44) foram inversamente proporcionais a H+Al (os anos de 2013 e 2016 foram positivamente correlatos com esses parâmetros), provavelmente como resultado da diminuição de Al<sup>3+</sup> (Figura 42) e que conseqüentemente também refletiu na redução de CTC total (Figura 38). Comparando com os resultados de cátions de base (Tabela 12 e Figura 36), o H+Al reduziu de 38 mmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup> em 2013 para 23 mmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup> em 2015, seguida de uma diferença entre 23 a 25 mmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup> entre 2015 e 2016, ao passo em que houve o aumento de 52.11 a 58.86 mmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup> de Ca<sup>2+</sup> e de 3.99 a 5.06 mmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup> de K<sup>+</sup> na gleba 15 para o mesmo período.

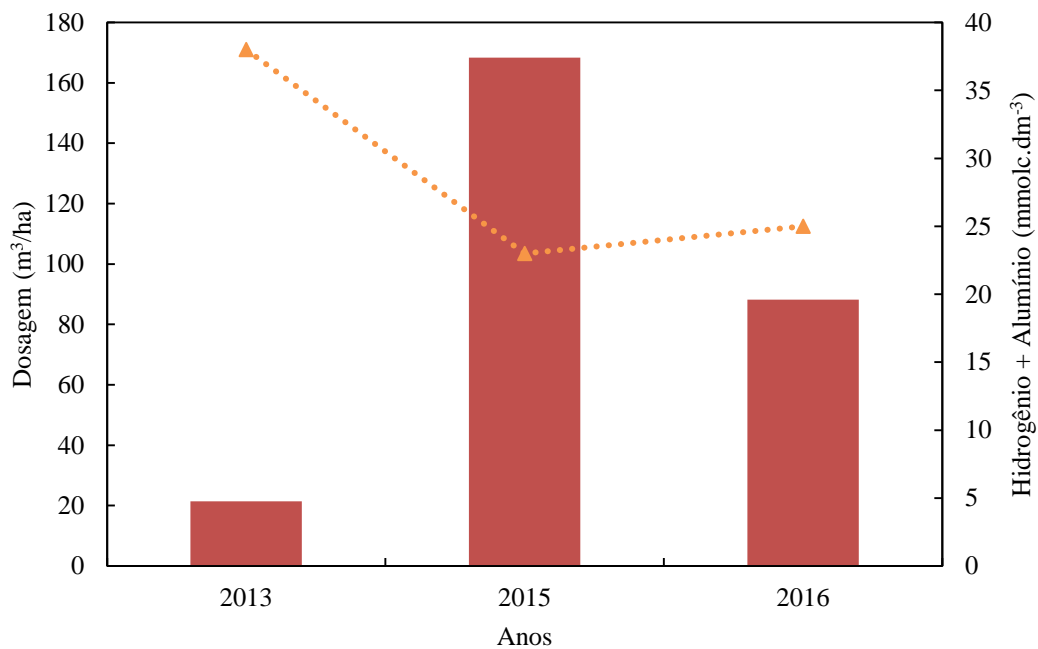


Figura 44. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro H + Al (▲) analisados na gleba 15 da Fazenda.

A partir das concentrações de  $Al^{3+}$ , é possível determinar o nível de toxicidade por saturação por alumínio, representado por m%, que pode ser prejudicial às culturas de cana-de-açúcar e está relacionada com possíveis reduções da fertilidade do solo.

O menor valor de m% foi de 0,19, tanto na gleba 15 em 2015 e na gleba 27 em 2017, e seu valor máximo foi de 41,19% na gleba 75 em 2014 (Tabela 12). Outros valores altos foram de 27,50% na gleba 78 em 2013, 27,29% na gleba 38 em 2014 e 17,85% na gleba 84 em 2015. A maioria das porcentagens ficou entre 0,35 a 6,68%.

Como comentado no capítulo de Revisões bibliográficas (pág. 16), solos com m% maior que 20% apresentam risco de toxicidade prejudicial às lavouras de cana-de-açúcar. Desta forma, os solos das glebas 75 em 2014, 78 em 2013 e a gleba 38 em 2014 apresentaram toxicidade por saturação por alumínio.

No gráfico da comparação com as dosagens de vinhaça de 2014 (Figura 45), com exceção da gleba 8 que teve percentual de m% baixo (0,35%) e inversamente proporcional ao cálculo de dosagem desta gleba, os resultados de m% da gleba 75 e 38 apresentaram relação direta com seus respectivos cálculos de dosagem e foram algumas das glebas da fazenda que manifestaram maiores porcentagens de m% no período de 2012 a 2017.

Os resultados foram bem semelhantes aos resultados de  $Al^{3+}$  (Figura 41), uma vez que o valor de m% é resultante da saturação de  $Al^{3+}$  no solo (Eq. 4 da página 16). Os resultados

também foram semelhantes aos dados de CTC total (Figura 37), com a diferença que a CTC da gleba 8 teve uma relação direta com a dosagem de vinhaça, provavelmente porque m% também é definida pela CTC efetiva (não considera a quantidade de íons  $H^+$  do solo) ao invés da CTC total. Os valores de m% também tiveram uma relação totalmente inversa com os valores de V% em 2014 (Figura 33), que expõe um caso de redução da fertilidade do solo em conjunto com o aumento da toxicidade por alta saturação de alumínio.

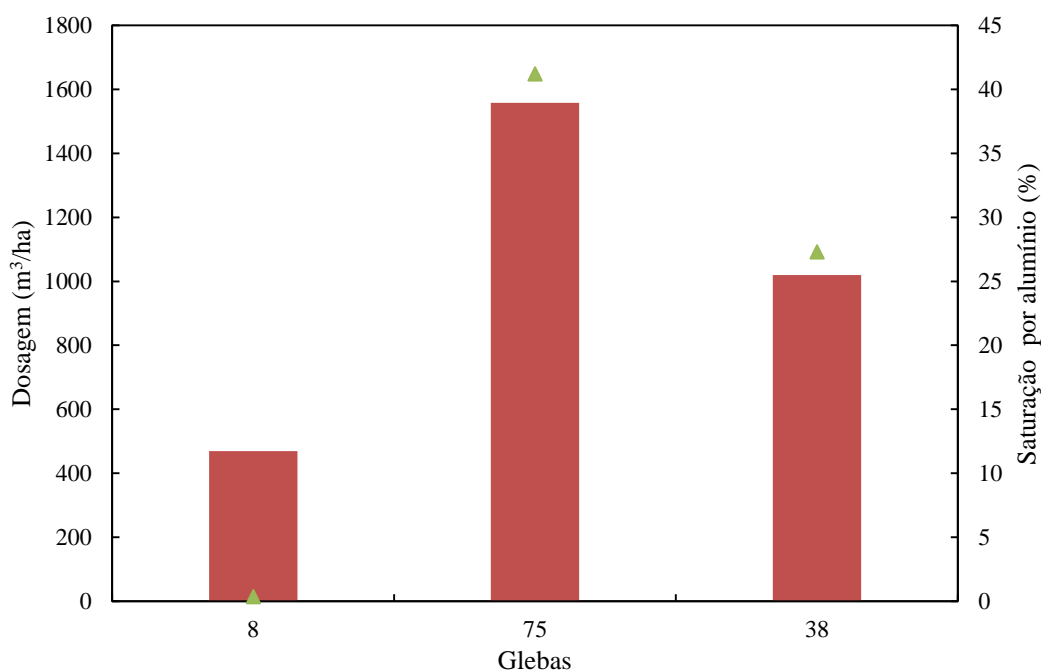


Figura 45. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro de m% ( $\blacktriangle$ ) no ano de 2014.

Quanto à comparação de m% com as dosagens de vinhaça na gleba 15 (Figura 46), o valor apresentado em 2015 (justamente o menor valor de m% do período estudado) foi inversamente proporcional ao cálculo de dosagem, ou seja, não necessariamente o aumento do cálculo de dosagem ocorre como consequência da alta concentração de Al, pois também depende das concentrações dos íons  $H^+$  e dos cátions de base presentes neste solo. Nos anos de 2013 e 2016, a relação dosagem com m% foi diretamente proporcional, tendo sido semelhante aos resultados de  $Al^{3+}$ .

Os resultados de m% também seguiram um padrão semelhante aos dados de CTC total (Figura 38), uma vez que em 2015 a CTC total também teve uma relação inversa com a dosagem de vinhaça na gleba 15. No entanto, a comparação com os valores de V% (Figura 34) foram diferentes nesse quesito, pois ao mesmo tempo em que m% foi inversamente

proporcional à dosagem de vinhaça em 2015 na gleba 15, os percentuais de V% tiveram uma relação direta ao cálculo de dosagem nas mesmas condições.

Contudo, as variações de V% não são necessariamente reduzidas com o aumento de m%, uma vez que na gleba 84 no ano 2015 houve percentual de V% de 60,91 e de m% de 17,85% (Tabela 12), enquanto que na gleba 15 em 2013 observou-se uma porcentagem de V% alta de 63,93% com valor não tão reduzido de m% com 0,43% (ambos foram diretamente proporcionais ao cálculo de dosagem de 2013 na gleba 15 nas Figuras 34 e 46), possivelmente devido à aplicação de outros fertilizantes ou por meio de outros fatores que não exclusivamente referem à dosagem de vinhaça.



Figura 46. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com o parâmetro de m% (▲) analisados na gleba 15 da Fazenda.

Além dos cátions de base e das concentrações de  $Al^{3+}$  e  $H^+$ , o parâmetro da CTC também depende da quantidade de MO presente no solo, uma vez que esta age como partículas coloidais que tem a capacidade trocar cátions de Ca, Mg, K, Al e íons  $H^+$ , assim como os argilominerais componentes do solo.

O maior valor de MO foi equivalente à  $30 \text{ g.dm}^{-3}$  na gleba 6 em 2012, seguido pelo valor de  $24 \text{ g.dm}^{-3}$  em 2015 na gleba 15 e de  $23 \text{ g.dm}^{-3}$  em 2013 também na gleba 15 (Tabela 12). As quantidades mínimas de MO observadas foram de  $8 \text{ g.dm}^{-3}$  na gleba 29 de 2013 e 5

$\text{g.dm}^{-3}$  na gleba 28 em 2016, que também foram as que apresentaram os menores valores de CTC total.

A redução da MO provavelmente influenciou a diminuição da CTC, porém a quantidade de substâncias orgânicas do solo não é o único fator que influencia na troca de cátions, uma vez que as glebas que manifestaram os maiores valores de CTC não foram os que apresentaram a maior quantidade de MO (Tabela 12).

No caso da comparação com as dosagens de vinhaça de 2014 (Figura 47), a quantidade de MO na gleba 8 foi relativamente alta ( $17 \text{ g.dm}^{-3}$ ), apesar do cálculo de dosagem ter sido menor que nas outras glebas com aplicação de vinhaça naquele ano ( $469,33 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ ). Nas glebas 75 e 38, ambas apresentaram a mesma quantidade de MO de  $14 \text{ g.dm}^{-3}$  com dosagens de vinhaça diferentes uma da outra, ainda que estas glebas terem sido as que manifestaram os maiores cálculos de dosagem de vinhaça do período de 2012 a 2017. Estas glebas também tiveram CTC total semelhantes, de  $288,59 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  na gleba 75 e  $277,72 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  (Figura 37), podendo ser outra evidência de que a CTC total tem contribuição tanto da MO como dos argilominerais do solo.

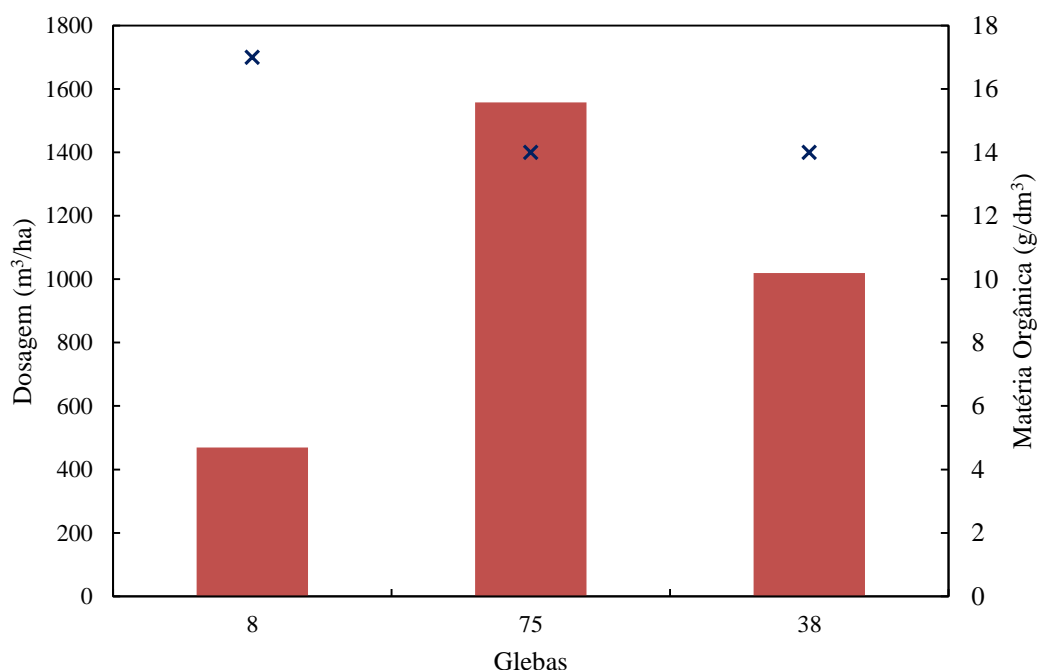


Figura 47. Comparação da dosagem da vinhaça (em vermelho) com a MO do solo (x) da Fazenda analisados no ano de 2014.

Por sua vez, a análise da gleba 15 (Figura 48) expôs resultados de MO positivamente correlatos aos cálculos de dosagem de vinhaça. Apesar da diferença de dosagem de vinhaça de 2013 e de 2015, a MO não teve uma variação expressiva, com diferença de apenas  $1 \text{ g.dm}^{-3}$

<sup>3</sup>. Por outro lado, os anos de 2013 e 2015 apresentaram altos valores MO, porém o ano de 2015 teve o decréscimo da CTC em comparação com os outros anos de aplicação de vinhaça na gleba 15 (Figura 38) e, por conseguinte, o acréscimo de MO no solo não representa necessariamente o aumento da CTC. De 2015 para a 2016, a MO decaiu de  $24 \text{ g.dm}^{-3}$  para  $21 \text{ g.dm}^{-3}$ , assim como a dosagem de vinhaça decaiu de 2015 para 2016 (de  $168,39 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  para  $88,19 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ ), o que foi diferente nos resultados da gleba 15 para a CTC (Figura 38), cátions de base (Figura 36) e H+Al (Figura 44).

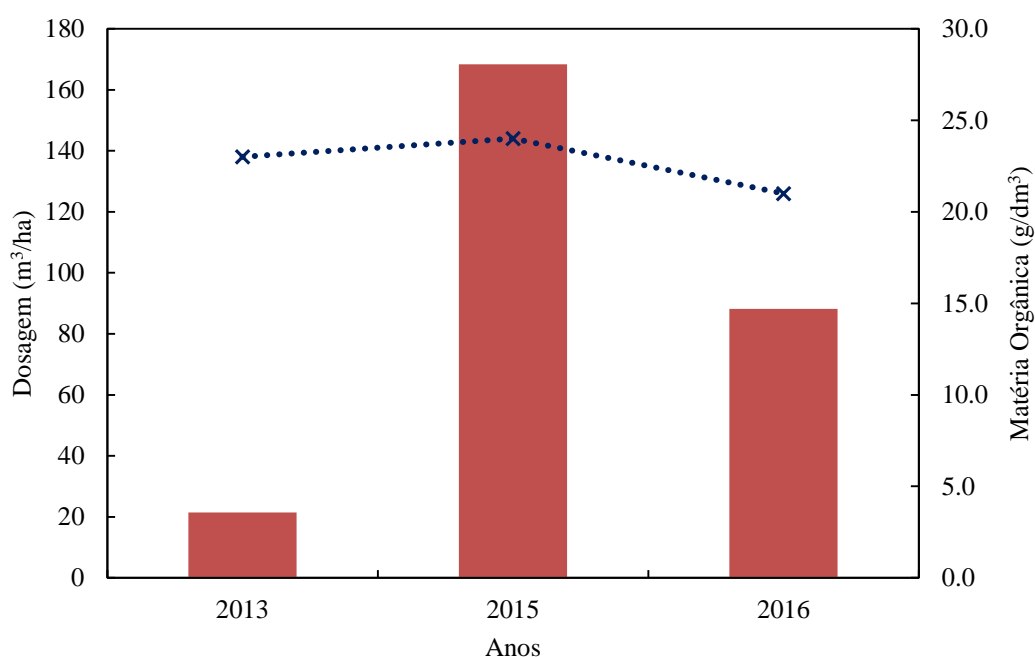


Figura 48. Comparação temporal da dosagem da vinhaça (em vermelho) com a MO do solo (x), analisados na gleba 15 da Fazenda.

A partir dos parâmetros físico-químicos do solo, foi possível observar que, nas glebas 75 e 38 de 2014 que foram as que apresentaram os maiores cálculos de dosagem de vinhaça, foram também foram as que manifestaram maiores concentrações de íons  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  do que de cátions de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$ , cuja contribuição na CTC total foi maior do que dos cátions de base.

Essa questão também se refletiu na fertilidade do solo expressa pelo parâmetro V%, que também se apresentou reduzido nas glebas 75 e 38 em 2014, agravado pela alta acidez e toxicidade por alumínio. Contudo, como o cálculo de dosagem de vinhaça considera o valor de CTC total na sua fórmula (Eq. 1 da página 9), mesmo com altas concentrações de  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  e com a baixa fertilidade os cálculos de dosagem foram demasiado altos para essas glebas. Desta forma, ao fazer o cálculo do volume de vinhaça a ser aplicada é necessário atentar-se às

condições das propriedades físico-químicas do solo, principalmente condições de acidez e toxicidade por alumínio associados à baixa fertilidade, para que não ocorra prejuízos na produtividade das culturas de cana-de-açúcar nos anos seguintes a aplicação da vinhaça. Uma discussão interessante seria que, ao invés de considerar a CTC total no cálculo de dosagem de vinhaça, poderia ser considerada a CTC efetiva nesta fórmula a fim de não usar os íons  $H^+$  na somatória de CTC e conseqüentemente não aconteceria altos cálculos de volume de vinhaça com altos níveis de acidez do solo.

Em dosagens previamente calculadas, a aplicação de vinhaça pode elevar a fertilidade do solo ao longo do tempo. Os parâmetros da gleba 15 no ano de 2015 mostraram aumento da fertilidade, associado ao aumento dos cátions de base e da MO com a redução da CTC total, da quantidade de  $Al^{3+}$  e de m%. As altas concentrações de  $K^+$  da vinhaça (Tabela 9) possibilitaram a reposição desse macronutriente no solo, uma vez que o teor de  $K^+$  do solo aumentou de 3.99 a 5.06  $mmol_c.dm^{-3}$  na gleba 15 de 2015 a 2016 após ter sido calculado um maior volume de vinhaça em 2015 (Figura 36 e Tabela 12).

Por outro lado, discutiu-se a influência de outros fatores na variação dos parâmetros físico-químicos do solo que não exclusivamente a aplicação de vinhaça pela fertirrigação, dentre estes o tipo de manejo do solo, o uso de calagem e as variações climáticas da área de estudo, sendo necessária a análise conjunta destes fatores ao estudar os efeitos nas condições de fertilidade do solo. Outro ponto observado foi a contribuição dos argilominerais e demais minerais do solo na CTC e na variação dos cátions de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $H^+$  e  $Al^{3+}$  além da MO.

Um exemplo sobre a influência de outros fatores além da aplicação da vinhaça na variação das propriedades físico-químicas do solo em comparação com a bibliografia pode ser observado nos resultados de Zolin et al. (2011), que avaliou os parâmetros de fertilidade de latossolos vermelho escuros semelhantes ao analisado na Fazenda de estudo também sujeitos a disposição de vinhaça, porém com aspectos físicos diferentes, uma vez que foi realizado na região Noroeste do Paraná no município de Cidade Gaúcha.

O estudo de Zolin et al. (2011) fez a análise de áreas cultivadas com cana-de-açúcar com diferentes períodos de aplicação de vinhaça, de 1,2,3,4,12 e 20 anos, e uma área testemunha, sem fertirrigação. Para as áreas que receberam vinhaça, cada ano correspondeu a aplicação da dosagem de 150  $m^3.ha^{-1}$  de vinhaça. A maioria dos solos analisada no estudo foi caracterizada como Latossolos Vermelhos Distróficos, com exceção do solo de Argilossolo Vermelho Distrófico presente na área com 1 ano de fertirrigação com vinhaça (Tabela 13), foram coletadas em trincheiras nos intervalos de profundidades de 0 a 20 cm e de 20 a 40 cm cada área analisada (Tabela 14).

Tabela 13. Número de aplicações de dosagens de vinhaça e classificação dos solos das áreas analisadas por Zolin et al. (2011).

<b>Número de Aplicações de Vinhaça</b>	<b>Classificação do solo</b>
Testemunha	Latossolo Vermelho Distrófico
1 Aplicação	Argissolo Vermelho Distrófico
2 Aplicações	Latossolo Vermelho Distrófico
3 Aplicações	Latossolo Vermelho Distrófico
4 Aplicações	Latossolo Vermelho Distrófico
12 Aplicações	Latossolo Vermelho Distrófico
20 Aplicações	Latossolo Vermelho Distrófico

Tabela 14. Resultados das propriedades físico-químicas das amostras de solo analisados por Zolin et al. (2011) nas profundidades de 20 e 40 cm.

<b>Tratamento</b>	<b>pH</b>	<b>V</b> %	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>SB</b>	<b>CTC</b>	<b>Al<sup>3+</sup></b>	<b>H+Al</b>	<b>m</b> %
Test. 0-20	7.0	55	15.5	3.2	0.6	19.3	35.4	0	16.1	0
Test. 0-40	7.0	45	9.8	2.9	0.4	13.1	29.2	0	16.1	0
1 aplic. 0-20	5.7	37	11.5	3.5	1.1	16.1	43.4	0	27.3	0
1 aplic. 20-40	6.1	40	10.2	3.1	0.4	13.7	34.0	0	20.3	0
2 aplic. 0-20	7.1	62	24.2	3.0	1.4	28.6	46.0	0	17.4	0
2 aplic. 20-40	7.3	56	15.9	2.5	1.7	20.1	36.2	0	16.1	0
3 aplic. 0-20	6.6	58	17.8	5.5	2.4	25.7	44.5	0	18.8	0
3 aplic. 20-40	7.0	50	11.4	3.5	2.4	17.3	34.7	0	17.4	0
4 aplic. 0-20	6.1	43	12.1	4.4	1.5	18.0	41.6	0	23.6	0
4 aplic. 20-40	6.2	35	6.7	2.3	1.1	10.1	28.9	0	18.8	0
12 aplic. 0-20	6.3	40	8.9	3.6	2.2	14.7	36.6	0	21.9	0
12 aplic. 20-40	6.3	43	11.2	2.5	1.7	15.4	35.7	0	20.3	0
20 aplic. 0-20	5.3	25	6.6	3.1	1.9	11.6	45.8	2	34.2	14.7
20 aplic. 20-40	5.1	28	6.8	3.0	0.9	10.7	38.0	2	27.3	15.8

Em relação aos resultados apresentados por Zolin et al. (2011), a maioria dos solos analisados apresentaram percentuais de V% menores que 50% (solos distróficos) conforme o tempo de aplicação de vinhaça, com exceção das amostras de solos da área Testemunho na profundidade de 0-20 cm e das áreas com 2 e 3 anos de aplicação que indicaram solos eutróficos (Tabela 14).

Em comparação com os resultados obtidos na fazenda de estudo em Santa Cruz das Palmeiras (Tabela 12), os valores de V% da área com aplicação de vinhaça no período de 20 anos (25% na profundidade de 0-20 cm e de 28% na profundidade de 20-40 cm) apresentaram percentuais semelhantes aos observados nas glebas 75 e 38 em 2014 (23,42% e 35,55%, respectivamente), correspondentes aos menores índices de V% da área de estudo.

Por sua vez, os maiores percentuais de V% obtidos na fazenda de estudo, equivalentes a 82,31 % da gleba 40 em 2012 e de 76,26% da gleba 15 em 2016 (Tabela 12), foram demasiadamente superiores aos maiores percentuais de V% apresentados por Zolin et al. (2011), os quais os maiores percentuais de V% observados foram de 58% da amostra de solo da área com 3 anos de aplicação de vinhaça na profundidade de 0-20 cm (3 aplic. 0-20) e da amostra de solo superficial da área Testemunho (Test. 0-20) de 55% (Tabela 14).

Com relação aos cátions de base (Tabela 14), os valores máximos das concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^+$  obtidos por Zolin et al. (2011) foram de  $24.2 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  (2 aplic. 0-20),  $5,5 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  (3 aplic. 0-20) e de  $2,4 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  (3 aplic. 0-20 e 20-40), respectivamente, ao passo que os valores mínimos foram correspondentes a  $6.7 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  de  $\text{Ca}^{2+}$  (4 aplic. 20-40),  $2.3 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  de  $\text{Mg}^{2+}$  (4 aplic. 20-40) e de  $0,4 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  de  $\text{K}^+$  (Test. 0-40 e 1 aplic. 20-40). Por sua vez, os valores máximos e mínimos de SB obtidos pelos autores foram de respectivos  $28.6 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  (2 aplic. 0-20) e  $10.1 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  (4 aplic. 20-40).

Ao serem relacionados com os resultados de cátions de base da fazenda de estudo (Tabela 12), as concentrações obtidas por Zolin et al. (2011) foram substancialmente inferiores às concentrações máximas e mínimas analisadas na área de estudo em Santa Cruz das Palmeiras. Ademais, a maior concentração de SB analisada na área de estudo (de  $125,65 \text{ mmolc.dm}^{-3}$  da gleba 40 em 2012) é aproximadamente cinco vezes maior que o valor máximo de SB obtido pelos autores supracitados. Desta forma, as concentrações de macronutrientes avaliadas na área de estudo apresentaram elevadas quantidades em comparação com o trabalho mencionado.

No estudo de Zolin et al. (2011), as áreas que foram sujeitas a maiores períodos de fertirrigação com vinhaça apresentaram as menores concentrações de cátions de base e

percentuais de V%, enquanto que as áreas com aplicação de vinhaça por 2 e 3 anos manifestaram bons índices de fertilidade.

O mesmo padrão também se aplica na comparação com os resultados de CTC de Zolin et al. (2011) com os obtidos na área de estudo (Tabela 14 e Tabela 12, respectivamente), onde os valores máximos e mínimos de CTC obtidos pelos autores de  $46.0 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  (2 aplic. 0-20) e de  $28.9 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  (4 aplic. 20-40) foram consideravelmente menores do que o valor de CTC da gleba 75 ( $288,59 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) e da gleba 38 ( $277,72 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) de 2014 da maior concentração obtida na área de estudo.

Contudo, a principal diferença entre os resultados analisados na área de estudo com os de Zolin et al. (2011) foi constatada em relação às concentrações de  $\text{Al}^{3+}$  (e conseqüentemente de m%), onde a maioria das áreas analisadas pelos autores apresentaram concentração nula de  $\text{Al}^{3+}$  (Tabela 14), com exceção das amostras da área com 20 anos de aplicação de vinhaça que expuseram concentrações de  $2 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  e m% de 14.7% (20 aplic. 0-20) e 15.8% (20 aplic. 20-40), ao passo que as concentrações de  $\text{Al}^{3+}$  analisadas nas glebas 75 ( $47,33 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) e 38 ( $37,05 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) da área de estudo em 2014 foram significativamente maiores (Tabela 12 e Figura 41).

Outro ponto divergente entre os resultados obtidos no estudo e os observados na fazenda em Santa Cruz das Palmeiras está relacionado com as variações de pH dos solos, uma vez que o menor valor de pH obtido por Zolin et al. (2011) foi equivalente à 5,1 da 20 aplic. 20-40 (Tabela 14), ao passo que os resultados da fazenda apresentaram valores de pH mais ácidos, principalmente nas glebas 75 e 38 em 2014 que manifestaram valores de pH de 3,8 e 3,9 (Tabela 12 e Figura 39).

Conseqüentemente, os resultados de H+Al apresentados por Zolin et al. (2011) também foram demasiadamente menores dos que os analisados nas glebas 75 e 38 em 2014, de respectivamente  $221 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  e  $179 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  (Tabela 12 e Figura 43), em que foram analisados concentrações máximas de H+Al na área com 20 de aplicação de vinhaça correspondentes à  $34.2 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  (20 aplic. 0-20) e de  $27.3 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  (20 aplic. 20-40) e mínima de  $16.1 \text{ mmol}_c.\text{dm}^{-3}$  na área Testemunho (Tabela 14).

Desta forma, apesar das amostras de latossolos vermelhos analisadas por Zolin et al. (2011) manifestarem baixos índices de V% e de concentrações de cátions de base em relação aos resultados da fazenda em Santa Cruz das Palmeiras, estes também apresentaram baixas concentrações de íons  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$ , principalmente em relação aos resultados de 2014 quando foram obtidas os maiores calculados de dosagem de vinhaça. Provavelmente, as diferenças analisadas em comparação com os resultados estão relacionadas à outros fatores da região de

estudo adotada pelos autores, como o tipo de geologia local predominante (caracterizada pelos Arenitos Caiuá) e granulometria dos solos analisados, como discutido no tópico seguinte.

#### 6.4. Análises granulométricas

A análise granulométrica das amostras de solo (Figura 49 e Tabela 15) apresentou maior fração de areia fina (0,25 a 0,125 mm) com porcentagens entre 42,303% a 61,155%, seguida da fração de areia média (0,5 a 0,25 mm) com percentual no intervalo entre 12,478% a 29,587% e de areia muito fina (0,125 a 0,064 mm) com valores entre 12,108% a 21,886%, caracterizando as seis amostras de latossolo vermelho da fazenda como um solo arenoso muito fino a médio.

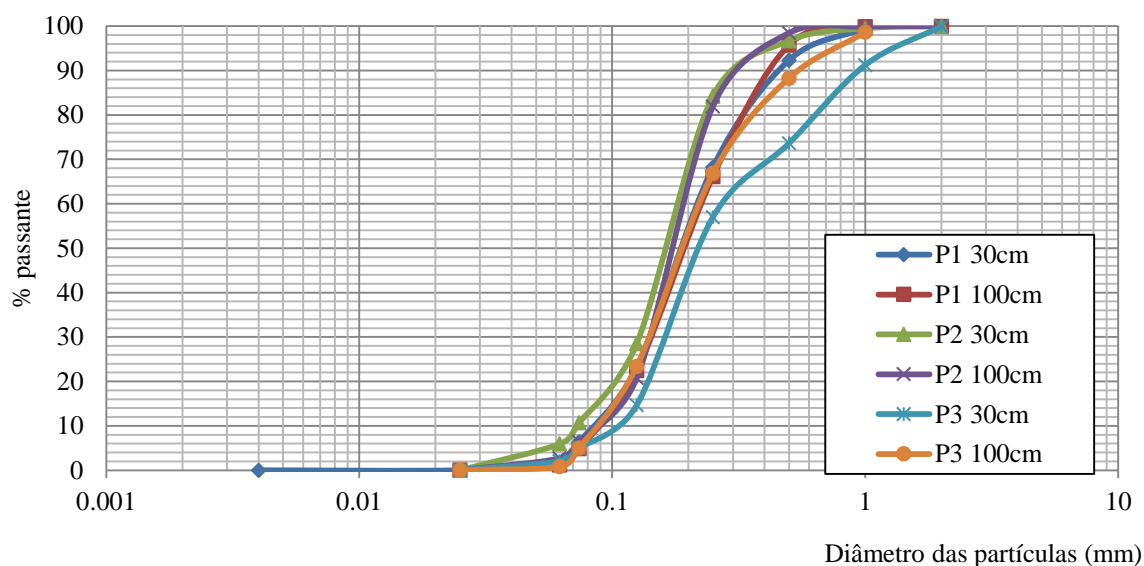


Figura 49. Curva granulométrica das seis amostras coletadas da Fazenda.

Tabela 15. Porcentagens das frações granulométricas das seis amostras de solo da Fazenda.

Porcentagem (%)		Sedimentos						
		Areia Muito Grossa	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Areia Muito Fina	Silte	Argila
Amostras	Glebas	2-1 mm	1-0,5mm	0,5-0,25 mm	0,25-0,125 mm	0,125 - 0,064 mm	0,064-0,004mm	<0,004 mm
P1 30cm	Gleba 27	0	7.28	24.10	45.00	20.99	2.21	0.41
P1 100cm	Gleba 27	0.087	4.154	29.587	43.669	20.675	1.679	0.149
P2 30cm	Gleba 29	0.451	2.799	12.478	55.690	21.808	6.717	0.057
P2 100cm	Gleba 29	0.085	1.444	16.511	61.155	17.458	3.313	0.034
P3 30cm	Gleba 56	8.715	17.590	16.655	42.303	12.108	2.555	0.075
P3 100cm	Gleba 56	0	10.366	21.436	43.418	21.886	1.524	1.371

No PAV de 2013, havia uma análise granulométrica de um dos locais de influência da usina sucroalcooleira da região, feita por uma empresa terceirizada no estudo de poços de monitoramento de águas subterrâneas das fazendas fertirrigadas (Tabela 16). A análise granulométrica do PAV apresentou maior fração de areia muito fina (40,44%), seguido de areia Fina com percentual de 29,21%, de argila com 13,3% e de areia média de 12,05%, caracterizando um solo arenoso muito fino a fino com fração argilosa. Desta forma, a granulometria apresentada pelo PAV 2013 manifestou maior quantidade da fração argila em relação à análise granulométrica das amostras de solo coletadas na Fazenda.

Tabela 16. Percentagens das frações granulométricas apresentadas no PAV de 2013 na região de influência da usina sucroalcooleira da área de estudo.

Porcentagem (%)	Sedimentos							
	Pedregulho	Areia Muito Grossa	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Areia Muito Fina	Silte	Argila
	2-4mm	2-1 mm	1-0,5mm	0,5-0,25 mm	0,25-0,125 mm	0,125 - 0,064 mm	0,064-0,004mm	<0,004 mm
PAV 2013	0.55	0.04	0.09	12.05	29.21	40.44	4.31	13.3

Como discutido no subtópico de Pedologia dos Aspectos físicos do capítulo de Área de Estudo (Pág.28), apesar de possuírem elevada porosidade e friabilidade que são características benéficas para as lavouras, os latossolos vermelhos com granulometria predominantemente arenosa tem a tendência de serem solos distróficos com baixa disponibilidade de nutrientes e elevadas concentrações de  $Al^{3+}$  devido à facilidade de lixiviação dos cátions de base em solos arenosos, o que pode acarretar na contaminação de lençóis freáticos a depender das condições geológicas, geomorfológicas e hidrográficas (ARCADIS TETRPLAN, 2011; PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2017; CBH-MOGI et al.,1999).

Desta forma, a análise granulométrica das amostras de solo coletadas corroborou com os resultados das propriedades físico-químicas do solo discutidas no tópico anterior, no qual foram observados altos teores de Al e íons  $H^+$  em detrimento das concentrações dos cátions de base em um solo arenoso muito fino a médio e, conseqüentemente, é necessária a reposição dos macronutrientes do solo (principalmente de  $K^+$ ) por meio da aplicação controlada da vinhaça para que ocorra o aumento da fertilidade para as lavouras de cana-de-açúcar.

Os resultados da análise granulométrica demonstraram também baixos percentuais de argilas, podendo ser uma das razões de aumentar a quantidade de MO do solo com aplicação da vinhaça (que dependendo da  $R_{DQO/DBO}$  esse efluente pode ter alta carga de material orgânico biodegradável) com o intuito de elevar a CTC total. Todavia, a capacidade de troca de cátions no solo pode depender também de sua composição química e mineralógica, como discutido nos resultados de FRX e DRX dos tópicos seguintes.

Em comparação com os resultados de Zolin et al. (2011), a granulometria predominante analisada foi de areias finas, com porcentagens entre 67 a 43%, seguidas de porcentagens de 52 a 25% de areias grossas, o que caracteriza estes solos como solos arenosos finos a grossos (Tabela 17). Por apresentarem granulometria maior que a analisada na fazenda de estudo, os solos analisados por Zolin et al. (2011) possuem maior facilidade de lixiviação dos macronutrientes, sendo uma possível causa para os baixos índices de fertilidade apresentados por estes solos em comparação com os resultados das propriedades físico-químicas do solos analisados na fazenda de estudo.

Tabela 17. Análise granulométrica dos solos analisados por Zolin et al. (2011).

Tratamento	Profundidade (m)	Areia	Areia	Silte	Argila
		Grossa	fina		
%					
Testemunha	0 - 0,20	26	66	3	5
Testemunha	0 - 0,40	25	67	2	6
1 aplicação	0 - 0,20	48	43	3	6
1 aplicação	0 - 0,40	41	46	3	10
2 Aplicações	0 - 0,20	35	59	2	4
2 Aplicações	0 - 0,40	30	62	3	5
3 Aplicações	0 - 0,20	45	48	2	5
3 Aplicações	0 - 0,40	44	46	4	6
4 Aplicações	0 - 0,20	35	55	4	6
4 Aplicações	0 - 0,40	34	57	3	6
12 Aplicações	0 - 0,20	51	43	2	4
12 Aplicações	0 - 0,40	52	39	3	6
20 Aplicações	0 - 0,20	42	44	2	12
20 Aplicações	0 - 0,40	34	48	2	16

### 6.5. Análise química por FRX

Em relação à composição química dos óxidos presentes nas amostras de solo coletadas (Tabela 18), teve-se altas porcentagens de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) entre 33,81 a 83,10%. A segunda maior concentração foi de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  entre 4,66 a 25,21%, seguida de altos percentuais de óxidos de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de 6,27 a 21,45%, além da presença relevante de  $\text{TiO}_2$  com variação entre 1,04 a 7,72%.

Tabela 18. Caracterização química dos óxidos (elementos maiores) presentes nas amostras de solo da fazenda de estudo.

Composição Química	Unidade	Amostras					
		P1	P1	P2	P2	P3	P3
		30cm	100cm	30cm	100cm	30cm	100cm
		Gleba	Gleba	Gleba	Gleba	Gleba	Gleba
		27	27	29	29	56	56
$\text{SiO}_2$	ppm	33.90	35.04	83.10	78.10	79.06	33.81
$\text{TiO}_2$	ppm	7.72	6.55	1.50	1.80	1.04	7.04
$\text{Al}_2\text{O}_3$	ppm	19.47	21.45	6.27	8.80	9.03	21.29
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	ppm	25.21	24.47	4.66	5.95	5.70	25.21
$\text{MnO}$	ppm	0.16	0.12	0.02	0.02	0.02	0.12
$\text{MgO}$	ppm	0.30	0.26	0.03	0.04	0.02	0.23
$\text{CaO}$	ppm	0.32	0.23	0.05	0.05	0.07	0.16
$\text{Na}_2\text{O}$	ppm	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.02
$\text{K}_2\text{O}$	ppm	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02	0.04
$\text{P}_2\text{O}_5$	ppm	0.26	0.26	0.06	0.06	0.05	0.25
LOI	ppm	12.58	11.66	4.30	5.21	5.03	11.83
Soma	ppm	99.99	100.09	100.03	100.08	100.04	100.00

A grande quantidade de sílica e dos óxidos de ferro e de alumínio é provavelmente indicativo da presença de altas quantidades de silicatos (possivelmente de quartzo, argilominerais e minerais secundários produtos de intemperismo) e de minerais de óxidos e/ou hidróxidos de ferro e alumínio, sendo minerais característicos de latossolos vermelhos como o observado na área de estudo (ARCADIS TETRPLAN, 2011; PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2017; CBH-MOGI et.al.,1999).

Por sua vez, os menores valores obtidos dos óxidos de elementos maiores foram, da ordem de menor para a maior porcentagem,  $\text{Na}_2\text{O}$  (0,01 a 0,03%),  $\text{K}_2\text{O}$  (0,02 a 0,05%),  $\text{MnO}$  (0,02 a 0,16%),  $\text{MgO}$  (0,02 a 0,30%) e  $\text{CaO}$  (0,05 a 0,32%). A concentração de  $\text{K}_2\text{O}$  das

amostras coletadas em 2018 foi demasiadamente menor, cuja variação foi semelhante com os resultados de propriedades físico-químicas dos PAVs de 2012 a 2017. Outra similaridade dos dados da análise química com os parâmetros de fertilidade do solo foi a presença da relação  $\text{CaO} > \text{MgO} > \text{K}_2\text{O}$  (Tabela 12 e Figuras 35 e 36). Desta forma, a análise química evidencia que o latossolo vermelho da área de estudo tem insuficiência em  $\text{K}_2\text{O}$  e, conseqüentemente, requer a aplicação de vinhaça pela fertirrigação para a reposição desse nutriente no solo.

No caso da análise de elementos menores presentes nas amostras (Tabela 19), a maior concentração adquirida foi de V com média de  $555,77 \pm 246,58$  ppm, seguida de Zr ( $267,30 \pm 36,13$  ppm), Ba ( $162,15 \pm 117,80$  ppm) e de Cr ( $152,18 \pm 28,94$  ppm). As menores concentrações foram de Rb ( $10,50 \pm 3,95$  ppm), Ce ( $12,05 \pm 16,19$  ppm), Sr ( $12,52 \pm 14,69$  ppm) e Ga ( $17,95 \pm 1,54$  ppm), na ordem da menor para a maior quantidade. Estes elementos provavelmente tem substituição isomórfica com os cátions da estrutura cristalina dos minerais do solo, sendo necessária a análise mineralógica do solo por meio da DRX a fim de compreender a dinâmica de concentração destes elementos.

Tabela 19. Caracterização química dos elementos traços das amostras de solo da fazenda de estudo.

Composição Química	Unidade	Amostras						Média $\pm$ Desvio Padrão
		P1		P2		P3		
		30cm	100cm	30cm	100cm	30cm	100cm	
		Gleba	Gleba	Gleba	Gleba	Gleba	Gleba	
		27	27	29	29	56	56	
Cr	ppm	138,30	131,90	116,80	180,40	145,30	200,40	$152,18 \pm 28,94$
Ni	ppm	119,00	57,20	16,20	18,80	17,70	72,40	$50,22 \pm 37,58$
Ba	ppm	314,50	182,50	62,00	71,90	27,30	314,70	$162,15 \pm 117,80$
Rb	ppm	17,50	6,80	6,30	11,40	8,00	13,00	$10,50 \pm 3,95$
Sr	ppm	33,30	0,60	3,50	2,00	2,50	33,20	$12,52 \pm 14,69$
La	ppm	47,60	40,30	4,60	8,30	14,50	43,20	$26,42 \pm 17,65$
Ce	ppm	9,70	1,60	1,50	10,20	47,30	2,00	$12,05 \pm 16,19$
Zr	ppm	303,20	222,10	274,30	290,30	213,90	300,00	$267,30 \pm 36,13$
Y	ppm	35,40	31,60	9,30	10,90	10,80	54,20	$25,37 \pm 16,59$
Nb	ppm	49,80	21,40	9,10	18,80	10,40	46,00	$25,92 \pm 16,17$
Cu	ppm	110,50	97,00	24,30	19,40	19,80	121,40	$65,40 \pm 44,82$
Zn	ppm	85,70	57,30	29,70	44,00	32,60	96,80	$57,68 \pm 25,54$
Co	ppm	47,30	38,80	0,90	3,30	7,00	59,70	$26,17 \pm 23,31$
V	ppm	825,30	554,40	348,90	382,90	285,00	938,10	$555,77 \pm 246,58$
Ga	ppm	19,00	20,10	15,60	16,30	18,30	18,40	$17,95 \pm 1,54$

## 6.6. Análise mineralógica por DRX

As análises mineralógicas das amostras de solos (Tabela 20 e Figuras 50 a 55) indicaram a presença de argilominerais do grupo da Caulinita (Caulinita, Halloysita, Dickita e Nacrita), Gibbsita, Hematita e Quartzo como principais minerais constituintes do latossolo vermelho da área de estudo, além da ocorrência de minerais de Birnessita, Anatásio, Siderita e Magnesita.

Tabela 20. Composição mineralógica das amostras de solos da fazenda da área de estudo obtidas por meio da DRX, com suas respectivas fórmulas químicas (DANA; HURLBUT, 1960; FIGUEIRA et al. 2016).

Amostras	Glebas	Mineralogia do solo
P1- 30 cm	Gleba 27	Caulinita - $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_3$ , Gibbsita - $\text{Al}(\text{OH})_3$ , Quartzo - $\text{SiO}_3$ , Siderita - $\text{FeCO}_3$ , Magnesita - $\text{MgCO}_3$ , Hematita - $\text{Fe}_2\text{O}_3$
P1-100 cm	Gleba 27	Caulinita - $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_3$ , Halloysita $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ , Birnessita (rica em Na) - $(\text{Na}_{0,7}\text{Ca}_{0,3})\text{Mn}_7\text{O}_{14}\cdot 2,8\text{H}_2\text{O}$ , Gibbsita - $\text{Al}(\text{OH})_3$ , Quartzo - $\text{SiO}_3$ , Hematita - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
P2-30 cm	Gleba 29	Caulinita - $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_3$ , Gibbsita - $\text{Al}(\text{OH})_3$ , Quartzo - $\text{SiO}_3$ , Hematita - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
P2-100 cm	Gleba 29	Dickita - $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})_3(\text{OH})_{12}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , Gibbsita - $\text{Al}(\text{OH})_3$ , Quartzo - $\text{SiO}_3$ , Anatásio - $\text{TiO}_3$ , Siderita - $\text{FeCO}_3$ , Magnesita - $\text{MgCO}_3$ , Hematita - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
P3-30 cm	Gleba 56	Dickita - $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})_3(\text{OH})_{12}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , Gibbsita - $\text{Al}(\text{OH})_3$ , Hematita - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .
P3-100 cm	Gleba 56	Nacrita - $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ , Gibbsita - $\text{Al}(\text{OH})_3$ .

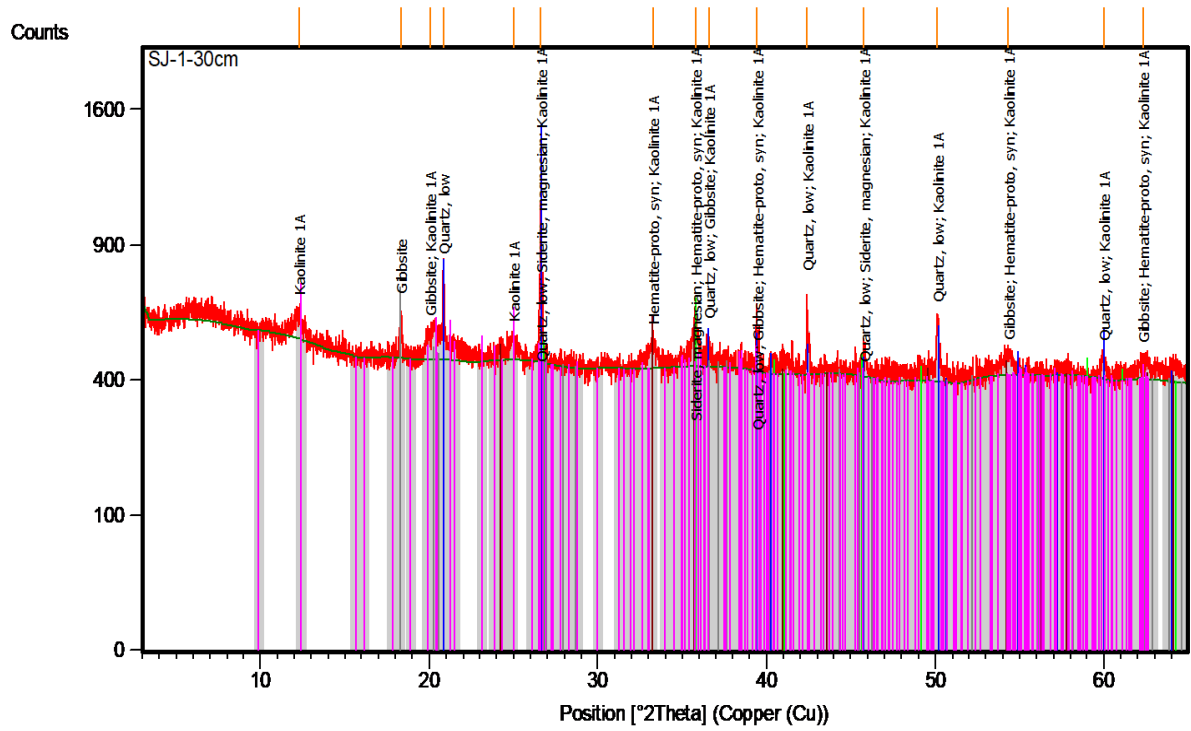


Figura 50. Difratoograma da amostra P1-30 cm da Gleba 27.

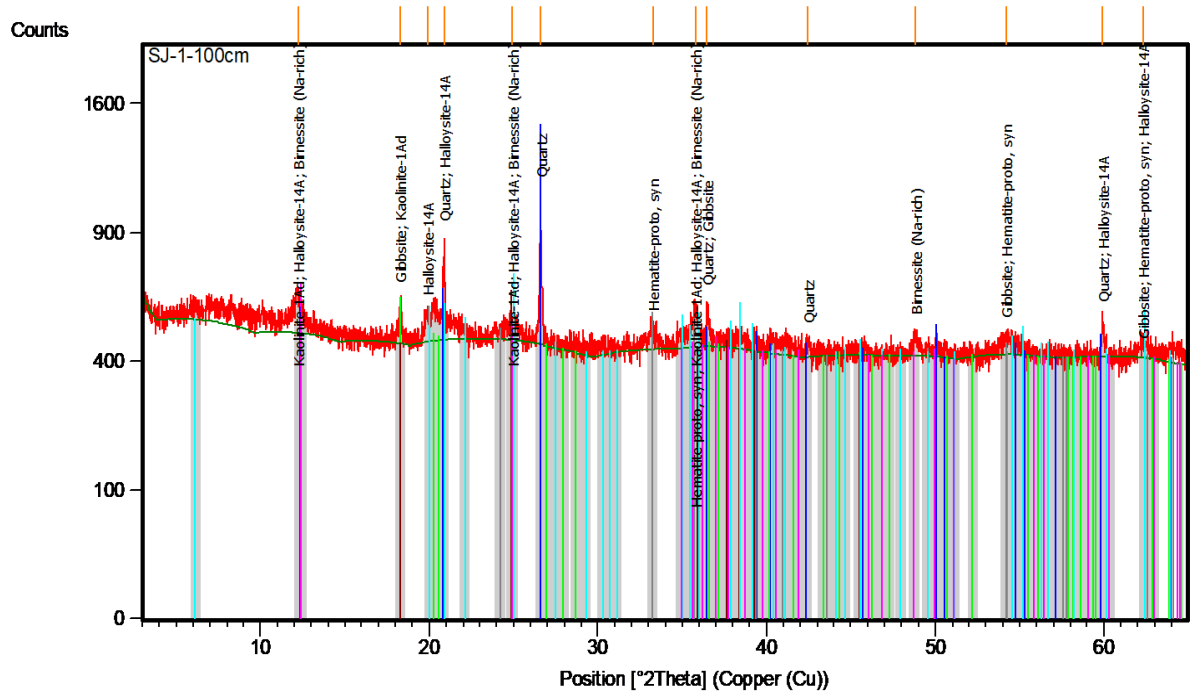


Figura 51. Difratoograma da amostra P1-100 cm da Gleba 27.





CPRM, 2019), que fazem parte da fração coloidal capaz de trocar cátions além da MO do solo.

Por serem silicatos caracterizados por conterem  $Al^{3+}$  em sua estrutura, provavelmente a presença em grande quantidade destes argilominerais nas amostras de solo coletadas está em conformidade com as elevadas porcentagens de  $SiO_2$  e de  $Al_2O_3$  da Tabela 18 da análise química de FRX.

Como discutido anteriormente no tópico de Argilominerais (Pág.19) e no tópico da caracterização pedológica da Área de Estudo (Pág. 28), os argilominerais com estrutura T-O possuem CTC menor que os dos argilominerais com estrutura T-O-T (a exemplo dos minerais de argila do grupo da esmectita como a montmorillonita), sendo muito comuns em latossolos vermelhos formados em climas úmidos e quentes através da hidrólise parcial (retirada dos cátions de  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  e de parte de  $SiO_2$ ) de feldspatos da rocha fonte (VIEIRA, 1988). Neste caso, a adição da MO por meio da aplicação de vinhaça aprimora os índices de CTC do solo, uma vez que os argilominerais do grupo caulinita não adsorvem tantos cátions como as argilas expansivas.

Além dos argilominerais e da MO, a fração coloidal do solo também compreende os minerais de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Tabela 20 e Figuras 50 a 55), ainda que sua CTC é geralmente muito baixa que a daqueles. Os principais óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio observados nas amostras de solo foram os minerais de hematita e a gibbsita, e que provavelmente são os principais contribuintes das altas concentrações de  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  da análise química (Tabela 18) em conjunto com os argilominerais.

A presença de hematita e de altas porcentagens de  $Fe_2O_3$  no solo poderia ser resultado do intemperismo das rochas de intrusões máficas da Formação Serra Geral nos arredores da área de estudo, ou devido à baixa solubilidade de  $Fe_2O_3$  que o impede de ser lixiviado com facilidade e conseqüentemente concentrou-se no perfil de solo o suficiente para que se mineraliza-se em hematita, sendo esta a alternativa mais provável uma vez que não ocorrem rochas da Formação Serra Geral especificamente na área de estudo (contudo pode ter o transporte de cátions por meio da percolação da água de chuvas).

A existência de hematita no solo ao invés da formação de goethita ( $FeOOH$ ) também é um indicador de que a pedogênese ocorreu em clima quente e úmido (MINERALOGIA E QUÍMICA DO SOLO, 2014), comum no estado de São Paulo, sendo também o mineral confere cores avermelhadas ao latossolo vermelho presente na fazenda da área de estudo.

Por sua vez, a gibbsita está relacionada à ocorrência dos argilominerais do grupo da caulinita e dos elevados percentuais de  $Al_2O_3$  do solo da fazenda, pois esta se forma com a

hidrólise total (retirada de todo  $\text{SiO}_2$ ) dos feldspatos e da caulinita e pode se dissolver liberando  $\text{Al}^{3+}$  no solo. Além da hidrólise, a gibbsita e a caulinita podem se dissociar em meios com elevada acidez, pois os íons  $\text{H}^+$  resultantes da dissociação da água e dos ácidos produzidos pela decomposição da MO (ácidos carbônico, sulfúrico e húmico) causam instabilidade na estrutura cristalina dos argilominerais e dos óxidos de alumínio que liberam os íons  $\text{Al}^{3+}$  no solo (VIEIRA, 1988; VIGLIO, 2014).

Por consequência, dependendo das condições de pH e da MO fornecida pela vinhaça, é possível a ocorrência da liberação de  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  no solo pela dissociação de caulinita e gibbsita, tornando o solo mais ácido e tóxico através do aumento de m%. Como a hidrólise é a dissociação dos minerais ao reagirem com água, estes fenômenos são favorecidos principalmente em épocas chuvosas com excedente hídrico. Desta forma, as condições climáticas locais e as reações de alteração dos minerais constituintes do solo devem ser consideradas na análise de possíveis condições de acidez e toxicidade e no cálculo das dosagens de volumes de vinhaça a serem aplicadas na fertirrigação.

Além dos argilominerais e dos óxidos de ferro e de alumínio, outro mineral bastante recorrente nas amostras de solo analisadas foi o quartzo, mineral comum e resistente ao intemperismo. Considerando que a análise química das amostras (Tabela 18) apresentou altas concentrações de sílica e a análise granulométrica caracterizou o solo da fazenda como um solo arenoso muito fino a médio (Figura 49 e Tabela 15), provavelmente o quartzo é o mineral mais abundante do latossolo vermelho da área de estudo.

Provavelmente sua ocorrência pode estar relacionada ao intemperismo das rochas da Formação Corumbataí, principal unidade litoestratigráfica da área de estudo, a qual apresenta camadas de arenito de arenito fino, siltitos cinza escuros e siltitos arroxeados a avermelhados, como também pode ter sido transportado a partir de áreas com rochas intemperizadas das Formações Pirambóia ou das intrusões básicas da Formação Serra Geral.

Outros minerais que provavelmente são resultantes do intemperismo das rochas da Formação Corumbataí foram os carbonatos de Magnesita e de Siderita (Tabela 20 e Figuras 50 e 53), podendo ser originários da alteração dos carbonatos e calcários oolíticos presentes no topo da unidade litoestratigráfica, como também podem ser originários de reações químicas durante a pedogênese do solo. Como tanto o  $\text{Mg}^{2+}$  e o  $\text{Fe}^{2+}$  podem ser inseridos na estrutura da Magnesita quanto na de Siderita por substituições isomórficas (DANA; HURLBUT, 1960), esses dois carbonatos provavelmente estão relacionados às concentrações de MgO e de parte da porcentagem de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  indicados na análise química (Tabela 18).

Além dos óxidos ou hidróxidos de ferro e alumínio analisados através dos minerais de gibbsita e hematita, as amostras de solo coletadas também manifestaram a existência de outros óxidos como a birnessita e o anatásio (Tabela 20 e Figuras 51 e 53).

O mineral de anatásio (Tabela 20 e Figura 53) caracteriza-se como um óxido de Ti ( $\text{TiO}_3$ ) e é uma das formas polimórficas do mineral rutílio, sendo este comumente encontrado em rochas graníticas, pegmatitos graníticos, gnaiss, mica xistos, calcários metamórficos e dolomita e podem ocorrer como inclusões no quartzo (DANA; HURLBUT, 1960), além de ser um mineral resistente ao intemperismo (MINERALOGIA E QUÍMICA DO SOLO, 2014). No caso da área de estudo, é possível que a ocorrência de anatásio nas amostras de solos esteja associada a presença de quartzo, podendo ter como gênese a alteração intempérica das rochas da Formação Corumbataí. Por terem raios e massas atômicas semelhantes, nas análises químicas de FRX pode ocorrer interferência nos resultados de V devido às altas concentrações de Ti nas amostras (SIMABUCO; NASCIMENTO FILHO, 1994), onde existe a possibilidade de os altos índices de V obtidos na análise química (Tabela 19) estarem relacionados à presença de anatásio no solo.

Por sua vez, a birnessita (Tabela 20 e Figura 51) é um óxido de Mn ( $(\text{Na}_{0,7}\text{Ca}_{0,3})\text{Mn}_7\text{O}_{14.2}, 8\text{H}_2\text{O}$ ) com estrutura em camadas, sendo caracterizado como um *Filomanganato* (FIGUEIRA et al., 2016). Este mineral é também um polimorfo do mineral de Pirolusita ( $\text{MnO}_2$ ) com gênese a partir da alteração supérgena de dissolução de Mn de rochas cristalinas, sendo também associado ao anatásio por estarem mineralogicamente enquadrados no grupo do rutílio (DANA; HURLBUT, 1960).

Em relação à análise química obtidas através da FRX, algumas concentrações de elementos menores foram comparados com os resultados de referência de Figueira et al. (2016) de um minério puro de birnessita da província mineral de Carajás, sendo os parâmetros comparados as concentrações em ppm de Ba, Zn, Ni, Cu, Sr, Co (Tabela 21). No caso das amostras coletadas na área de estudo, Ba foi um dos elementos que tiveram maiores teores nas amostras de solo coletadas, com média de  $162,15 \pm 117,80$  ppm (Tabela 19), tendo sido também o elemento menor predominante da birnessita tanto nas amostras de latossolo vermelho analisadas como no minério estudado por Figueira et al. (2016) (Tabela 21), que pode ser um indicativo que a concentração de Ba está relacionada a presença desse mineral no solo. Em contrapartida, baixas concentrações de Sr foram observadas tanto nas amostras da fazenda da área de estudo como nos resultados do autor supracitado (Tabelas 19 e 21), sendo provavelmente um elemento de menor relevância associado a esse mineral.

Tabela 21. Comparação das concentrações de elementos menores obtidas na análise química por FRX com os resultados de Figueira et al. (2016).

Composição Química	Unidade	Média ± Desvio Padrão das amostras	Figueira et al. (2016)
Ba	ppm	162,15±117,80	1201
Zn	ppm	57,68±25,54	848
Ni	ppm	50,22±37,58	676
Cu	ppm	65,40±44,82	575
Sr	ppm	12,52±14,69	122
Co	ppm	26,17±23,31	354

No cenário geral, tanto os resultados da análise química como a mineralógica mostraram a redução da concentração de CaO, Na<sub>2</sub>O, MgO e K<sub>2</sub>O e a alta concentração e elevada quantidade de minerais contendo SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, provavelmente devido a lixiviação de CaO, Na<sub>2</sub>O, MgO e K<sub>2</sub>O e de parte da sílica nos períodos chuvosos, quando a precipitação é maior que a ETP, por serem mais solúveis que os óxidos de SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Considerando que a época de excedente hídrico (Tabela 6 e Figura 19) da área de estudo ocorre entre os meses de outubro até o fim de março e no mês maio e que a coleta das amostras de solo foi no mês de Março de 2018, sendo também o último mês do período de entressafra de Janeiro a Março (ARCADIS TETRPLAN, 2011), a amostragem do solo da fazenda transcorreu no fim do período chuvoso quando grande parte dos cátions de base havia sido lixiviada e com concentrações residuais de sílica e de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio no perfil de solo.

Ademais, a dissociação total ou parcial das caulinitas e gibbsitas por hidrólise e a decomposição da MO do solo são favorecidas pelo excesso hídrico nos períodos chuvosos e consequentemente resultam na liberação de H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup>, com risco de aumentar os níveis de acidez e toxicidade do solo da área de estudo no período de excedente hídrico.

A lixiviação destes cátions também é facilitada pela granulometria arenosa do latossolo vermelho da área de estudo (como analisado nos resultados de análise granulométrica), com risco de contaminação de lençóis freáticos principalmente se houver excessiva concentração destes macronutrientes no solo decorrente super dosagem de vinhaça e de outros fertilizantes.

Além da variação climática e da granulometria, esses processos também podem ser influenciados pelas unidades geológicas e geomorfológicas presentes na área da fazenda. O principal relevo presente na área de estudo de Morros Arredondados (Anexo C) provavelmente favorece a formação pedogenética de um solo eluvial da alteração das rochas sedimentares da Formação Corumbataí, como também pelos relevos das áreas de circunvizinhança de Morros Amplos e Encostas com Cânions Locais a leste e a oeste da área de estudo com unidades das Formações Corumbataí, Piramboia e das intrusões básicas da Formação Serra Geral.

As amplitudes destes relevos são de 100 a 300 m e com declividades de até 15% (ARCADIS TETRPLAN, 2011), indicando relevos planos com declives moderados a fortes que propiciam a formação de perfis de solos profundos com alta concentração de horizontes enriquecidos com  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , resultando na formação de caulinita, gibbsita e hematita no perfil de solo, associado a alta lixiviação de  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  para os lençóis freáticos.

Por outro lado, as Encostas com Cânions locais situadas a oeste e a sul da área de estudo (Anexo C) apresentam um relevo de amplitude mais alta (maior que 100 m) e de alta declividade (de 15 a 30%) com rochas da Formação Corumbataí e de intrusões básicas, que possivelmente pode ter proporcionado o transporte de parte do solo desta região na área de estudo na forma de colúvio, podendo ser a possível origem da presença dos minerais de quartzo, hematita, anátasio e birnessita nas amostras de solo coletadas.

Observando as datas de recebimentos das amostragens de solo em que foram analisados os parâmetros físico-químicos dos solos dos PAVs (Tabela 12), todas as análises foram feitas no mês de Março, ainda no período de entressafra e de excedente hídrico. Em alguns anos, como no caso dos resultados do ano de 2014, observaram-se parâmetros de baixa fertilidade e altas concentrações de H+Al (Figuras 33 e 43) como reflexo das condições do solo no final da época de chuvas, posteriormente à lixiviação da maioria dos cátions de base ao mesmo tempo em que houve o aumento de  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  por hidrólise.

Contudo, houve também casos em que a concentração de cátions de base foram maiores que as concentrações de H+Al em alguns anos. Um exemplo observado foi a análise temporal da gleba 15, onde a concentração H+Al reduziu de 2015 a 2016, enquanto que os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e de  $\text{K}^+$  se elevaram no mesmo período (Tabela 12 e Figuras 44 e 36). Este caso pode ser tanto reflexo da disposição de vinhaça em 2015 nos parâmetros de solo analisados em 2016, pois a alta dosagem de vinhaça calculada em 2015 pode ter oferecido uma grande quantidade de cátions de base que não foram totalmente lixiviados no período de excedente hídrico, ou

pode ter ocorrido o uso de outros fertilizantes e outros métodos de manejo de solo que proporcionaram o fornecimento dos cátions de base na época chuvosa, a exemplo da calagem.

Em relação à fertirrigação com vinhaça, esta normalmente ocorre no período de seca ou de deficiência hídrica de abril a setembro (Figura 19) no período da safra da lavoura de cana-de-açúcar de Abril a Dezembro (ARCADIS TETRPLAN, 2011). Ao ser aplicada neste período, a dosagem de vinhaça confere umidade no período seco e repõe os cátions de base que foram lixiviados no período chuvoso, melhorando os parâmetros de fertilidade do solo. Dependendo do cálculo de dosagens obtidas através dos parâmetros físico-químicos do solo para determinada, a fertilidade do solo pode melhorar no ano seguinte a aplicação do efluente nas lavouras de cana-de-açúcar, como foi observado nas análises dos resultados deste trabalho.

Contudo, além do efeito da aplicação de vinhaça, outros fatores devem ser considerados ao avaliar o cálculo da dosagem do volume do efluente que será aplicado para evitar riscos de super dosagem e consequentes riscos de acidez, toxicidade por alumínio e contaminação de águas contaminadas, sendo estes as variações climáticas, o tipo de manejo e o uso de outros tipos de fertilizantes que não exclusivamente o da vinhaça, os aspectos físicos definidos pela geomorfologia e geologia da área estudada e as possíveis reações e alterações dos minerais presentes no perfil de solo.

## 7. CONCLUSÕES

A análise dos resultados evidenciou o papel dos argilominerais nas mudanças de fertilidade do solo e no planejamento da aplicação de vinhaça por meio da fertirrigação, porém não foi o único fator que influenciou nos parâmetros físico-químicos do solo e no cálculo da dosagem de vinhaça.

Os resultados mostraram que a quantidade de MO do solo (em que parte dela foi fornecida pela fertirrigação com vinhaça) e a presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio também são parte da fração coloidal capaz de adsorver cátions, contribuindo tanto para o aumento da CTC total do solo como na adsorção de cátions de base de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^{+}$  para serem usados como macronutrientes para as lavouras de cana-de-açúcar.

A análise dos resultados também indicou o aumento de H+Al em alguns anos analisados da fazenda estudada, podendo ser ocorrente tanto as mudanças nos parâmetros do solo geradas pela aplicação de vinhaça nos anos anteriores como das alterações mineralógicas do solo e processos de lixiviação dos cátions de base ocorrentes em períodos chuvosos e quentes.

A granulometria arenosa do latossolo vermelho presente na área de estudo é outro fator que facilita a lixiviação dos cátions e a percolação de vinhaça do solo, além da forma de relevo de Morros Amplos que propicia a formação de um perfil de solo profundo com horizontes com a formação de grandes quantidades de argilominerais do grupo da caulinita, gibbsita, hematita e quartzo.

Como o cálculo da dosagem de vinhaça a ser aplicada no período de déficit hídrico depende das propriedades do solo, este cálculo precisa considerar os efeitos da aplicação da vinhaça nos anos anteriores, além dos aspectos mineralógicos, geológicos, geomorfológicos, variações climáticas e tipos de manejo utilizados, para que a fertilidade do solo possa proporcionar a melhora na produtividade da cultura de cana-de-açúcar e para evitar riscos de super dosagem do efluente e os consequentes riscos de aumento de acidez, aumento de toxicidade por alumínio e a contaminação de águas subterrâneas.

Em aspectos gerais, a fertirrigação com vinhaça feita pela usina sucroalcooleira foi bem realizada considerando todos os aspectos mencionados, com bons índices de fertilidade observados na fazenda da área de estudo e sem riscos de contaminação no período estudado de 2012 a 2017.

Por outro lado, foram observadas algumas questões que futuramente poderiam ser discutidas, tal qual o uso da CTC total ao invés da CTC efetiva no cálculo da dosagem de vinhaça definida pela Norma Técnica P4.231 da CETESB (2015), onde pode aparecer altos cálculos de dosagem de vinhaça como resposta a altas concentrações de íons  $H^+$  e  $Al^{3+}$  em solos de elevada acidez e toxicidade de m% e de baixa fertilidade e, portanto, requer atenção nos planos de fertirrigação das lavouras de cana-de-açúcar a fim de aprimorar a capacidade de produção de etanol. Outro trabalho futuro possível seria a amostragem de solos na Gleba 15 para a avaliação mineralógica, uma vez que está gleba tem dados temporais das dosagens de vinhaça e avaliação dos parâmetros de fertilidade do solo nos anos de 2013, 2015 e 2016, porém não foi amostrada neste estudo por falta de planejamento prévio.

## **8. BIBLIOGRAFIA**

AMARAL, V.P.; SOUZA FILHO, P.B.; MORAES, J.R.S.C.; COSTA, J.F.; SANTIAGO, A.V. (2014). Balanço Hídrico e Classificação Climatológica para o Município de Belterra – PA. In: III Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia. *Anais...* Belém: Centro de Ciências Naturais e Tecnologia da Universidade do Estado do Pará.

Disponível em:< <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1006642/1/p342.pdf> >. [acesso em 15/01/2019].

ARCADIS TETRAPLAN (2011). *Estudo de Impacto Ambiental- EIA: Ampliação das Áreas de Plantio de cana-de-açúcar e da Produção de açúcar, álcool e energia elétrica*. São Paulo, p. 483.

BRAGA, G.N.M. (2013). *Cálculo e Interpretação das Saturações por bases e alumínio na fertilidade do solo*. Disponível em: <<https://agronomiacomgismonti.blogspot.com/2013/06/calculo-e-interpretacao-das-saturacoes.html>>. [acesso em 22/08/2018].

BARROS, R.P.; VIÉGAS, P.R.A.; SILVA, T.L.; SOUZA, R.M.; BARBOSA, L.; VIÉGAS, R.A.; BARRETTO, M.C.V.; MELO, A.S., (2010). Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v.40, n.30, 341- 346 p.

BRASIL. Legislação Informatizada – Decreto nº 76.593, de 14 de Novembro de 1975. Institui o Programa Nacional do Alcool e dá outras Providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 14/11/1975, p. 15257.

BRASIL. CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n.420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.

BRASIL. CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n.430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n.357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA.

BRIGATTI, M. F.; GALAN, E.; THENG, B. K. G. (2006). *Structures and mineralogy of clay minerals*. *Developments in clay science*, 1, 19-86.

BRITO, A.P.F. (2013). *Avaliação da disposição de biossólido oriundo da ETE Araraquara (SP) em argilossolo Vermelho*. Dissertação de Mestrado em Geociências e Meio Ambiente. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, pág. 95.

CANELLAS, L.P.; VELLOSO, A.C.X.; MARCIANO, C.R.; RAMALHO, J.F.G.P.; RUMJANEK, V.M.; REZENDE, C.E.; SANTOS, G.A. (2003). Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhiço e adição de vinhaça por longo tempo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n.5, p.935-2003.

CASARINI, D.C.P; MURGEL BRANCO, S. (1989). *Efeito da Fertirrigação com Vinhaça nas propriedades químicas e microbiológicas do solo em um sistema de disposição de efluente industrial*. Tese de Doutorado em Hidráulica e Saneamento – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (2015). *Norma P4.231: Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola*. 3ª Edição, 2ª Versão - São Paulo.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MOGI GUAÇU – CBH-MOGI; CENTRO REGIONAL UNIVERSITÁRIO DO ESPÍRITO SANTO DO PINHAL-CREUPI; SECRETÁRIA DO MEIO AMBIENTE- SMA; COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB (1999). *Diagnóstico da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu: “Relatório Zero”*. Disponível em:<  
<http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7106/relmogiseg.pdf>>. [acesso em 19/05/2018].

DANA, E.S.; HURLBUT, C.S.(1960). *Manual de Mineralogia*. Editora Reverté, S.A. , New York, USA, 2ª Edição, 600p.

DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J.; MACEDO, C.R. (1981). *Minerais Constituintes de rochas: uma introdução*. 2a. Edição, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2000. 727 p.

FERNANDES, L.A. (1998). *Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil)*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, **30** (4): 717-728.

FIGUEIRA, B.A.M; ANGÉLICA, R.S.; COSTA, M.L.; MERCURY, J.M.R.; SANTOS, M.R.P.; POELLMANN, H. (2016). Caracterização química e mineralógica de birnessita natural da Mina do Azul (Província Mineral de Carajás, Brasil) e seu análogo sintético obtido pelo método sol-gel. *Cerâmica*, v. 62, n.362, p.128-132.

FUESS, L.T. (2013). *Potencial Contaminante e energético da Vinhaça: Riscos de contaminação ao solo e recursos hídricos e recuperação de energia a partir da digestão anaeróbica*. Dissertação de Mestrado em Geociências e Meio Ambiente. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, p. 161.

GATIBONI, L.C. (2017). *Propriedades Químicas do Solo*. Disponível em: <<http://www.agronomiaufs.com.br/index.php/material-de-aula/category/55-210404-fisica-do-solo?download=253%3Afertilidade-do-solo-quimica-do-solo-classificacao-do-solo-material-enviado-pelo-prof.>>. [acesso em 21/02/2017].

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018). *Santa Cruz das Palmeiras*. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/santa-cruz-das-palmeiras/panorama>>. [acesso em 19/05/2018].

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2008). *Divisão Territorial Brasileira*. Disponível em:< [https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default\\_dtb\\_int.shtm](https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_dtb_int.shtm)>. [acesso em 19/05/2018].

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1983). *Folha SF.23-V-C-V-3 – Pirassununga (escala 1:50000)*. 2ªEd. Pirassununga.

IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas. (1981). *Mapa Geomorfológico do estado de São Paulo 1.000.000*. Divisão de Minas e Geologia Aplicada. Vol. I e II.

LAESPIGA, M.A.M. (2008). *Transporte de solutos em barreiras de material argiloso compactado (CCL) e geocomposto bentonítico (GCL): fluxos diretos, acoplados e comportamento membrana*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 227.

LAMONATO, D. (2014). *Pró-Álcool: de sua criação aos dias atuais*. Disponível em:< <https://danilotlamonato.jusbrasil.com.br/artigos/120002732/pro-alcool-de-sua-criacao-aos-dias-atuais>>. [acesso em 31/08/2017].

LOPES, A.S. (1984). *Solos sob cerrado: Características, propriedades e manejo*. 2.ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa de Potassa e do Fosfato (POTAFOS), 162 p.

MASSOLI, M. (1983). Geologia da Folha de Piraçununga, SP. *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo, v. 4(1/2), nº 25-51.

MILANI, E.J. (1997). *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental*. 2v. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MILANI, E.J.; GONÇALVES DE MELO, J.H.; ALVES DE SOUZA, P.; FERNANDES, L.A.; FRANÇA, A.B. (2007). Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p.265-287.

MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B.; SCHNEIDER, R.L. (1994). Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, Rio de Janeiro, v.8, n.1, p. 69-82.

MINERALOGIA E QUÍMICA DO SOLO (2014). *Composição da Fase Sólida Mineral do Solo*. Disponível em:< <http://mineralogiaequimicadosolo.blogspot.com/2014/04/composicao-da-fase-solida-mineral-do.html> >. [acesso em 06/02/2019].

MORTATTI, B.C. (2010). *Caracterização físico-química dos solos e comportamento dos contaminantes da Vinhaça por processo de difusão*. Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas.

NASCIMENTO, C.W.A.; BARROS, D.A.S.; MELO, E.E.C.; OLIVEIRA, A.B. (2004). Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 28, n.2, p. 385-392.

NETO, A.E. (2016). *Estado da Arte da Vinhaça*. Piracicaba: União da Indústria de Cana-de-açúcar. Disponível em:< <http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=35414851> >. [acesso em 03/12/2018].

NOBILE, F.O.; MARQUES JÚNIOR, J. (2008) *Geologia e Mineralogia*. Fundação Educacional de Barretos (Desenvolvimento de material didático ou instrucional – Apostila).

OLIVEIRA, B.G. (2015). *Emissão de metano e microbiota funcional associadas a Vinhaça de cana-de-açúcar em sistemas de armazenamento e transporte*. Tese de Doutorado em Ciências. Universidade de São Paulo, Piracicaba, p.99.

PEREIRA, A.C.A. (2015) *Efeitos da Disposição de Lodo de ETE de Indústria Alimentícia no solo: Estudo de caso*. Dissertação de Mestrado em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, págs. 75.

PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA (2017). Pirassununga: CETESB de Mogi Guaçu.

PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA (2016). Pirassununga: CETESB de Mogi Guaçu.

PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA (2015). Pirassununga: CETESB de Mogi Guaçu.

PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA (2014). Pirassununga: CETESB de Mogi Guaçu.

PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA (2013). Pirassununga: CETESB de Mogi Guaçu.

PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA (2012). Pirassununga: CETESB de Mogi Guaçu.

PORTAL BRASIL (2016). *Etanol atingiu produção recorde de 30 bilhões de litros em 2015*. Disponível em:< <http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2016/05/etanol-atingiu-producao-recorde-de-30-bilhoes-de-litros-em-2015>>.[acesso em 31/08/2017].

QUEIROZ, A.; KUROSAWA, R.; BARRETO, R. (2017). *Difração de Raios-X*. 2ª ed. São Carlos: Universidade de São Paulo.

RIBEIRO, A. C.; NOVAIS, R.F.; FILHO, A.F.C.B. (1983). Efeitos da Vinhaça sobre a Dispersão de Argila de Amostras de Latossolos. *Revista Ceres*, vol. 30, nº 167, páginas 12-18.

RIBEIRO, B.T.; LIMA, J.M.; CURI, N.; OLIVEIRA, G.C.; LIMA, P.L.T. (2011). Cargas Superficiais da Fração Argila de Solos influenciadas pela Vinhaça e Fósforo. *Quim. Nova*, vol. 34, nº1, páginas 5-10

RONQUIM, C.C. (2010). Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Embrapa Monitoramento por Satélite. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. Disponível em:< <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/31004/1/BPD-8.pdf>>. [acesso em 27/05/2018].

SANTA CRUZ DAS PALMEIRAS. Prefeitura Municipal. (2018). *Informações: A Cidade*. Disponível em:< <http://www.santacruzdaspalmeiras.sp.gov.br/>>. [acesso em 19/05/2018].

SANTOS, A.R. (2002). Capítulo 10: Balanço Hídrico segundo Thornthwaite e Mather, 1955. In:\_\_\_\_\_. (Org.) *Apostila de Climatologia*. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Centro de Ciências Humanas e Naturais (CCHN) e Departamento de Geografia. Disponível em:< <http://www.mundogeomatica.com.br/CL/ApostilaTeoricaCL/Capitulo10-BalancoHidrico.pdf>>. [acesso em 15/01/2019].

SCHALCH, V.; LEITE, W. C.de A.; CASTRO, M. C. A. A.; MONTAÑO, M.; PUGLIESI, E.; MATOS, T. F. L. (2009). *Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) - Aterro Sanitário para Disposição Final de resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos/SP*. Disponível em: < <http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/meio-ambiente/155943-estudo-de-impacto-ambiental-relatorio-de-impacto-ambiental-do-novo-aterro-sanitario.html>>. [acesso em: 16/03/2016].

SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN,H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F.; NOGUEIRA,A.A. (1974). Revisão stratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, *Anais...*Porto Alegre: SBG. v. 1.

SCAPIN, M.A. (2003). *Aplicação da difração e fluorescência de raios- X (WDXRF): ensaios de argilominerais*. Tese (Doutorado em Ciência na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais). Universidade de São Paulo.

SIGEP (COMISSÃO BRASILEIRA DE SÍTIOS GEOLÓGICOS E PALEOBIOLOGICOS) – CPRM. (2019). *Glossário Geológico Ilustrado – Halloysita*. Disponível em:< <http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/halloysita.htm>>. [acesso em 06/02/2019].

SILVA, F.P.; ANTONINI, S.A. (1995). Captação de água subterrânea em formações cenozoicas da Depressão Periférica: A Experiência de Porto Ferreira – SP. *Águas Subterrâneas*.

SILVA, F.P.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M.R. (2005) Estratigrafia de subsuperfície do Grupo Bauru (K) no estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, v.35, n.1, p.77-88.

SILVA, M.A.S.; GRIEBELER, N.P.; BORGES, L.C. (2007). Uso de vinhaça e impactos na propriedades do solo e lençol freático. *ReVista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, v.11, n.1, p 108-114.

SIMABUCO, S.M.; NASCIMENTO FILHO, V.F. (1994). Study on vinasse dynamics in soil using energy dispersive X-ray fluorescence with radioisotopic excitation. *Scientia Agrícola*, v. 51, n. 2, p. 207-215.

SIQUEIRA, L. F. S. (2011). *Tectônica Deformadora em Sinéclises Intracratônicas: a Origem do Alto Estrutural de Pitanga, Bacia do Paraná, SP*. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SSRH-CSAN – Secretaria de Estado de Saneamento e Recursos Hídricos (2014). *Elaboração de planos integrados regionais de saneamento básico e atividades de apoio técnico à elaboração de planos integrados municipais de saneamento básico para a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Mogi Guaçu – UGRHI 9: Produto 6 (P6)- Proposta de Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico Município: Pirassununga*. Disponível em:< <http://www.saneamento.sp.gov.br/PMS/UGRHI%2009/Pirassununga.pdf>>. [acesso em 02/07/2018].

TUBELIZ, A.; NASCIMENTO, F.J.L. (1986). *Meteorologia descritiva: Fundamentos e aplicações brasileiras*. 1ª Edição. 4ª Reimpressão. São Paulo: Nobel.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA), (2017a). *Mapa de Produção*. Disponível em:< <http://www.unica.com.br/mapa-da-producao/>>. [acesso em 31/08/2017].

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA), (2017b). *Histórico de Produção de Produção e Moagem por Safra*. Disponível em:< <http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e->

moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4&acao=visualizar&idTabela=1884&safra=2016%2F2017&estado=SP>. [acesso em 31/08/2017].

UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA), (2017c). *Histórico de Produção de Produção e Moagem por Produto*. Disponível em:<  
[http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2&acao=visualizar&idTabela=1883&produto=etanol\\_total&safraIni=2011%2F2012&safraFim=2016%2F2017&estado=SP](http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2&acao=visualizar&idTabela=1883&produto=etanol_total&safraIni=2011%2F2012&safraFim=2016%2F2017&estado=SP)>. [acesso em 31/08/2017].

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2012) *Guidelines for water reuse*. EPA/600/R-12/618. Cincinnati, OH, USA: Office of Research and Development; National Risk Management Research Laboratory, USEPA, 2012, 606p

VIEIRA, L.S. (1988). *Manual da Ciência do solo- Com ênfase aos solos tropicais*. 2º Edição. São Paulo: Editora Agronômica Ceres LTDA., 464p.

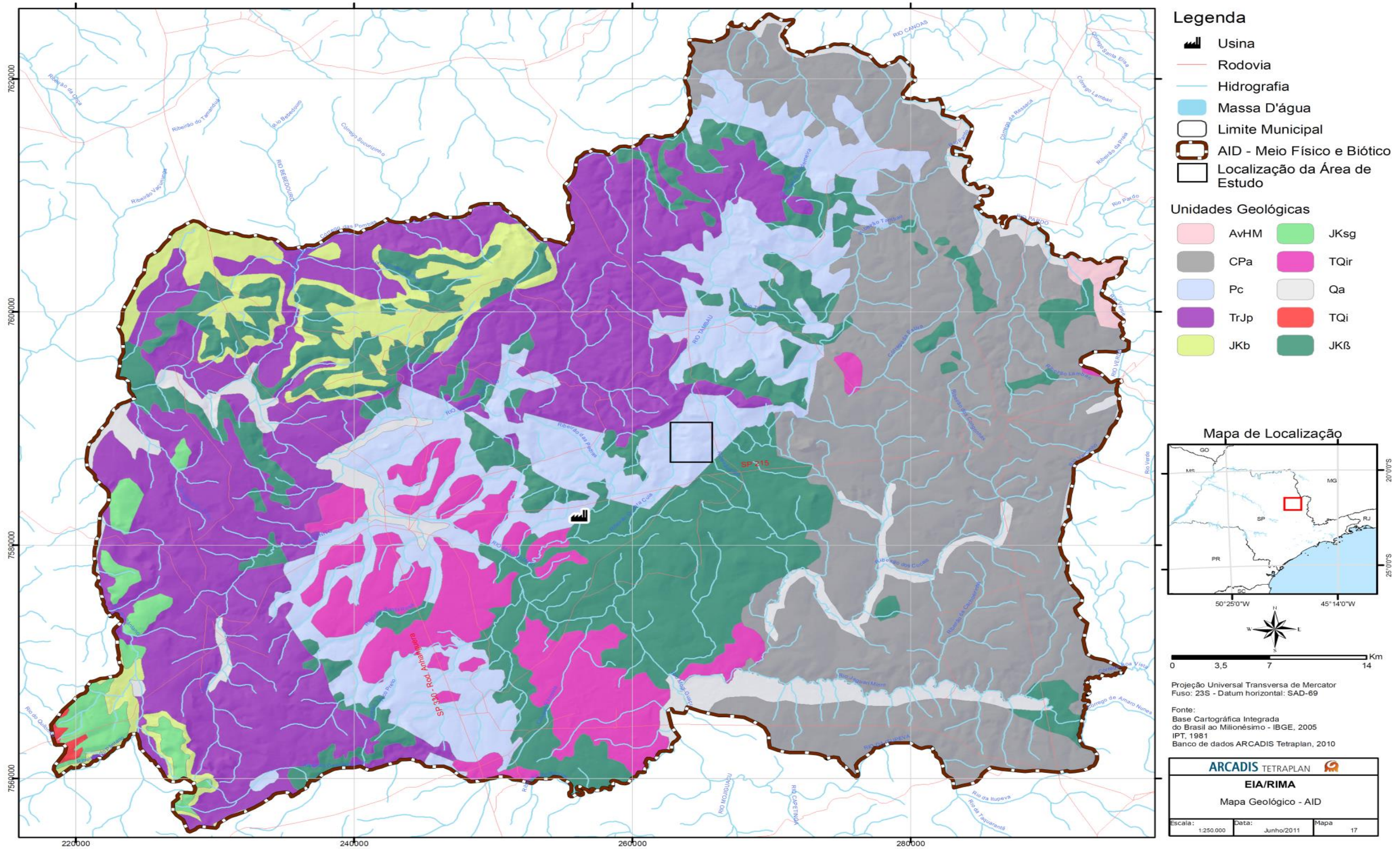
VIGLIO, L.M. (2014). *Crescimento inicial de cana-de-açúcar em latossolo com gradiente de saturação por alumínio e submetido à aplicação de vinhaça*. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) – Centro de Ciências Agrárias – Universidade Federal de São Carlos, Araras.

ZOLIN, C.A.; PAULINO, J.; BERTONHA, A.; FREITAS, P.S.L.; FOLEGATTI, M.V. (2011). Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. I. Características do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.15, n.1, p. 22-28.

Anexo A - Localização da Área de Influência Direta (AID) e da Área de Influência Indireta (AII) da Usina Sucroalcooleira e do município Santa Cruz das Palmeiras no Estado de São Paulo (Modificado de ARCADIS TETRAPLAN, 2011).



Anexo B - Mapa geológico da área de estudo, onde: AvHm – Complexo Varginha; Cpa – Formação Aquiduaana; Pc – Formação Corumbataí; TrJp – Formação Pirambóia; JKb – Formação Botucatu; JKsg – Formação Serra Geral; TQir – Formação Rio Claro/Pirassununga; Qa – Sedimentos aluvionares; TQi – Coberturas da Serra de Santana; JKβ – unidades intrusivas básicas (ARCADIS TETRPLAN, 2011). A área de estudo está marcada por um quadrado (□) próximo à rodovia SP-215.



Anexo C - Mapa geomorfológico da área de estudo, onde: 212 – Colinas Amplas; 213- Colinas Médias; 221 – Morrotes Amplos; 234 – Morrotes Alongados e Espigões; 111 – Planícies aluviais; 241- Morros arredondados; 511 – Encostas sulcadas por vales subparelos; 512 – Encostas com cânions locais; 521- Escarpas Festonadas; 311 – Mesas Basálticas; 321 – Mesas Sedimentares. (ARCADIS TETRAPLAN, 2011). A área de estudo está marcada por um quadrado (□) próximo à rodovia SP-215.

