



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

---



RUBENS FERNANDO SERAFIM

**AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO DE UMA  
FAZENDA NA REGIÃO DE PIRASSUNUNGA SP  
SUJEITO À APLICAÇÃO DE VINHAÇA**

*Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus 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

Rio Claro - SP

2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

RUBENS FERNANDO SERAFIM

AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO DE UMA  
FAZENDA NA REGIÃO DE PIRASSUNUNGA SP  
SUJEITO À APLICAÇÃO DE VINHAÇA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus 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

Rio Claro - SP

2020

S481a                    Serafim, Rubens Fernando  
                              Avaliação da fertilidade do solo de uma fazenda na região de  
                              Pirassununga SP sujeito à aplicação de vinhaça / Rubens Fernando  
                              Serafim. -- Rio Claro, 2020  
                              76 f. : il., tabs.

                              Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
                              Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro  
                              Orientador: Marcelo Loureiro Garcia

                              1. Fertilidade do solo. 2. Cana-de-açúcar pesquisa. 3. Solos análise.  
                              4. Vinhaça. 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.

RUBENS FERNANDO SERAFIM

AVALIAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO DE UMA  
FAZENDA NA REGIÃO DE PIRASSUNUNGA SP  
SUJEITO À APLICAÇÃO DE VINHAÇA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus 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

Dr. Marcelo Loureiro Garcia  
Dr. João Gabriel Thomaz Queluz  
Dra. Lauren Nozomi Marques Yabuki

Rio Claro, SP 17 de julho de 2020.

Conceito: aprovado

*“Não há nada na natureza mais importante ou que mereça mais atenção que o solo. Na verdade, é o solo que faz do mundo um ambiente mais agradável para a humanidade. É o solo que fornece provisão para toda a natureza; toda criação depende do solo que, afinal, é a base da nossa existência”  
(Friedrich Albert Fallou, 1862).*

*A vida e o solo*

*Brincar com a terra  
Colocá-la nas mãos  
Sentir a textura e soprar no ar  
Olhar para o solo e refletir  
Então, será que é fértil?  
É como nossa vida,  
Será que é fértil?  
Como avaliar os elementos que a compõe  
Ou que agregamos a ela?  
Depende da análise interior  
Assim como no solo  
Poder visualizar o que contém  
E completar com o que falta  
Ou retirar o que está demais  
Deixando brotar mais vida.*

*Rubens Fernando Serafim*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia pela sua compreensão em relação às limitações de tempo, decorrentes das atividades na Instituição de Ensino Técnico onde ministrou aulas, e com suas orientações sempre bem direcionadas para a concretização deste trabalho.

Também agradeço à autarquia Centro Paula Souza do Governo do Estado de São Paulo por ter efetuado o convênio com a UNESP que me permitiu participar do programa de mestrado desta renomada instituição pública de ensino superior.

Agradeço a Deus que sempre acompanha meus momentos e me ajuda a vencer os desafios.

Agradeço à pessoa mais importante da minha vida, minha esposa Marisete, que sempre me incentivou para concluir um programa de mestrado com êxito, apesar de saber que nosso tempo juntos seria ainda mais comprometido para o desenvolvimento deste projeto de vida.

Agradeço aos meus filhos Bárbara Lívia e Rodolfo também pelo incentivo constante e por acreditarem no papai.

Agradeço imensamente a Larissa Ruas Galdeano que me auxiliou neste trabalho, pois foi ela quem fez o trabalho em campo de coleta de dados dos solos e me forneceu muitas informações importantes. Também agradeço à Dra. Lauren e ao Dr. João Queluz pelos importantes apontamentos para o aprimoramento das discussões dos resultados me incentivando a continuar seguindo em frente buscando mais conhecimento.

## RESUMO

A fertirrigação com vinhaça nas lavouras de cana-de-açúcar é uma maneira de utilização desse resíduo industrial que é gerado em grande quantidade durante a produção do etanol e que disponibiliza nutrientes, principalmente o potássio. Na pesquisa foram avaliados os valores dos parâmetros químicos dos solos de cinco áreas (glebas 5, 9, 15, 22 e 23) de uma fazenda fertirrigada com vinhaça no período de 2012 a 2017 em relação à caracterização da fertilidade dos solos, à acidez e toxicidade por alumínio e aos valores dos parâmetros químicos das vinhaças aplicadas. Também foram analisadas as amostras de solo de três áreas (glebas 3, 23 e 26) em relação à composição química dos solos para a avaliação da caracterização ambiental. Foram encontrados resultados das saturações por bases dos solos das glebas avaliadas com uma variação média de 48 a 57% abaixo do valor de 60% utilizado para a cultura da cana-de-açúcar e para os valores das saturações por alumínio ficou evidenciada a tendência de crescimento ao longo dos anos, sinalizando a necessidade do planejamento adequado do manejo dos solos das áreas. Para os valores médios do pH foi encontrada uma faixa entre 5,00 a 5,57 abaixo do valor ideal para a cana-de-açúcar que é de 6,5 sinalizando também para a necessidade de eventuais aplicações de corretivos nas áreas. Em relação à vinhaça verificou-se que é uma fonte importante de potássio cujas concentrações médias nos solos nas glebas avaliadas variaram de 67 a 130 kg.ha<sup>-1</sup> abaixo do valor padrão para a cana-de-açúcar que é de 185 kg.ha<sup>-1</sup> evidenciando que as dosagens das vinhaças não provocaram excesso deste nutriente. Porém ficou evidenciada a preocupação com os outros elementos químicos existentes na vinhaça que devem ser monitorados, já que foram encontradas amostras de solos com concentrações elevadas de cobalto e cromo. Assim, o estudo conclui que o planejamento da fertirrigação e as análises de solo com avaliação dos valores dos parâmetros químicos são importantes, não somente, para cumprir a legislação ambiental, como também para auxiliar nas definições do manejo do solo visando ao aumento da fertilidade.

**Palavras-chave:** Fertilidade de solos, vinhaça, propriedades químicas e físicas do solo.

## ABSTRACT

Fertigation with vinasse in sugarcane crops is a way of using this industrial residue that is generated in large quantities during the production of ethanol and that provides nutrients, especially potassium. In the study, the values of the chemical parameters of the soils of five areas (tracts 5, 9, 15, 22 e 23) of a fertigated farm with vinasse in the period from 2012 to 2017 were evaluated in relation to the characterization of the fertility of the soils, the acidity and aluminum toxicity and the values of the chemical parameters of the applied vinasse. Soil samples from three areas (tracts 3, 23 and 26) of the study area were also analyzed in relation to the environmental characterization of the soil. Results of saturation by bases of the soils of five evaluated tracts were found with an average variation of 48 to 57% below the value of 60% used for the cultivation of sugar cane and for the values of saturation by aluminum the growth trend was evidenced along years, signaling the need for adequate planning of the management of the areas. For the average pH values, a range was raised between 5.00 to 5.57 below the ideal value for sugarcane, which is 6.5, also signaling the need for possible applications of corrective products in the areas. Regarding vinasse, it was found to be an important source of potassium whose average concentrations in the soils in the evaluated plots ranged from 67 to 130 kg.ha<sup>-1</sup> below the standard value for sugarcane, which is 185 kg.ha<sup>-1</sup>, showing that the vinasse dosages did not cause an excess of this nutrient. However, the concern with the other chemical elements in the vinasse that must be monitored was evidenced, since samples of soils with high concentrations of cobalt and chromium were found. Thus, the study concludes that fertigation planning and soil analysis with evaluation of chemical parameter values are important, not only to comply with environmental legislation, but also to assist in the definition of soil management aimed at increasing fertility.

**Keywords:** Soil fertility, vinasse, chemical and physical properties of soil.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

	Página
<b>Figura 1:</b> Relação entre disponibilidade de nutrientes e pH do solo.....	22
<b>Figura 2:</b> Etapas do desenvolvimento do trabalho de pesquisa.....	27
<b>Figura 3:</b> Localização do município de Pirassununga SP .....	28
<b>Figura 4:</b> Localização da área de estudo (Fazenda) .....	28
<b>Figura 5:</b> Fazenda e suas subdivisões em glebas.....	29
<b>Figura 6:</b> Valores do pH das vinhaças.....	37
<b>Figura 7:</b> Valores das concentrações de $K^+$ das vinhaças.....	38
<b>Figura 8:</b> Valores das concentrações de $Ca^{2+}$ das vinhaças.....	38
<b>Figura 9:</b> Valores das concentrações de $Mg^{2+}$ das vinhaças.....	39
<b>Figura 10:</b> Valores da relação DQO/DBO das vinhaças .....	39
<b>Figura 11:</b> Valores das concentrações de $SO_4^{2-}$ das vinhaças .....	41
<b>Figura 12:</b> Valores das concentrações de $Na^+$ das vinhaças.....	41
<b>Figura 13:</b> Valores da dureza total das vinhaças .....	43
<b>Figura 14:</b> Dosagens das vinhaças na gleba 5 .....	44
<b>Figura 15:</b> Concentração de potássio no solo da gleba 5 .....	45
<b>Figura 16:</b> Capacidade de Troca Catiônica do solo da gleba 5 .....	45
<b>Figura 17:</b> Saturação por bases no solo da gleba 5 .....	45
<b>Figura 18:</b> Saturação por alumínio no solo da gleba 5 .....	46
<b>Figura 19:</b> pH do solo da gleba 5 .....	46
<b>Figura 20:</b> Dosagens das vinhaças na gleba 23 .....	47
<b>Figura 21:</b> Concentração de potássio no solo da gleba 23 .....	48
<b>Figura 22:</b> Capacidade de Troca Catiônica do solo da gleba 23 .....	48
<b>Figura 23:</b> Saturação por bases no solo da gleba 23 .....	48
<b>Figura 24:</b> Saturação por alumínio no solo da gleba 23.....	49
<b>Figura 25:</b> pH do solo da gleba 23 .....	49
<b>Figura 26:</b> Dosagens das vinhaças na gleba 15.....	50
<b>Figura 27:</b> Concentração de potássio no solo da gleba 15 .....	51
<b>Figura 28:</b> Capacidade de Troca Catiônica do solo da gleba 15 .....	51
<b>Figura 29:</b> Saturação por bases no solo da gleba 15 .....	51
<b>Figura 30:</b> Saturação por alumínio no solo da gleba 15.....	52
<b>Figura 31:</b> pH do solo da gleba 15 .....	52
<b>Figura 32:</b> Dosagens das vinhaças na gleba 22 .....	53

<b>Figura 33:</b> Concentração de potássio no solo da gleba 22 .....	53
<b>Figura 34:</b> Capacidade de Troca Catiônica do solo da gleba 22 .....	54
<b>Figura 35:</b> Saturação por bases no solo da gleba 22 .....	54
<b>Figura 36:</b> Saturação por alumínio no solo da gleba 22 .....	54
<b>Figura 37:</b> pH do solo da gleba 22 .....	55
<b>Figura 38:</b> Dosagens das vinhaças na gleba 9 .....	56
<b>Figura 39:</b> Concentração de potássio no solo da gleba 9 .....	56
<b>Figura 40:</b> Capacidade de Troca Catiônica do solo da gleba 9 .....	56
<b>Figura 41:</b> Saturação por bases no solo da gleba 9 .....	57
<b>Figura 42:</b> Saturação por alumínio no solo da gleba 9 .....	57
<b>Figura 43:</b> pH do solo da gleba 9 .....	57
<b>Figura 44:</b> Glebas fertirrigadas com vinhaça na área de estudo (período: 2012 a 2017) .....	58
<b>Figura 45:</b> Valores da RAP e V% para a gleba 5 .....	61
<b>Figura 46:</b> Valores da RAP e V% para a gleba 23 .....	62
<b>Figura 47:</b> Valores da RAP e V% para a gleba 15 .....	63
<b>Figura 48:</b> Valores da RAP e V% para a gleba 22 .....	64
<b>Figura 49:</b> Valores da RAP e V% para a gleba 9 .....	65
<b>Figura 50:</b> Comparação das dosagens médias e V% nas glebas .....	66

## LISTA DE TABELAS

	Página
<b>Tabela 1:</b> Composição química de vinhaças conforme o tipo de mosto .....	18
<b>Tabela 2:</b> Parâmetros físico-químicos resumidos para a vinhaça.....	18
<b>Tabela 3:</b> Valores referenciais do PRNT de alguns corretivos.....	24
<b>Tabela 4:</b> Características dos argilominerais.....	25
<b>Tabela 5:</b> Parâmetros químicos conforme portaria P4.231 .....	30
<b>Tabela 6:</b> Análises das vinhaças .....	32
<b>Tabela 7:</b> Análises químicas das amostras de solo das glebas .....	33
<b>Tabela 8:</b> Análises de solo das glebas 3, 23 e 26 .....	34
<b>Tabela 9:</b> Dosagens das vinhaças .....	35
<b>Tabela 10:</b> Dados das análises das amostras de solo coletadas no campo – elementos traços	36
<b>Tabela 11:</b> Dados das análises das amostras de solo coletadas no campo – espécies .....	36
<b>Tabela 12:</b> Relação DQO/DBO para águas residuárias e perspectiva de aplicação.....	40
<b>Tabela 13:</b> Relação de adsorção de sódio calculada para os resultados de vinhaça de 2012 a 2017 .....	42
<b>Tabela 14:</b> Classificação para a dureza total da água bruta.....	43
<b>Tabela 15:</b> Resumo dos dados para a gleba 5.....	44
<b>Tabela 16:</b> Resumo dos dados para a gleba 23.....	47
<b>Tabela 17:</b> Resumo dos dados para a gleba 15.....	50
<b>Tabela 18:</b> Resumo dos dados para a gleba 22.....	53
<b>Tabela 19:</b> Resumo dos dados para a gleba 9.....	55
<b>Tabela 20:</b> Resumo de dados para a fazenda SJ.....	59
<b>Tabela 21:</b> Resumo de dados da fazenda da área de estudo .....	59
<b>Tabela 22:</b> Dados da gleba 5 para cálculo da RAP .....	60
<b>Tabela 23:</b> Dados da gleba 23 para cálculo da RAP .....	61
<b>Tabela 24:</b> Dados da gleba 15 para cálculo da RAP .....	62
<b>Tabela 25:</b> Dados da gleba 22 para cálculo da RAP .....	63
<b>Tabela 26:</b> Dados da gleba 9 para cálculo da RAP .....	64
<b>Tabela 27:</b> Resumo geral dos dados das glebas 5, 9, 15, 22 e 23.....	65
<b>Tabela 28:</b> Dados das análises das amostras de solo coletadas no campo – elementos traços	67
<b>Tabela 29:</b> Faixas de concentrações adequadas de nutrientes no solo para a cana-de-açúcar	68
<b>Tabela 30:</b> Relação Sílica-Alumina das amostras P1, P2 e P3.....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**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

**Ba**: Bário

**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

**Co**: Cobalto

**CONAMA**: Conselho Nacional do Meio Ambiente

**Cr**: Crômio

**CTC**: Capacidade de troca Catiônica

**Cu**: Cobre

**DBO<sub>5,20</sub>**: Demanda Bioquímica de Oxigênio em um período de tempo de 5 dias na temperatura de incubação de 20°C

**DQO**: Demanda Química de Oxigênio

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

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

**FRX**: Fluorescência de Raios-X

**Ga**: Gálio

**H<sup>+</sup>**: íon hidrogênio

**H + Al**: Hidrogênio e alumínio

**K<sup>+</sup>**: Potássio

**K<sub>2</sub>O**: Óxido de potássio

**K<sub>i</sub>**: relação Sílica-Alumina

**ks**: Concentração de potássio no solo

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

**La**: Lantânio

**LOI (loss on ignition):** é a perda por calor do analito durante a determinação analítica dos elementos que o compõem.

**m%:** Saturação por alumínio

**Mg<sup>2+</sup>:** Magnésio

**MgO:** Óxido de magnésio

**Mn:** Manganês

**MnO:** Óxido de manganês

**MO:** Matéria Orgânica

**N:** Nitrogênio

**Na<sup>+</sup>:** 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:** Fósforo

**PAV:** Planos de Aplicação de Vinhaça

**PEAD:** Polietileno de alta densidade

**RAP:** Razão de adsorção de sódio

**RAS:** Razão de adsorção de sódio

**Rb:** Rubídio

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

**SB:** Soma de Bases

**SiO<sub>2</sub>:** Sílica

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

**Sr:** Estrôncio

**SVOC:** Semi-volatile Organic Compound (Composto Orgânico Semivolátil)

**T:** folha tetraédrica

**Ti:** Titânio

**TiO<sub>2</sub>:** Óxido de titânio

**V:** Vanádio

**V%:** Saturação por bases

**VOC:** Volatile Organic Compound (Composto Orgânico Volátil)

**Y:** Ítrio

**Zn:** Zinco

**Zr:** Zircônio

## SUMÁRIO

	Página
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2. OBJETIVO .....</b>	<b>17</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Caracterização da vinhaça da cana-de-açúcar.....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Portaria CETESB para aplicação da vinhaça no solo .....</b>	<b>19</b>
<b>3.3 Caracterização da fertilidade do solo.....</b>	<b>21</b>
<b>3.4 Tipo de solo e caracterização ambiental do solo .....</b>	<b>25</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 Área de estudo.....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Parâmetros de qualidade ambiental e análises.....</b>	<b>30</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>5.1 Avaliações dos parâmetros químicos das vinhaças da usina .....</b>	<b>37</b>
<b>5.2 Avaliações dos parâmetros químicos para a caracterização da fertilidade dos solos.....</b>	<b>44</b>
<b>5.3 Avaliações dos parâmetros químicos para a caracterização ambiental dos solos .....</b>	<b>66</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>72</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A produção brasileira de cana-de-açúcar tem aumentado constantemente devido às melhorias nas variedades da planta, do manejo da cultura e do sistema de colheita. A safra 2018/2019 foi de 620 milhões de toneladas, com uma produção de 29 milhões de toneladas de açúcar e de 33 bilhões de litros de etanol. Também foram gerados bagaços da ordem de 136 milhões de toneladas, 22 milhões de toneladas de torta de filtro, 105 milhões de toneladas de palha, 6 milhões de toneladas de cinzas e 420 bilhões de litros de vinhaça (ROSSETTO, 2018). Para a safra de 2019/2020 há uma previsão de decréscimo de 6,4% na produção de etanol e um acréscimo de 9,5% na produção de açúcar (CONAB, 2019).

Nota-se que a vinhaça é uma água residual gerada em grande quantidade e não pode ser lançada em corpos hídricos já que para isto teria que atender aos padrões de lançamento conforme as legislações estaduais e federais implicando altos custos envolvidos em tratamento (BRASIL, 2014). Assim, vem sendo aplicada na lavoura através da técnica denominada fertirrigação.

As expressivas concentrações de potássio, cálcio e magnésio que a vinhaça possui e sua adequada aplicação no solo pode aumentar a disponibilidade destes elementos químicos, principalmente o potássio, aumentar o pH e a matéria orgânica que pode auxiliar no aumento do estado de agregação do solo, da capacidade de retenção de água, da condutividade hidráulica, com o aumento da atividade microbiana, podendo colaborar para o aumento da produtividade agrícola (FUESS, 2013). A fertirrigação através da vinhaça, já que disponibiliza diversos elementos químicos, altera os parâmetros químicos do solo, sendo importante a avaliação destes parâmetros durante os períodos de aplicação.

Já a aplicação não controlada pode levar ao risco de contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais pela presença da amônia e de metais tóxicos, ou causar alterações no oxigênio dissolvido em corpos hídricos, ou provocar a salinização e aumento da acidez do solo e o excesso de cátions pode ocasionar um efeito de dispersão ou floculação nos coloides do solo, ou compactação implicando impactos negativos na estrutura, na fertilidade ou no ambiente (FUESS, 2013; PEREIRA, 2004).

A aplicação adequada deve, portanto, seguir as normas e legislações vigentes que contêm os critérios e os procedimentos para esta prática. As análises dos parâmetros do solo são muito importantes, o que se evidencia inclusive em outros estudos de avaliação do parâmetro condutividade elétrica, que vem se configurando como uma grande ferramenta à agricultura de precisão como uma aliada na avaliação da variabilidade espacial e na definição das unidades de



gerenciamento de uma área (MOLIN & RABELLO, 2011).

## **2. OBJETIVO**

O presente estudo teve como objetivo analisar as propriedades químicas do solo sob aplicação da vinhaça e observar possíveis influências na fertilidade para a produção de cana-de-açúcar em uma fazenda do município de Pirassununga no interior do Estado de São Paulo. O trabalho analisou a evolução temporal de determinadas glebas da fazenda em relação às alterações químicas do solo e avaliou uma possível correlação entre o manejo do efluente e a fertilidade do solo agrícola.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 Caracterização da vinhaça da cana-de-açúcar**

A expressiva produção de etanol nas destilarias gera uma grande quantidade de vinhaça em diferentes processos cujo descarte necessita ser adequado. Na norma brasileira NBR 10.004 a vinhaça é classificada como resíduo sólido classe II-A, não perigoso e não inerte pois não tem tratamento convencional que possibilita o seu lançamento em corpos hídricos (BRASIL, 2014).

Apesar de um contínuo avanço nas tecnologias que diminuem a geração da vinhaça, ainda assim, a geração é e continuará sendo de grande quantidade inclusive com a geração das novas vinhaças, decorrentes da produção do etanol de 2<sup>a</sup>. geração e de outros produtos canavieiros (ELIA NETO, 2016) que estão surgindo.

Assim, para a destinação deste efluente, ao longo dos anos, diferentes maneiras foram propostas e continuam sendo propostas, desde a aplicação em lavouras denominada fertirrigação até a utilização na geração de energia. Desta forma, as características físico-químicas são relevantes para os estudos de aproveitamento na fertirrigação ou na geração de energia levando em consideração os impactos ambientais e as eficiências dos processos tecnológicos de utilização.

Na Tabela 1 são apresentadas as composições químicas de vinhaças oriundas de diferentes tipos de mostos que existem nos processos produtivos do etanol.

**Tabela 1:** Composição química de vinhaças conforme o tipo de mosto

Parâmetro	Unidade	Tipo de mosto		
		Melaço	Caldo	Misto
pH		4,2 a 5,0	3,7 a 4,6	4,4 a 4,6
Temperatura	°C	80 a 100	80 a 100	80 a 100
DBO	mg.L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub>	25000	6000 a 16500	19800
DQO	mg.L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub>	65000	15000 a 33000	45000
Relação DQO/DBO		3	2 a 3	2
Sólidos totais	mg.L <sup>-1</sup>	81500	23700	52700
Sólidos voláteis	mg.L <sup>-1</sup>	60000	20000	40000
Sólidos fixos	mg.L <sup>-1</sup>	21500	3700	12700
Nitrogênio (N)	mg.L <sup>-1</sup> N	450 a 1610	150 a 700	480 a 710
Fósforo (P)	mg.L <sup>-1</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	100 a 290	10 a 210	9 a 200
Potássio (K)	mg.L <sup>-1</sup> K <sub>2</sub> O	3740 a 7830	1200 a 2100	3340 a 4600
Cálcio (Ca)	mg.L <sup>-1</sup> CaO	450 a 5180	130 a 1540	1330 a 4570
Magnésio (Mg)	mg.L <sup>-1</sup> MgO	420 a 1520	200 a 490	580 a 700
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	mg.L <sup>-1</sup> SO <sub>4</sub>	6400	600 a 760	3700 a 3730
Carbono (C)	mg.L <sup>-1</sup> C	11200 a 22900	5700 a 13400	8700 a 12100
Relação C/N		16 a 16,27	19,7 a 21,07	16,4 a 16,43
Matéria orgânica (MO)	mg.L <sup>-1</sup>	63400	19500	3800
Subst. Redutoras	mg.L <sup>-1</sup>	9500	7900	8300

**Fonte:** adaptado de ELIA NETO, 2016

De forma resumida, para avaliações ambientais e de utilização como fertilizante, os principais parâmetros físico-químicos para a vinhaça (ANA, 2009) são apresentados na Tabela 2 a seguir:

**Tabela 2:** Parâmetros físico-químicos resumidos para a vinhaça

Parâmetro	Unidade	Valor
pH		4,3
Temperatura	°C	90
DBO	mg.L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub>	14833
DQO	mg.L <sup>-1</sup> O <sub>2</sub>	23801
Relação DQO/DBO		2
Sólidos totais	mg.L <sup>-1</sup>	32788
N : P : K	mg.L <sup>-1</sup>	433 : 34 : 2206
Carga orgânica	g DQO.L <sup>-1</sup> etanol	274
Vazão	L.L <sup>-1</sup> etanol	11,5

**Fonte:** adaptado de ELIA NETO, 2016

Nota-se nestes parâmetros (Tabelas 1 e 2) que a vinhaça não é um fertilizante completo com potássio e enxofre suficientes, mas pouco nitrogênio e pouco fósforo.

Outros parâmetros mostram também o grande poder poluidor da vinhaça (p.ex. os valores de carga orgânica, de temperatura e outros) que implicou a proibição de lançamento em corpos hídricos e um constante monitoramento dos órgãos ambientais para a adequada destinação deste resíduo industrial.

Nos últimos anos a fertirrigação com vinhaça *in natura* é a maneira mais utilizada pelas usinas para a destinação embora haja outras: utilização da vinhaça concentrada para a diminuição dos custos de transporte na aplicação em locais mais distantes, aplicação na lavoura de mistura da vinhaça com outras águas residuárias (lavagem de pisos, purga de circuitos fechados, sobra de condensados e outros) (ANA. 2009), utilização para a geração de energia em biodigestores.

### **3.2 Portaria CETESB para aplicação da vinhaça no solo**

A normatização da destinação da vinhaça envolveu os órgãos ambientais que publicaram ao longo dos anos portarias e/ou resoluções regulamentando os critérios e procedimentos para a aplicação no solo.

Em 11/10/2002 foi criada a CASS (Câmara Ambiental do Setor Sucoenergético) pertencente a CETESB (Cia. Ambiental do Estado de São Paulo) como primeira iniciativa do setor para a discussão dos problemas setoriais, proposições de normativas etc. Nesta época não havia padrões de aplicação da vinhaça no solo, com cada regional da CETESB adotando critérios diferentes. Em janeiro de 2005 surge a primeira edição da portaria P4.231 homologada pela Decisão de Diretoria n. 035/2005/E de 09/03/2005 denominada “Vinhaça – Critérios e procedimentos para a aplicação da vinhaça no solo agrícola” no Estado de São Paulo. Algumas portarias complementares em 2005 alteraram alguns artigos da 1ª. edição. Em dezembro de 2006 foi lançada a segunda edição desta mesma portaria homologada pela Decisão da Diretoria n. 262/2006/C em 22/12/2006 que flexibilizou os distanciamentos das coletas de amostras de solo. A terceira edição foi lançada em outubro de 2014 em sua 1ª. versão, homologada pela Decisão de Diretoria n. 365/2014/C de 09/12/2014 e trouxe adequações à segunda edição. A 2ª. versão e atualmente vigente foi publicada em fevereiro de 2015, homologada pela Decisão de Diretoria n. 045/2015/c de 12/02/2015 e introduziu o monitoramento da qualidade ambiental do solo.

A seguir são apresentados alguns pontos interessantes da portaria P4.231 2ª. versão vigente:

- o item 5.10) foi regulamentado em 2018 com homologação pela Decisão de Diretoria n. 132/2018/E/C de 11 de julho de 2018 e trata da implantação de poços de monitoramento das águas subterrâneas nos locais onde ocorre a fertirrigação por vinhaça definindo que deve haver, no mínimo, 1 (um) poço de monitoramento a cada 50 km<sup>2</sup> da área a ser fertirrigada com uma frequência de coleta de amostras de 2 (duas) por ano além de outros critérios. Os parâmetros químicos a serem monitorados nestes poços são os seguintes: Ca, Cloreto, P<sub>total</sub>, Mg<sub>total</sub>, N<sub>Amoniacal</sub>, N<sub>Kjeldhal</sub>, N<sub>Nitrato</sub>, N<sub>Nitrito</sub>, K<sub>total</sub>, Na e Sulfato.

- no item 5.7) consta que anualmente deverá ser realizado ou atualizado o Plano de Aplicação da Vinhaça (PAV) que deve conter as áreas e as taxas de dosagem a serem aplicadas.

- o item 9) trata da determinação da dosagem da vinhaça no solo com relação à necessidade da cultura. A dosagem é calculada de acordo com a análise de solo que deve ser realizada anualmente fornecendo o valor para a colocação no PAV do ano seguinte. A determinação da aplicação é função do potássio disponível na vinhaça e no solo e da CTC (Capacidade de Troca Catiônica) do solo. A portaria prevê também que semanalmente deverá ser determinado o teor de  $K_2O$  da vinhaça a ser aplicada na lavoura, ou seja, se pura, concentrada ou incorporada em água residuária. Essa determinação irá indicar a dosagem a ser aplicada.

- no subitem 9.1.2) é informada a equação para a dosagem máxima a ser aplicada que segue:

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

Onde:

0,05 = 5% da CTC (CTC = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em  $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$  a pH 7,0 dada pela análise de fertilidade do solo)

ks = Concentração de potássio no solo, expressa em  $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ , à profundidade de 0,80m, dada pela análise de fertilidade do solo.

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 um hectare por 0,80 m de profundidade.

(3744 =  $39 \times 80 \times 1,2$  (considerando a densidade do solo de  $1,0 \text{ g.cm}^{-3}$ ); 39 = peso atômico do K; 80 = profundidade do solo, perfil de 80 cm; 1,2 = fator para transformar K para  $K_2O$ )

185 = kg de  $K_2O$  extraído pela cultura por ha, por corte.

kvi = Concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de  $K_2O.m^{-3}$ , resultante da média anual obtida nas análises semanais ou da média obtida nas análises semestrais.

Nota-se que a equação 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.

- no item 7) consta que para a caracterização da vinhaça produzida pela usina os seguintes parâmetros químicos devam ser analisados: pH,  $N_{\text{Nitrito}}$ ,  $N_{\text{Nitrito}}$ ,  $N_{\text{Amoniacal}}$ ,  $N_{\text{Kjeldhal}}$ , Na, Ca, Mg, K, Sulfato,  $P_{\text{total}}$ , Cloreto com uma frequência de amostragem de no mínimo duas por ano no local de geração da vinhaça, ou seja, analisando-se a vinhaça pura.

- apesar de no item 5), sobre os critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação no solo, constar as condições para os tanques de armazenamento e para os canais de distribuição da vinhaça, existem outros sistemas que as usinas utilizam para a distribuição e aplicação da vinhaça no solo: através de caminhões-tanque, conjuntos de aspersores, Hidro Roll e moto bomba e sistemas de carretel enrolador.

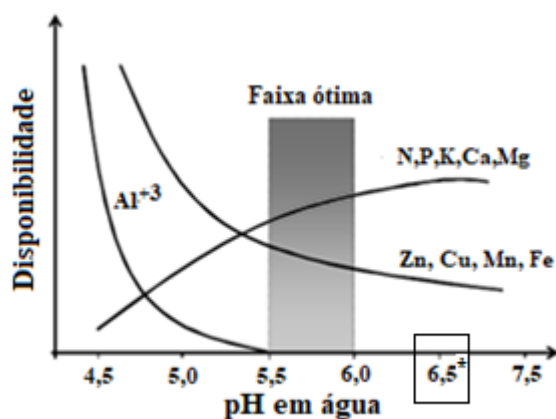
### **3.3 Caracterização da fertilidade do solo**

As análises de solo são importantes porque apresentam os dados físicos, químicos e mineralógicos que servirão para a tomada de decisões em relação a vários pontos, quer sejam, para seu uso na agricultura, para a avaliação ambiental, para a avaliação estrutural etc. Na agricultura são muito importantes pois avaliam a disponibilidade de nutrientes às culturas ou a existência de elementos tóxicos ou em excesso. Permitem, assim, a aplicação direcionada de fertilizantes e de corretivos auxiliando no manejo do solo (RAIJ, 2001).

Comumente três tipos de análises podem ser feitos em amostras de solo: análises físicas, análises químicas e análises mineralógicas (DONAGEMA, 2011).

Para atender à portaria P4.231 da CETESB item 8,2) há a necessidade de análises químicas para permitir avaliar a fertilidade do solo de uma determinada área. Os principais parâmetros para a análise da fertilidade são os seguintes: pH, SB (Soma de Bases), CTC (Capacidade de Troca Catiônica), V% (Saturação por Bases), m% (Saturação por Alumínio), MO (Matéria Orgânica) e as concentrações de cátions (CETESB, 2015).

O pH do solo, ou o potencial hidrogeniônico, depende da concentração de cátions ácidos  $H^+$  e  $Al^{3+}$  pois o alumínio age como elemento acidificante ativando o  $H^+$  (LOPES, 1998). O aumento das concentrações destes cátions, que pode ocorrer através da utilização de soluções 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 & BORGES, 2007). Dependendo do tipo de cultura, esta pode ser ou não resistente a condições de pH muito ácidas comprometendo o seu desenvolvimento. A Figura 1 mostra uma faixa ótima para o pH onde ocorre um melhor aproveitamento dos nutrientes do solo pela maioria das plantas (SOUSA et al., 2007). A cana-de-açúcar se desenvolve em solos com pH entre 4,0 e 8,5, mas o valor ideal é 6,5 e está anotado na figura (AGEITEC, 2020).



**Figura 1:** Relação entre disponibilidade de nutrientes e pH do solo  
\*valor ideal para a cana-de-açúcar

**Fonte:** SOUSA et al., 2007

A SB denominada “Soma de Bases” é a somatória dos teores das bases trocáveis presentes no solo que são os cátions que podem ser adsorvidos pelas plantas (Eq. 2) (TEIXEIRA, 2017):

$$SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Na^{+} \quad (\text{Eq. 2})$$

A CTC denominada “Capacidade de Troca Catiônica” 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  $Al^{3+}$ ) (Eq. 3) e a CTC efetiva é correspondente a soma de todos os cátions permutáveis, com exceção do íon  $H^{+}$  (Eq. 4) (TEIXEIRA, 2017).

$$CTC_{\text{total}} = SB + H^{+} + Al^{3+} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Na^{+} + H^{+} + Al^{3+} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$CTC_{\text{efetiva}} = SB + Al^{3+} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Na^{+} + Al^{3+} \quad (\text{Eq. 4})$$

V% denominado “Saturação por Bases” é determinada pela razão da SB pela CTC total em porcentagem (Eq. 5) e indica a proporção da CTC que é preenchida pelas bases trocáveis (TEIXEIRA, 2017):

$$V\% = SB/CTC_{\text{total}} \cdot 100\% \quad (\text{Eq. 5})$$

Este parâmetro é utilizado como um indicativo das condições de fertilidade do solo já que expressa um fator de retenção dos cátions no solo. Os solos com o parâmetro  $V\% \geq 50\%$  são considerados eutróficos (férteis), enquanto solos com o parâmetro  $V\% < 50\%$  são caracterizados como distróficos ou inférteis (BRITO, 2013; RONQUIM 2010).

A avaliação de toxicidade do solo por meio das concentrações de  $Al^{3+}$  pode ser feita através do cálculo do parâmetro  $m\%$  (Eq. 6) denominado “Saturação por Alumínio”, que corresponde à relação em porcentagem dos teores de  $Al^{3+}$  com a CTC efetiva (BRAGA, 2013; RONQUIM, 2010):

$$m\% = Al^{3+}/CTC_{\text{efetiva}} \cdot 100\% \quad (\text{Eq. 6})$$

As variações do alumínio no solo são decorrentes principalmente da decomposição intempérica das argilas cauliníticas. Os argilominerais são constituídos predominantemente por alumínio, formados por gibbsitas ( $Al(OH)_3$ ), hematitas ( $Fe_2O_3$ ), aluminas ( $Al_2O_3$ ), 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.

Em casos em que os percentuais de  $m\%$  forem maiores que 20%, estes podem representar um risco de toxicidade a algumas culturas que não são resistentes a essas condições (PEREIRA, 2015; LOPES, 2004). Em alguns solos distróficos, as concentrações de  $m\%$  podem ser superiores a 50% com teor 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  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  (BARROS et al., 2010; RONQUIM, 2010; ZOLIN et al., 2011 ).

Ainda em relação à condição de acidez do solo é relevante citar que no Brasil há predominância de solos ácidos, que requerem a aplicação de corretivos para a elevação do pH, onde é comum a utilização da técnica da calagem. Nas regiões sudeste e centro-oeste o método

corretivo utilizado é o “Método da Saturação por Bases” (SOUSA et al., 2007), onde a necessidade da calagem para solos argilosos é calculada através da equação (Eq. 7) descrita a seguir:

$$NC \text{ (t. ha}^{-1}\text{)} = (V_2 - V_1) \cdot CTC_{\text{total}} / \text{PRNT} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

NC = necessidade da calagem dada em tonelada por hectare para 0-20cm de solo

$V_2$  = valor da saturação por bases do tipo de cultura dada em % (para a cultura da cana-de-açúcar é utilizado o valor de 60%)

$V_1$  = valor da saturação por bases atual do solo dada em %

$CTC_{\text{total}}$  = capacidade de troca catiônica dada em  $\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$  a pH 7,0

PRNT = poder relativo de neutralização total do corretivo

Alguns valores referenciais do PRNT são apresentados na Tabela 4 a seguir:

**Tabela 3:** Valores referenciais do PRNT de alguns corretivos

Corretivo	PRNT
CaCO <sub>3</sub>	100
MgO	248
CaO	179
Ca(OH) <sub>2</sub>	135
Mg(OH) <sub>2</sub>	172

**Fonte:** adaptado de SOUSA et al., 2007

A utilização da calagem, além de elevar o pH, também fornece Ca<sup>2+</sup> ou Mg<sup>2+</sup> como nutrientes, diminuindo ou eliminando os efeitos tóxicos do Al<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup> e Fe<sup>2+</sup>. Além disto diminui a fixação de P, aumenta a eficiência dos fertilizantes, aumenta a atividade microbiana e a liberação de nutrientes pela decomposição da MO, ou seja, melhora as propriedades físicas do solo, proporcionando melhor aeração, circulação de água, favorecendo o desenvolvimento das raízes (SOUSA et al., 2007).

Outra técnica de correção é a gessagem que poderá ser necessária quando ocorrer, pelo excesso da aplicação da vinhaça, a salinização do solo (alta concentração de sódio) ou o excesso da concentração de potássio (TAVARES, 2012).



### 3.4 Tipo de solo e caracterização ambiental do solo

O tipo de solo latossolo vermelho/amarelo é formado pelo intemperismo de rochas capazes de formar os argilominerais com dominância dos filossilicatos de alumínio como a caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e/ou óxidos de ferro e de alumínio refletindo em baixo pH, alto teor de  $\text{Al}^{3+}$  trocável, baixa saturação por bases (V%) e baixa CTC, definindo as características químicas de um solo distrófico que necessita manejo adequado com corretivos e fertilizantes. Neste solo, os argilominerais e as partículas coloidais, como as substâncias húmicas geradas pela degradação da MO, são importantes para a avaliação da fertilidade devido à capacidade de trocar cátions. Esta fração do solo controla o comportamento químico, ou seja, onde ocorre a retenção de nutrientes, a retenção de poluentes, a acidez, a eficiência das biomoléculas (herbicidas, fungicidas etc.) (SOUSA; LOBATO, 2005).

A formação estrutural dos filossilicatos de alumínio se dá com unidades básicas em esquemas de tetraedros de alumínio onde um átomo de silício é rodeado por quatro átomos de oxigênio e em esquemas de octaedros de alumínio constituídos por um cátion di ou trivalente ( $\text{Al}^{+3}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ) rodeado por seis átomos de oxigênio ou hidroxilas. Essas unidades se polimerizam formando camadas ou folhas. A disposição destas folhas em arranjos hexagonais de maneiras diferentes e com elementos químicos diferentes definem os diversos minerais divididos em grupos com características físico-químicas diferentes também. Os mais comuns são dos grupos do alofano, da caulinita, da illita, da montmorilonita ou esmectita, da mica, da palygorskita/attapulguita e da clorita (LAESPIGA, 2008). Na Tabela 4 são mostradas características de alguns argilominerais. Na coluna estrutura o primeiro número define a quantidade de folhas tetraédricas “T” e o segundo número a quantidade de folhas octaédricas “O”. Para a clorita o terceiro número define mais uma folha octaédrica. O mineral vermiculita que aparece na tabela pertence ao grupo da mica (REICHERT, 2011).

**Tabela 4:** Características dos argilominerais

Mineral	Estrutura	CTC ( $\text{cmol.kg}^{-1}$ )	ASE* ( $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ )	Espaçamento (nm)	Expansividade	Dependência da carga com o pH	Atividade coloidal
Mica	2:1 (T-O-T)	20-40	70-120	1,0	não	média	alta
Vermiculita	2:1 (T-O-T)	120-100	600-800	1,0-1,5	pequena	baixa	alta
Montmorilonita	2:1 (T-O-T)	80-120	600-800	variável	sim	baixa	extrem.alta
Clorita	2:1:1 (T-O-T-O)	20-40	70-150	1,4	não	elevada	média
Caulinita	1:1 (T-O)	1-10	10-20	0,72	não	elevada	baixa

\*ASE – Área Superficial Específica (área por unidade de massa)

**Fonte:** adaptado de REICHERT, 2011

O material de origem do solo e a textura do solo são características intrínsecas do tipo de solo que não podem ser controladas e que influenciam a disponibilidade de nutrientes para a cultura. Assim as análises físicas, químicas e mineralógicas que determinam a textura do solo e a composição química das espécies que compõem o solo são importantes e auxiliam no manejo adequado para cada cultura (RONQUIM, 2010).

A portaria P4.231 da CETESB no item 8.1) exige a caracterização ambiental do solo exigindo a coleta de amostras de solo para a determinação e avaliação dos seguintes elementos: antimônio, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio, zinco, varredura de VOC e varredura de SVOC (CETESB, 2015).

#### **4. MATERIAL E MÉTODOS**

A Figura 2 apresenta as etapas do desenvolvimento do trabalho de pesquisa.

Na etapa A, após a introdução e descrição do objetivo, foram pesquisadas as informações e conceitos técnico-científicos importantes sobre os temas de interesse, sobre as características da vinhaça, sobre a portaria de aplicação da vinhaça no solo, sobre a fertilidade do solo, sobre as características ambientais e mineralógicas do solo e sobre análises de solo.

Na etapa B, em Material e Métodos, é apresentada a área de estudo onde houve a aplicação das vinhaças nas áreas que foram avaliadas nesse estudo (glebas 5, 9, 15, 22 e 23) entre os anos de 2012 a 2017 com a localização geográfica. Segue uma tabela com os parâmetros químicos que foram analisados para as vinhaças e para os solos, além de informações sobre a coleta das amostras de campo dentro da área de estudo realizada em 2018.

Em Resultados e Discussão são apresentados os dados compilados dos PAV's em planilhas com os parâmetros químicos das vinhaças, com os parâmetros químicos dos solos das glebas avaliadas 5, 9, 15, 22 e 23 e com as análises das amostras dos solos das glebas 3, 23 e 26. Também são apresentadas as planilhas com as análises das amostras de campo também das glebas 3, 23 e 26. Os gráficos apresentados serviram para as avaliações e considerações sobre os resultados.

As conclusões fecham o presente trabalho com algumas proposições para a continuidade dos estudos.

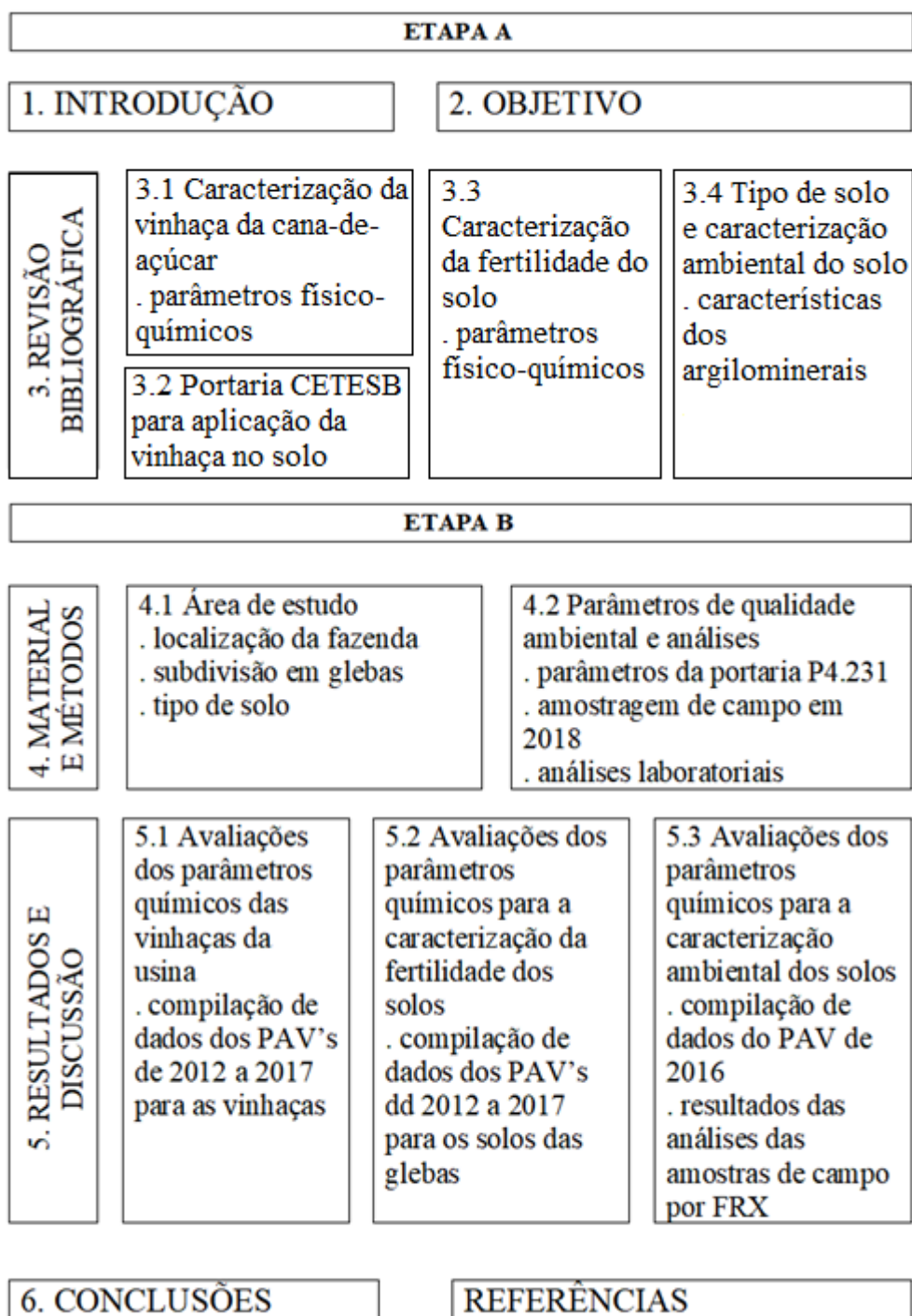


Figura 2: Etapas do desenvolvimento do trabalho de pesquisa

#### 4.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Pirassununga-SP mostrada na Figura 3 que está inserido na Mesorregião de Campinas e na Microrregião de Pirassununga. O município se encontra a uma latitude 21°59'46" Sul e a uma longitude 47°25'33" Oeste, estando

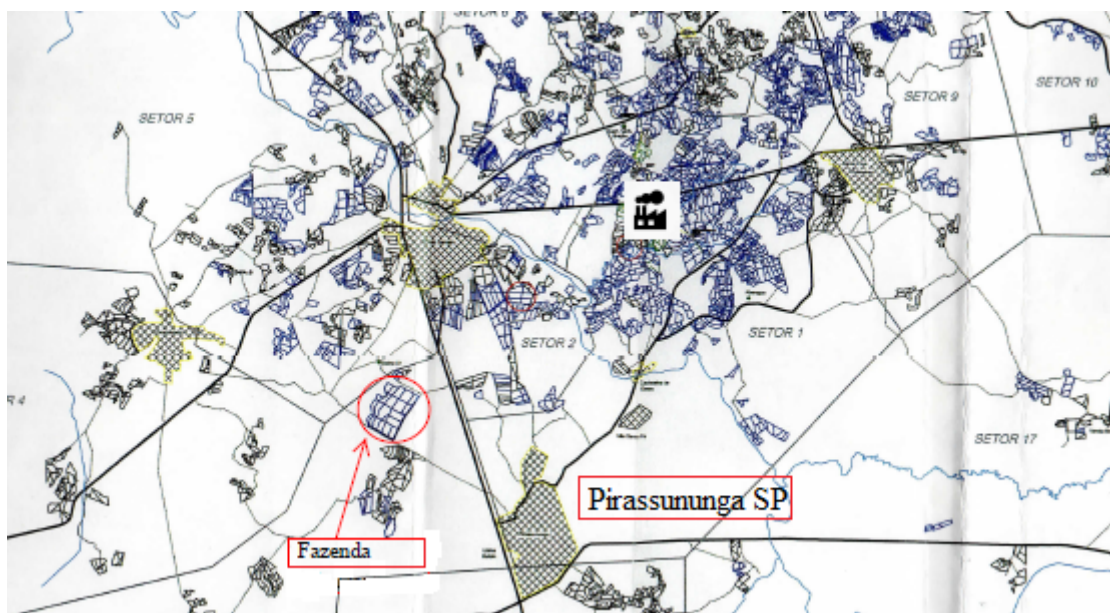
a uma altitude de 627 m com área de 726,9 km<sup>2</sup>.



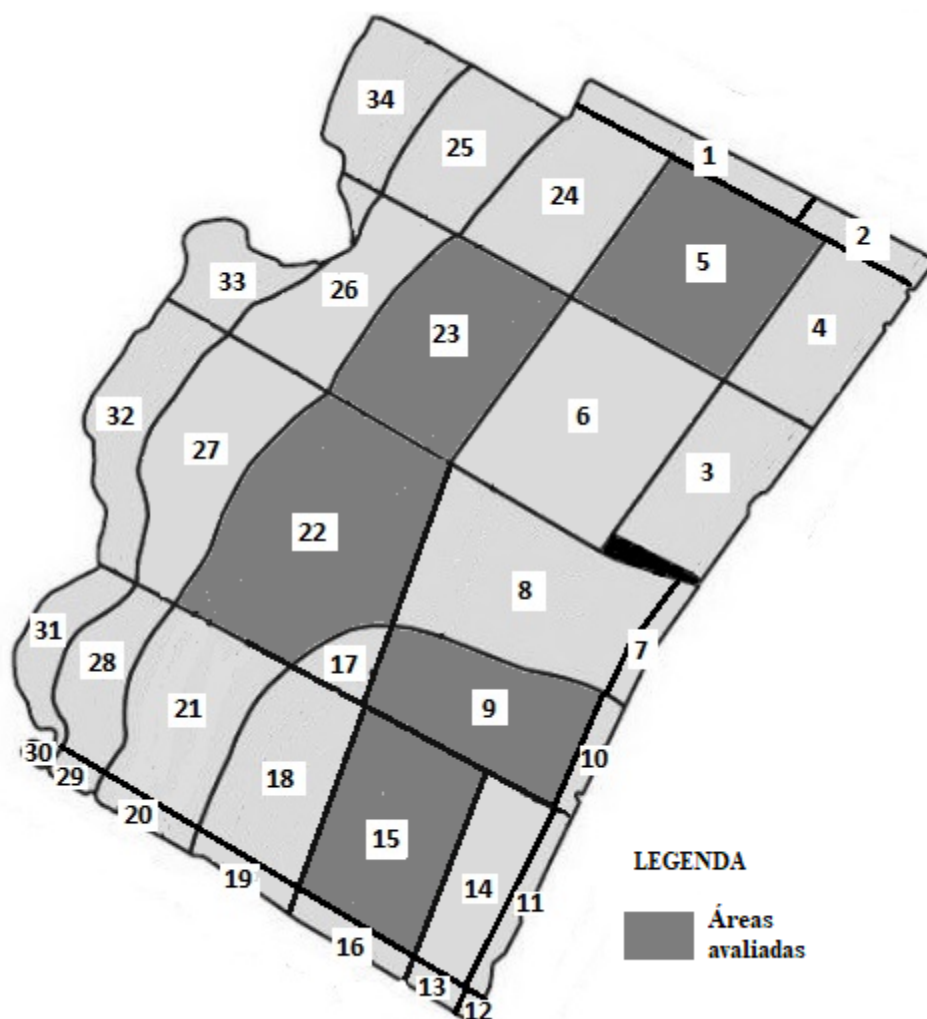
**Figura 3:** Localização do município de Pirassununga SP

**Fonte:** O autor, 2020

A Figura 4 mostra a localização da área de estudo próxima à cidade de Pirassununga-SP e é uma das áreas destinadas pela usina para a aplicação da vinhaça. Esta área (fazenda) com aproximadamente 553 ha é subdividida em glebas ou talhões que são mostrados na Figura 5 com suas respectivas numerações de 1 a 34.



**Figura 4:** Localização da área de estudo (Fazenda)



**Figura 5:** Fazenda e suas subdivisões em glebas

As numerações das glebas constaram das apresentações dos dados de trabalho pois foram utilizadas na parte documental da pesquisa. As avaliações dos dados foram efetuadas nas glebas 5, 9, 15, 22 e 23 mostradas em destaque na Figura 5. O período de aplicação das vinhaças nessas glebas abrangeu os anos de 2012 a 2017.

Em relação às vinhaças que foram aplicadas nestas áreas, o armazenamento ocorreu em 3 tanques abertos, revestidos com geomembranas de PEAD (polietileno de alta densidade) de 2 mm de espessura, onde também é misturada com as águas residuárias. As capacidades dos tanques são 2200 m<sup>3</sup>, 2000 m<sup>3</sup> e 1000 m<sup>3</sup>, o primeiro na área industrial e os outros dois na área agrícola. Destes tanques a vinhaça é distribuída por 2 canais primários e diversos canais secundários por gravidade. Também há 2 pontos para o carregamento dos caminhões-tanque de transporte.

O tipo de solo destas glebas é o latossolo vermelho/amarelo e o relevo é constituído por colinas amplas onde a declividade não é muito acentuada (ARCADIS TETRAPLAN, 2011).

Este solo normalmente é muito profundo e poroso ou muito poroso apresentando boa retenção de água e um perfil para um bom desenvolvimento radicular das plantas e que, aliado ao perfil suave do terreno, permite de forma simples a utilização da mecanização para o plantio e manejo da cultura da cana-de-açúcar, definindo as características físicas muito boas. Suas características químicas, porém, não são tão adequadas, exigindo o manejo adequado com corretivos e fertilizantes (SOUSA; LOBATO, 2005).

#### 4.2 Parâmetros de qualidade ambiental e análises

Os parâmetros químicos a serem analisados para a caracterização da vinhaça, a caracterização da fertilidade do solo e a caracterização ambiental do solo, que constam na portaria P4.231 da CETESB, são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Parâmetros químicos conforme portaria P4.231

Caracterização da vinhaça	Caracterização da fertilidade do solo	Caracterização ambiental do solo	
pH	Alumínio trocável (Al)	Antimônio (Sb)	Selênio (Se)
Nitrogênio nitrato	Cálcio (Ca)	Arsênio (As)	Zinco (Zn)
Nitrogênio nitrito	Magnésio (Mg)	Bário (Ba)	Varredura de VOC
Nitrogênio amoniacal	Sódio (Na)	Cádmio (Cd)	Varredura de SVOC
Nitrogênio Kjeldhal	Sulfato (SO <sub>2</sub> )	Chumbo (Pb)	
Sódio (Na)	Acidez potencial	Cobalto (Co)	
Cálcio (Ca)	Potássio (K)	Cobre (Cu)	
Potássio (K)	Matéria orgânica (MO)	Cromo(Cr)	
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	CTC	Mercurio (Hg)	
Fósforo total (P)	pH	Molibdênio (Mo)	
Cloreto (Cl)	V%	Níquel (Ni)	

**Fonte:** adaptado de CETESB, 2015

Os dados constantes nos PAV's, decorrentes das análises de solo das glebas visando ao atendimento da portaria, foram compilados em planilhas que permitiram as análises da evolução temporal das alterações químicas do solo através de gráficos, possibilitando a avaliação de uma possível correlação entre a utilização da vinhaça na fertirrigação e a fertilidade do solo. Esta parte documental utilizada no levantamento de dados deste trabalho de pesquisa se referiu, portanto, aos relatórios de dados dos PAV's da usina para a área de estudo durante o período de 2012 a 2017 disponibilizados pela CETESB de Mogi-Guaçu SP.

Nos planos anuais foram apresentadas as áreas a serem fertirrigadas no ano com as quantidades a serem dosadas. O cálculo das quantidades a serem dosadas dependeram das características químicas do solo da área específica seguindo o procedimento de cálculo apontado na portaria (Equação 1 já apresentada). Também nestes planos constaram os dados

das análises de solos das glebas onde houve aplicação das vinhaças.

Além dos dados dos relatórios dos PAV's outros dados importantes para este trabalho de pesquisa foram os obtidos das amostragens em campo realizadas no dia 27 de março de 2018 quando foram coletadas seis amostras em três locais da área de estudo, obtidas nos perfis de solo com 30 cm e 100 cm de profundidade. O primeiro local de amostragem foi na gleba 3 na longitude -47,493684 e latitude -21,944610; o segundo local de amostragem foi na gleba 23 na longitude -47,498589 e latitude -21,937313 e o terceiro local de amostragem foi na gleba 26 na longitude -47,503523 e latitude -21,937238. Estas localizações coincidem com as localizações das amostras de solo efetuadas pela usina no PAV de 2016 permitindo avaliações comparativas dos resultados analíticos em relação à qualidade ambiental dos solos.

É importante salientar que as amostras da gleba 3 foram coletadas em um limite da fazenda onde no período de 2012 a 2017 não houve aplicação das vinhaças e que serão consideradas como amostras em branco permitindo avaliações comparativas dos resultados analíticos entre as outras amostras.

Foram feitas as análises químicas das amostras coletadas do solo através da técnica analítica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), realizadas no Laboratório de Fluorescência de Raios-X do Departamento de Petrologia e Metalogenia (DPM) da UNESP, campus de Rio Claro. O equipamento utilizado foi o Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X da Philips modelo PW-2400 e os procedimentos analíticos utilizaram a metodologia proposta por Nardy et al. (1997).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros químicos para a caracterização química das vinhaças da usina compilados dos PAV's de 2012 a 2017.

**Tabela 6:** Análises das vinhaças

Parâmetros Químicos	Ano						Média	Fuess (2013)
	2012	2013	2014	2015	2016	2017		
<b>pH</b>	4,4	4,1	4,6	6,1	4,2	4,9	4,7	4,59
<b>NH<sub>3</sub> (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	2,8	1,1	...	12,7	14,8	12,2	8,7	87,50 ± 7,50 (mg.L <sup>-1</sup> )
<b>N<sub>Kjeldahl</sub> (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	153,4	136,6	9,5	117,0	215,4	144,5	129,4	1218 (mg.L <sup>-1</sup> )
<b>Na<sup>+</sup> (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	10,65	<25	36,30	<25	6,47	58,00	26,57	10,64
<b>Ca<sup>2+</sup> (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	493,8	397,3	10,2	658,3	801,5	54,9	402,7	458,4
<b>K<sup>+</sup> (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	200,6	1988,5	8,8	2267,0	4047,5	312	1470,7	1330,40 ± 0,10
<b>Mg<sup>2+</sup> (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	233,8	171,8	4	342,5	305,5	NI	211,5	235,4
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	1087,1	1606,2	<25,0	1752,4	1744,5	438,0	1108,7	3701 ± 1154,70
<b>DBO (gDBO<sub>5</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	3,1	3,1	2,3	8,2	9,2	NI	5,2	14,40 ± 0,53
<b>DQO (gO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	7,4	11,4	5,7	20	28,3	NI	14,5	24,63 ± 0,55
<b>R<sub>DQO/DBO</sub></b>	2,4	3,7	2,4	2,4	3,4	NI	2,9	1,71
<b>Dureza total (mgCaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	2196,0	1699,4	41,8	3054,1	3259,0	NI	2050,0	NI

NI – Não Informado

Através dos valores médios dos parâmetros químicos foram feitas comparações com os valores apresentados por Fuess (2013) que fez análises de amostras coletadas de vinhaça desta mesma usina. Estas avaliações serão apresentadas também no capítulo 5.1 deste trabalho.

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros químicos das análises das amostras de solo para a caracterização da fertilidade do solo das glebas avaliadas (5, 9, 15, 22 e 23) da fazenda compilados dos PAV's de 2012 a 2017.



**Tabela 7:** Análises químicas das amostras de solo das glebas

Ano	Gleba	Data de análise	pH	V (%)	Ca <sup>2+</sup> (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	Mg <sup>2+</sup> (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	K <sup>+</sup> (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	Al <sup>3+</sup> (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	m (%)	H+Al (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	SB (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	CTC (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	MO (g.dm <sup>-3</sup> )
2017	15	17/mar	5,5	55,46	21,31	9,86	1,12	0,14	0,43	26	32,38	58,38	17
2017	22	17/mar	4,9	35,36	12,51	5,54	1,58	0,84	4,09	36	19,69	55,69	18
2017	5	17/mar	5	34,56	10,89	4,97	0,98	0,5	2,87	32	16,9	48,9	13
2016	5	09/mar	4,8	33,7	5,82	2,09	0,72	0,59	6,39	17	8,64	25,64	8
2016	9	09/mar	4,7	42,21	12,65	2,68	0,66	0,58	3,48	22	16,07	38,07	13
2015	9	06/mar	5,3	57,41	14,3	6,21	2,39	0,16	0,69	17	22,92	39,92	13
2015	23	06/mar	4,6	32,93	6,34	2,89	0,57	1,13	10,32	20	9,82	29,82	14
2015	5	06/mar	5	43,18	8,76	4,56	0,35	0,5	3,53	18	13,68	31,68	12
2014	23	13/mar	5,6	64,8	18,42	9,71	1,28	0,28	0,94	16	29,45	45,45	12
2014	5	13/mar	5,4	56,66	12,26	7,39	1,26	0,59	2,74	16	20,92	36,92	10
2014	15	13/mar	5	44,32	10,79	4,72	1,97	0,27	1,52	22	17,51	39,51	10
2013	22	15/mar	5,2	54,93	14,36	5,8	0,52	0,04	0,2	17	20,71	37,7	11
2013	23	15/mar	5,8	64,67	15,83	6,78	1,18	0,17	0,69	13	23,8	36,8	12
2013	5	15/mar	5,5	71,38	17,21	6,76	0,95	0,21	0,82	10	24,94	34,94	12
2012	23	21/mar	5,3	60,57	12,56	6	1,4	<0,02	0	13	19,97	32,97	12
2012	22	21/mar	5,7	81,51	59,07	17,94	2,32	0,04	0,05	18	79,34	97,34	33
2012	15	21/mar	5,1	53,25	12,54	4,9	1,9	0,12	0,6	17	19,36	36,36	12

Na Tabela 8 são apresentadas as análises químicas das amostras de solo das glebas 3, 23 e 26 coletadas pela usina no ano de 2016 e que constaram do PAV daquele ano. Os parâmetros químicos serviram para avaliar a caracterização ambiental do solo da área conforme exige a portaria P4.231 da CETESB.

**Tabela 8:** Análises de solo das glebas 3, 23 e 26

Parâmetros	VP <sup>(1)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> peso seco)	VRQ <sup>(1)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> peso seco)	VI <sup>(1)</sup> (mg.kg <sup>-1</sup> peso seco)	Resultados		
				Gleba 3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Gleba 23 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Gleba 26 (mg.kg <sup>-1</sup> )
Antimônio (Sb)	2	<0,5	5	<0,215	<0,266	<0,213
Arsênio (As)	15	3,5	35	1,51	1,03	0,53
Bário (Ba)	120	75	500	11,64	1,59	6,62
Cádmio (Cd)	1,3	<0,5	3,6	<0,161	<0,266	<0,160
Chumbo (Pb)	72	17	150	8,05	5,31	5,79
Cobalto (Co)	25	13	35	0,45	<0,266	0,25
Cobre (Cu)	60	35	760	6,177	2,638	3,902
Cromo (Cr)	75	40	150	11,47	9,84	8,81
Mercurio (Hg)	0,5	0,05	1,2	<0,011	<0,266	<0,011
Molibdênio (Mo)	5	<4	11	0,53	0,29	0,3
Níquel (Ni)	30	13	190	1,57	0,66	0,85
Selênio (Se)	1,2	0,25	24	<0,269	<0,266	<0,266
Zinco (Zn)	86	60	1900	10,69	3,22	4,24
VOC				ND	ND	ND
SVOC				ND	ND	ND

(1) Valores Orientadores para Solo no Estado de São Paulo de 22/11/2016 - CETESB

VP - valor de prevenção

VRQ – valor de referência de qualidade

VI – valor de intervenção para solo agrícola

ND - não foram detectados

É importante salientar a diferença entre os valores VP, VRQ e VI. O valor de prevenção (VP) é a concentração de determinada substância, acima da qual podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo indicando a qualidade de um solo capaz de sustentar as suas funções primárias, protegendo-se os receptores ecológicos (a biota). O valor de referência de qualidade (VRQ) é a concentração de determinada substância no solo que o define com qualidade natural. E finalmente o valor de intervenção (VI) é a concentração de determinada substância no solo acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição genérico. Os valores de intervenção para o solo foram derivados da Planilha CETESB de Avaliação de Risco à Saúde Humana, versão de maio de 2013 (CETESB, 2020).

Na Tabela 9 são apresentados os valores das concentrações de potássio e da CTC e as relações entre a concentração de potássio no solo e a CTC de cada amostra do solo das glebas que definiram os valores calculados para as dosagens previstas (o primeiro usando 1,00 kg  $K_2O.m^{-3}$  e o segundo usando 3,00 kg  $K_2O.m^{-3}$  como valores para a concentração de potássio na vinhaça). Estes dados foram compilados dos PAV's de 2012 a 2017.

**Tabela 9:** Dosagens das vinhaças

Ano	Gleba	ks ( $cmol.dm^{-3}$ )	CTC ( $cmol.dm^{-3}$ )	Dosagem <sup>(1)</sup> ( $m^3.ha^{-1}$ )	Dosagem <sup>(2)</sup> ( $m^3.ha^{-1}$ )	%ks/CTC
2017	15	0,11	5,84	866,41	288,80	1,88
2017	22	0,16	5,57	628,66	209,55	2,87
2017	5	0,10	4,89	726,01	242,00	2,04
2016	5	0,07	2,56	395,41	131,80	2,81
2016	9	0,07	3,81	650,57	216,86	1,73
2015	9	0,24	3,99	37,49	12,50	5,99 <sup>(3)</sup>
2015	23	0,06	2,98	529,82	176,61	1,91
2015	5	0,04	3,17	647,01	215,67	1,10
2014	23	0,13	4,55	556,59	185,53	2,82
2014	5	0,13	3,69	393,17	131,06	3,49
2014	15	0,20	3,95	187,06	62,35	4,99
2013	22	0,05	3,77	696,06	232,02	1,38
2013	23	0,12	3,68	432,10	144,03	3,21
2013	5	0,10	3,49	483,40	161,13	2,72
2012	23	0,14	3,30	278,04	92,68	4,25
2012	22	0,23	9,73	1138,60	379,53	2,38
2012	15	0,19	3,64	154,30	51,43	5,23 <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Cálculo utilizando o valor de  $kvi = 1,00$  (kg  $K_2O.m^{-3}$ )

<sup>(2)</sup> Cálculo utilizando o valor de  $kvi = 3,00$  (kg  $K_2O.m^{-3}$ )

<sup>(3)</sup> Valor da concentração de potássio no solo > 5% da CTC

**Observação:** o valor maior de  $kvi$  foi adotado como fator de segurança, provavelmente para que os cálculos das dosagens fossem menores; o valor médio da concentração de  $K^+$  apresentado na tabela 6 é  $1,47 kg.L^{-1}$  que através do fator 1,2046 pode ser convertido para  $kg K_2O.m^{-3}$  resultando em  $1,77 kg K_2O.m^{-3}$

Na Tabela 9 estão sinalizados dois valores da relação %ks/CTC de 5,23 e 5,99 que se referem a um valor da concentração de potássio no solo (ks) maior que 5% da CTC. A portaria P4.231, no item 5.8.1, aponta que “a concentração máxima de potássio no solo não poderá exceder 5% da Capacidade de Troca Catiônica – CTC. Quando esse limite for atingido, a aplicação de vinhaça ficará restrita à reposição desse nutriente em função da extração média pela cultura, que é de 185 kg de  $K_2O$  por hectare por corte”. Desta forma, nesses casos o cálculo do valor de dosagem não seria obrigatoriamente baseado na Eq. 1 já apresentada anteriormente.

Para a gleba 15, no ano de 2012, e para a gleba 9, no ano de 2015, as dosagens baixas para o ano seguinte foram decorrentes desses valores elevados da relação %ks/CTC, respectivamente  $51,43 m^3.ha^{-1}$  e  $12,50 m^3.ha^{-1}$ . No caso da gleba 9, a baixa dosagem ocorrida causou em 2016 queda acentuada na concentração de  $K^+$  ( $0,07 cmol.dm^{-3}$ ) e queda na relação %ks/CTC (1,73) implicando a dosagem elevada de  $216,86 m^3.ha^{-1}$  para o ano seguinte.

Nas Tabelas 10 e 11 são apresentadas as análises das amostras de solo coletadas no campo em 2018 nas glebas 3, 23 e 26, feitas através da técnica de espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX). Estes dados serão utilizados nas avaliações, que serão apresentadas no capítulo 5.3 deste trabalho, da qualidade ambiental do solo nas glebas e comparados com os dados das análises feitas pela usina no PAV de 2016 nestas mesmas glebas apresentados na Tabela 8. Também serão comparados os resultados obtidos para as espécies entre as amostras. Como já citado anteriormente as amostras P1 da gleba 3 foram coletadas em um limite da fazenda onde no período de 2012 a 2017 não houve aplicação das vinhaças e que serão consideradas como amostras em branco permitindo avaliações comparativas dos resultados analíticos entre as outras amostras.

**Tabela 10:** Dados das análises das amostras de solo coletadas no campo – elementos traços

Elemento químico	Amostras					
	P1 30cm	P1 100cm	P2 30cm	P2 100cm	P3 30cm	P3 100cm
	Gleba 3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Gleba 3 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Gleba 23 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Gleba 23 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Gleba 26 (mg.kg <sup>-1</sup> )	Gleba 26 (mg.kg <sup>-1</sup> )
Bário (Ba) <sup>(1)</sup>	28,00	44,50	53,90	38,00	305,40	65,80
Cério (Cs)	0,70	1,00	1,00	1,20	28,90	66,60
Cobalto (Co) <sup>(1)</sup>	1,00	1,00	2,00	0,50	53,70	3,20
Cobre (Cu) <sup>(1)</sup>	7,10	6,80	8,90	8,30	122,80	28,50
Cromo (Cr) <sup>(1)</sup>	80,70	92,00	83,90	172,30	175,60	91,10
Estrôncio (Sr)	3,40	1,00	2,00	6,90	43,70	2,00
Gálio (Ga)	16,50	18,90	17,70	15,80	17,70	19,40
Ítrio (Y)	6,40	8,30	6,70	7,70	59,30	14,70
Lantânio (La)	5,30	6,50	1,00	10,50	53,90	26,50
Nióbio (Nb)	2,10	2,40	1,00	5,20	44,60	5,40
Níquel (Ni) <sup>(1)</sup>	3,50	5,40	1,20	7,00	69,60	23,20
Rubídio (Rb)	7,00	6,00	5,60	6,10	15,60	10,90
Vanádio (V)	163,70	169,20	138,10	148,40	912,90	179,20
Zinco (Zn) <sup>(1)</sup>	14,70	15,10	9,00	3,80	106,30	36,80
Zircônio (Zr)	201,20	189,10	185,90	198,30	305,80	213,00

(1) Elementos que constam na relação da portaria P4.231 CETESB

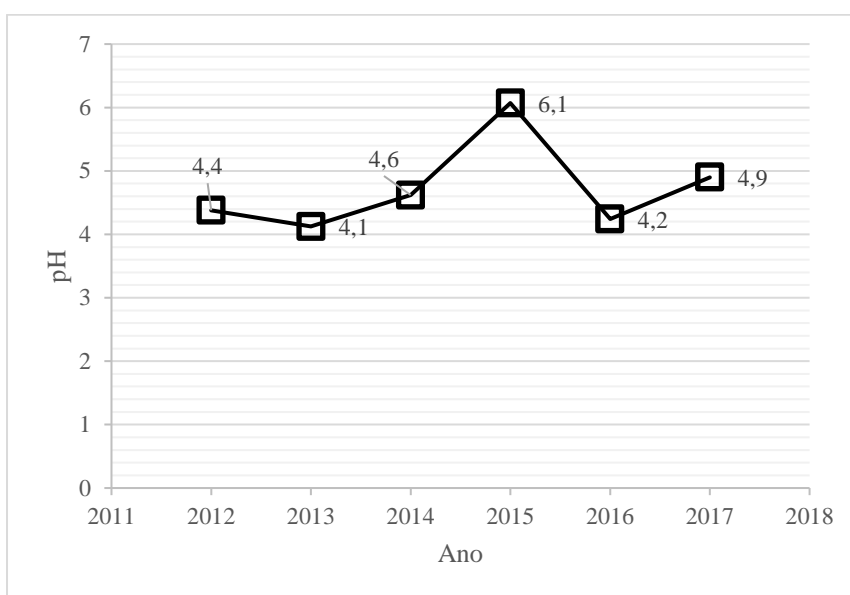
**Tabela 11:** Dados das análises das amostras de solo coletadas no campo – espécies

Composição Química	Fórmula	Amostras					
		P1 30cm	P1 100cm	P2 30cm	P2 100cm	P3 30cm	P3 100cm
		Gleba 3 (%)	Gleba 3 (%)	Gleba 23 (%)	Gleba 23 (%)	Gleba 26 (%)	Gleba 26 (%)
Alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,41	7,00	5,51	5,79	19,64	10,12
Cal	CaO	0,03	0,05	0,04	0,04	0,34	0,09
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,64	3,39	3,27	3,32	22,54	4,04
Pentóxido de fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06	0,05	0,05	0,05	0,26	0,06
Pirolusita	MnO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,12	0,04
Óxido de magnésio	MgO	0,02	0,01	0,01	0,01	0,22	0,05
Óxido de sódio	Na <sub>2</sub> O	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Óxido de potássio	K <sub>2</sub> O	0,01	0,01	0,02	0,02	0,06	0,07
Rutilo	TiO <sub>2</sub>	0,99	0,95	0,82	0,85	6,00	1,02
Sílica	SiO <sub>2</sub>	83,44	84,60	87,00	86,68	31,12	79,33
Loss of ignition (LOI)		4,41	3,92	3,29	3,24	19,72	5,20

### 5.1 Avaliações dos parâmetros químicos das vinhaças da usina

A Tabela 6 foi utilizada para as avaliações a seguir descritas.

A primeira avaliação se refere aos valores do pH das vinhaças da usina, mostrados na Figura 6, com um valor médio de 4,7 que é ácido, assim como o valor médio apresentado por Fuess (2013) de 4,59 para vinhaças desta mesma usina. Estes valores demonstram esta característica química apresentada em diversos estudos (ELIA NETO, 2016; ROCHA, 2013).



**Figura 6:** Valores do pH das vinhaças

Desta forma, a aplicação da vinhaça em solos que já tem características ácidas necessita a utilização de corretivos para a correção da acidez para atingir valores adequados de pH para a cultura da cana-de-açúcar conforme apresentado na Figura 1.

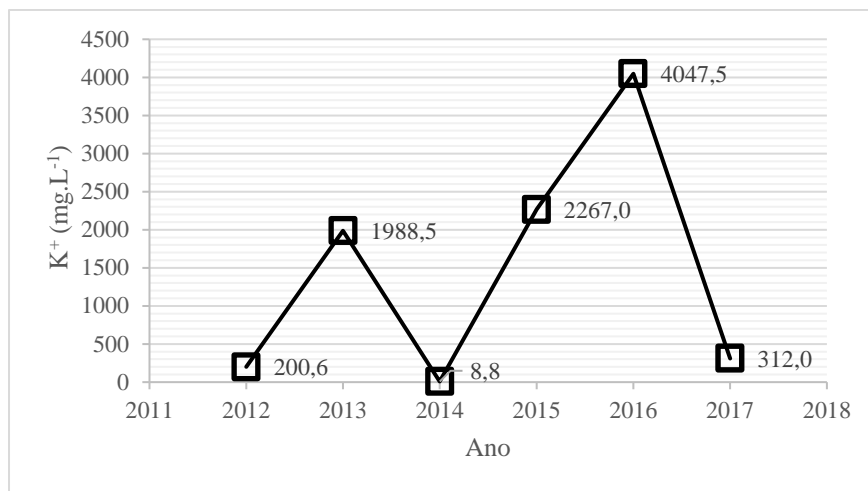
Apesar de não haver dados sobre a utilização de corretivos de solo nas glebas, um ponto a ser observado é que a degradação microbiana aeróbia da MO disponibilizada pela vinhaça auxilia na elevação do pH do solo já que aumenta o consumo dos íons  $H^+$ , o que poderia implicar, para a maioria das glebas, os valores do pH maiores que o valor médio de 4,7 das vinhaças.

A segunda avaliação se refere aos valores da concentração de potássio, mostrados na Figura 7, com um valor médio de  $1470,7 \text{ mg.L}^{-1}$  comprovando que a vinhaça é realmente uma excelente fonte deste nutriente. Fuess (2013) também obteve um valor médio de  $1330,4 \text{ mg.L}^{-1}$ .

A concentração de  $K^+$  apresentou um valor máximo em 2016 de  $4047,5 \text{ mg.L}^{-1}$  e valor mínimo em 2014 de  $8,8 \text{ mg.L}^{-1}$ . No primeiro caso, fica evidenciado que a vinhaça pode ter

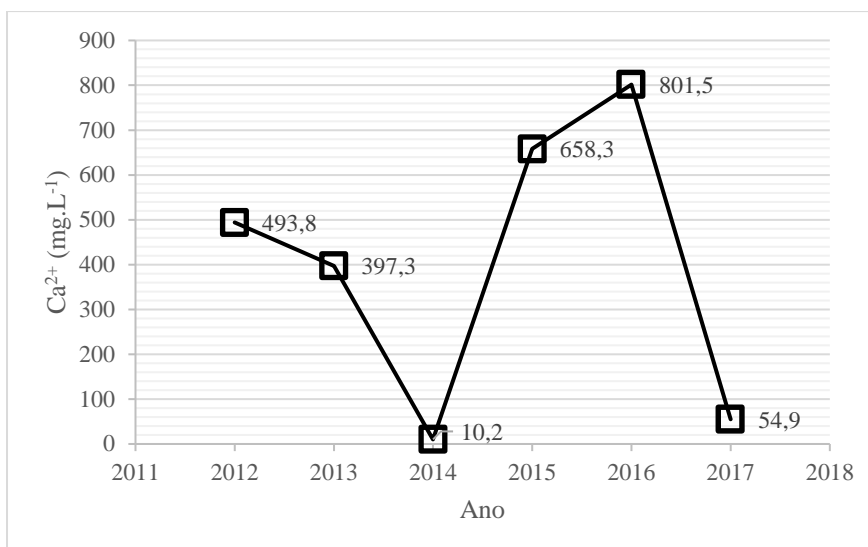
elevadas concentrações de  $K^+$  e no segundo caso o menor valor pode ser decorrente da diluição ocasionada pela mistura com outras águas residuárias da usina nos tanques de armazenamento.

Em comparação com a fórmula do cálculo de dosagem de vinhaça (Eq. 1), 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. Porém, conforme consta na Tabela 9, os cálculos das dosagens da usina utilizaram o valor de  $3 kgK_2O.m^{-3}$  para as definições finais dos volumes de vinhaça nas glebas.

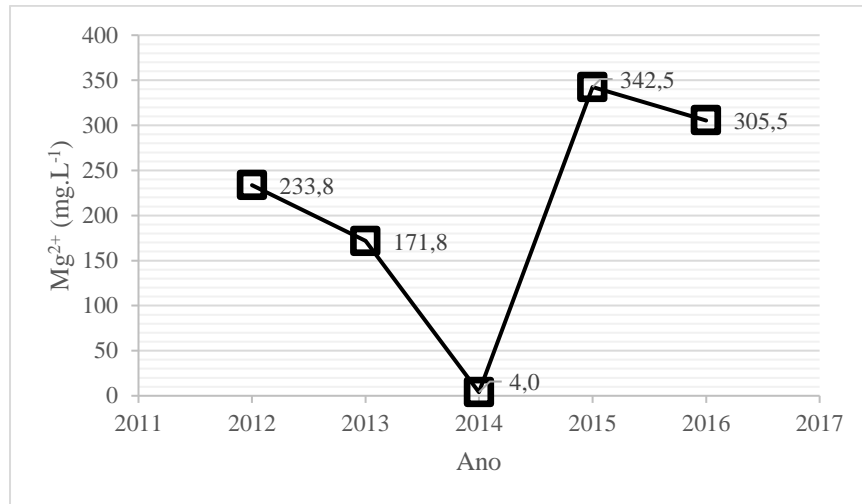


**Figura 7:** Valores das concentrações de  $K^+$  das vinhaças

A terceira avaliação se refere aos valores das concentrações de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  mostrados nas Figuras 8 e 9.



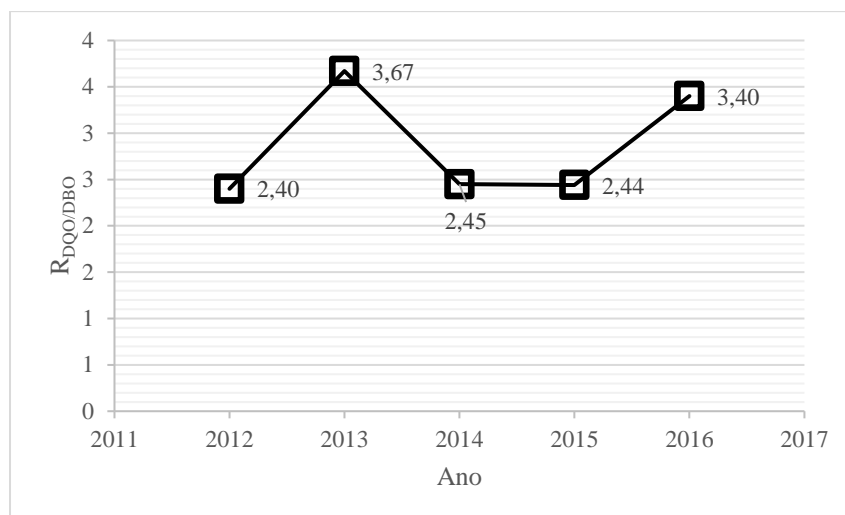
**Figura 8:** Valores das concentrações de  $Ca^{2+}$  das vinhaças



**Figura 9:** Valores das concentrações de Mg<sup>2+</sup> das vinhaças

As menores concentrações de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> foram obtidas na amostra de 2014 e as maiores foram obtidas nos anos de 2015 e 2016. Os valores médios de 402,7 mg.L<sup>-1</sup> para o Ca<sup>2+</sup> e de 211,5 mg.L<sup>-1</sup> para o Mg<sup>2+</sup> estão próximos dos valores obtidos por Fuess (2013) que foram 428,4 mg.L<sup>-1</sup> e 235,4 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente, enquanto Lyra et al. (2003) também obtiveram a variação destes valores entre 560,0 e 640,0 mg.L<sup>-1</sup> para o Ca<sup>2+</sup> e entre 280,0 e 340,0 mg.L<sup>-1</sup> para o Mg<sup>2+</sup>.

A quarta avaliação se refere aos valores da relação DQO/DBO ( $R_{DQO/DBO}$ ) mostrados na Figura 10 que comprovam a aplicabilidade de processos biológicos, indicando a presença de matéria orgânica passível de degradação que será disponibilizada para o solo fertirrigado. A relação média obtida de 2,90 indica uma relação intermediária conforme as faixas apresentadas na Tabela 12 e comprova os valores de referência apresentados nas Tabelas 1 e 2.



**Figura 10:** Valores da relação DQO/DBO das vinhaças

**Tabela 12:** Relação DQO/DBO para águas residuárias e perspectiva de aplicação de processos biológicos ao seu tratamento

Relação DQO/DBO ( $R_{DQO/DBO}$ )	Características da água residuária
Baixa ( $R_{DQO/DBO} < 2,5$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fração biodegradável é elevada;</li> <li>• Indicação para tratamento biológico.</li> </ul>
Intermediária ( $2,5 < R_{DQO/DBO} < 3,5$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fração biodegradável não é elevada;</li> <li>• Estudos de tratabilidade para verificar viabilidade do tratamento biológico.</li> </ul>
Elevada ( $R_{DQO/DBO} > 3,5$ )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fração inerte (não biodegradável) é elevada;</li> <li>• Possível indicação para tratamento físico-químico.</li> </ul>

**Fonte:** adaptado de Fuess, 2013

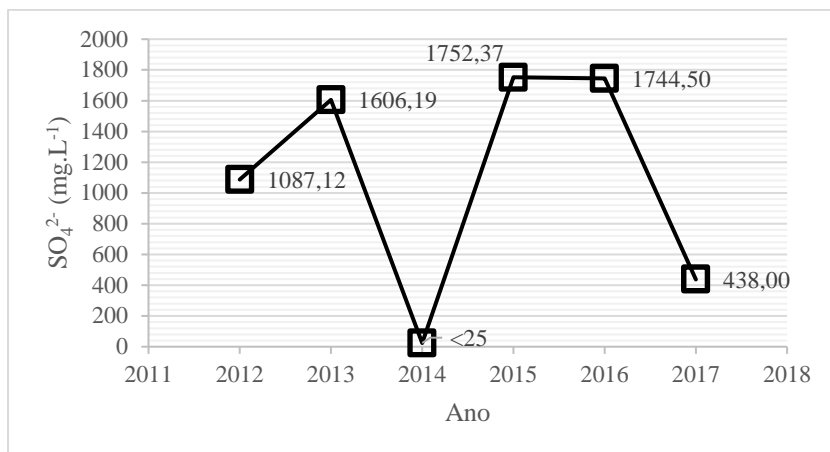
Fuess (2013) apresentou uma relação menor de valor 1,71 que está na faixa baixa, apesar dos valores médios de DBO e DQO serem maiores separadamente, já que coletou amostras na saída da coluna de destilação. Nos tanques de armazenamento a matéria orgânica sofre degradação o que implica valores menores de DBO e DQO (BALDACIN; PINTO, 2015).

Essa matéria orgânica existente na vinhaça impossibilita o lançamento em corpos hídricos conforme a NBR 10.004 (BRASIL, 2014). Também juntamente com o enxofre disponível decorrente da adsorção do sulfato e formação de mercaptanas (álcool de enxofre) gera o mau cheiro, inclusive com a atração de moscas (ELIA NETO, 2016).

A quinta avaliação se refere aos valores das concentrações do íon sulfato mostrados na Figura 11. O valor médio da concentração do íon sulfato de  $1108,7 \text{ mg.L}^{-1}$  foi elevado, devido à adição do ácido sulfúrico no processo de recuperação da levedura, antes de voltar ao processo de fermentação, para a correção do pH até normalmente 2,5 ou mais baixo para evitar contaminação bacteriana (OLIVEIRA, 2010) e também à adição do ácido sulfúrico às dornas no próprio processo de fermentação para impedir a floculação das leveduras (CHERUBIN, 2003). É importante salientar que o pH do solo é importante para a adsorção do sulfato, já que aumentando-se o pH é diminuída a adsorção no solo (CATANI et al., 1971).

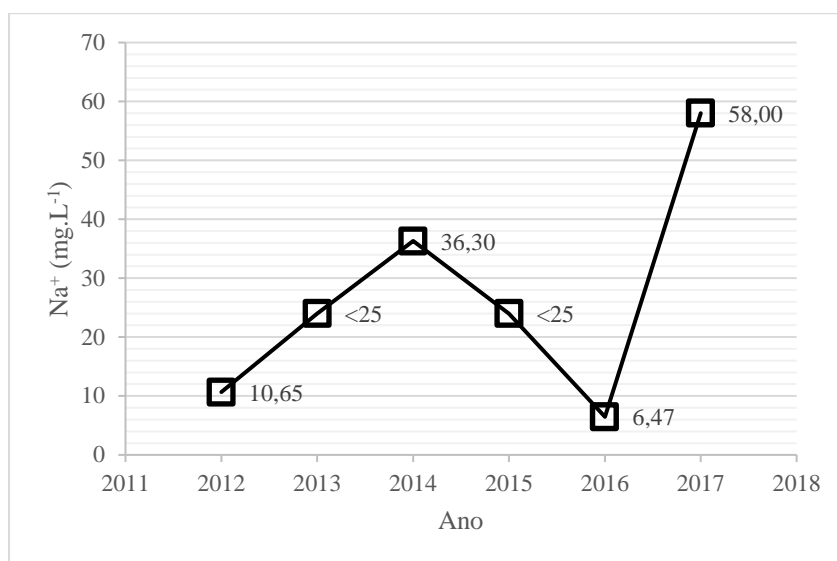
Fuess (2013) apresentou o valor médio da concentração do íon sulfato de  $3701 \text{ mg.L}^{-1}$  ainda mais elevado, já que a amostragem foi feita na saída da coluna de destilação.





**Figura 11:** Valores das concentrações de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> das vinhaças

A sexta avaliação se refere aos valores das concentrações de Na<sup>+</sup> que são mostrados na Figura 12. Este parâmetro define a salinidade da amostra.



**Figura 12:** Valores das concentrações de Na<sup>+</sup> das vinhaças

Apesar de várias concentrações de Na<sup>+</sup> não terem sido superiores a 25 mg.L<sup>-1</sup>, a amostra de vinhaça de 2017 teve uma concentração elevada de 58 mg.L<sup>-1</sup>. A amostra de 2014 também teve uma concentração mais alta correspondente a 36,30 mg.L<sup>-1</sup>. O valor médio obtido de 26,57 mg.L<sup>-1</sup> ficou acima do valor médio obtido por Fuess (2013) que foi de 10,64 mg.L<sup>-1</sup>. As amostras de vinhaça com concentrações de Na<sup>+</sup> menores que 25 mg.L<sup>-1</sup>, 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.

As concentrações elevadas podem representar um risco de salinização do solo por

sodificação, risco este que poderá ser analisado através do cálculo da relação de adsorção de sódio (RAS) através da equação (Eq. 8) a seguir (CORDEIRO, 2001):

$$\text{RAS} = \text{Na}/[(\text{Ca} + \text{Mg})/2]^{1/2} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

Na, Ca e Mg correspondem às concentrações de sódio, cálcio e magnésio na vinhaça e em águas residuárias utilizadas na irrigação, em mEq.L<sup>-1</sup>.

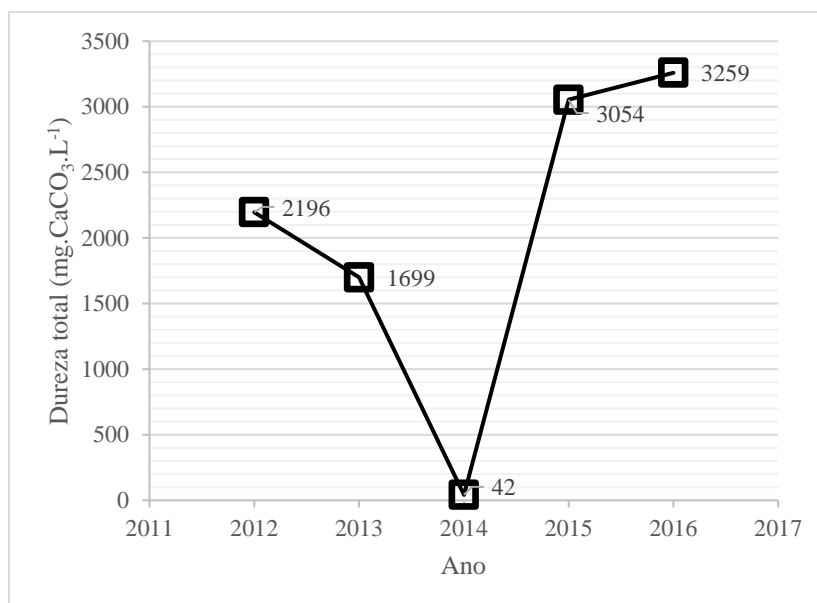
Os valores das RAS de 2012 a 2016 foram calculados a partir das concentrações em mg.L<sup>-1</sup> de Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> das vinhaças (Tabela 6) e convertidas em mEq.L<sup>-1</sup> (Tabela 13). Os valores estão entre 0,05 e 2,47, correspondentes à amostra de vinhaça analisada 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, valor considerado como de baixo risco de salinização por sodificação (CORDEIRO, 2001).

**Tabela 13:** Relação de adsorção de sódio calculada para os resultados de vinhaça de 2012 a 2017

Parâmetros	Na		Ca		Mg		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	24	1,06	397,3	19,87	171,775	14,09	0,26
2014	36,3	1,60	10,19	0,51	3,96	0,32	2,47
2015	24	1,06	658,25	32,91	342,5	28,09	0,19
2016	6,465	0,28	801,5	40,08	305,5	25,05	0,05
2017	58	2,55	54,9	2,75	ND	ND	NC

ND – não disponível  
NC – não calculado

A sétima avaliação se refere aos valores da dureza total que são mostrados na Figura 13. Quanto aos valores anuais verifica-se uma correlação significativa com o K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, pois os valores de dureza total aumentam em função, principalmente, pela presença de cátions bivalentes (SAWYER; McCARTHY, 1978). Assim, quanto maior a concentração de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>, maior foi o valor da dureza total.



**Figura 13:** Valores da dureza total das vinhaças

A dureza se associa à alcalinidade da amostra e se estiver com valor acima de 300 mgCaCO<sub>3</sub>.L<sup>-1</sup> é classificada como “muito dura” conforme indicadores da Tabela 14 (BRASIL, 2014a). Como as amostras dos anos de 2012, 2013, 2015 e 2016 tiveram valores maiores que este limite, pode ter ocorrido a precipitação do cálcio no meio promovendo a obstrução dos poros (WHO, 2006). WHO (2006) também aponta que como o pH da vinhaça é comumente ácido, quando é combinado com uma adequada alcalinidade ou adequada dureza, o equilíbrio ácido/base no solo não é afetado, mas que se a vinhaça é aplicada em solos com baixa alcalinidade por longos períodos pode ocorrer a alteração permanente do pH do solo afetando a mobilidade dos metais pesados no solo e desencadeando eventuais impactos ambientais no meio.

**Tabela 14:** Classificação para a dureza total da água bruta

Dureza total (mgCaCO <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup> )	Classificação
< 50	Branda
De 50 a 150	Moderada
De 150 a 300	Dura
> 300	Muito dura

**Fonte:** adaptado de BRASIL, 2014a

A oitava avaliação se refere aos valores do nitrogênio amoniacal (NH<sub>3</sub>) e do nitrogênio total (N<sub>Kjeldahl</sub>) já que Fuess (2013) apresentou valores médios elevados para ambos, ou seja, 87,5 mg.L<sup>-1</sup> e 1218,0 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente, comparando-se com os valores médios de 8,7 mg.L<sup>-1</sup> e 129,4 mg.L<sup>-1</sup>. As vinhaças que ficam armazenadas nos tanques devem ter sofrido

diluição pelas águas residuárias ou pluviais, implicando valores de concentrações menores de nitrogênio.

## 5.2 Avaliações dos parâmetros químicos para a caracterização da fertilidade dos solos

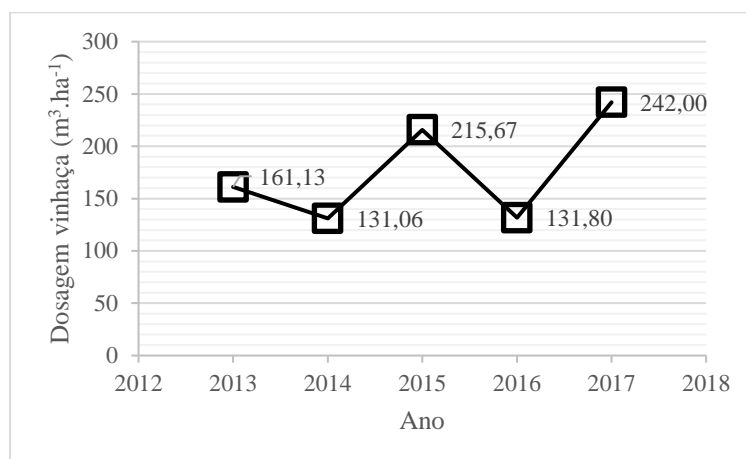
Em relação aos volumes de vinhaças aplicadas nas glebas da fazenda que constam da Tabela 9, a gleba 5 teve dosagens em cinco anos seguidos (2013, 2014, 2015, 2016 e 2017), a gleba 23 teve dosagens em quatro anos seguidos (2012, 2013, 2014 e 2015), a gleba 15 teve dosagens em três anos (2012, 2014 e 2017), a gleba 22 teve dosagens também em três anos (2012, 2013 e 2017) e a gleba 9 teve dosagens em dois anos (2015 e 2016) permitindo a análise temporal nessas glebas dos parâmetros químicos para a caracterização da fertilidade apresentados na Tabela 7 que são os seguintes: potássio ( $K^+$ ), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%) e pH.

A primeira avaliação foi a análise temporal da gleba 5 para os anos de 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017, sendo apresentada a Tabela 15 que resume todos os dados.

**Tabela 15:** Resumo dos dados para a gleba 5

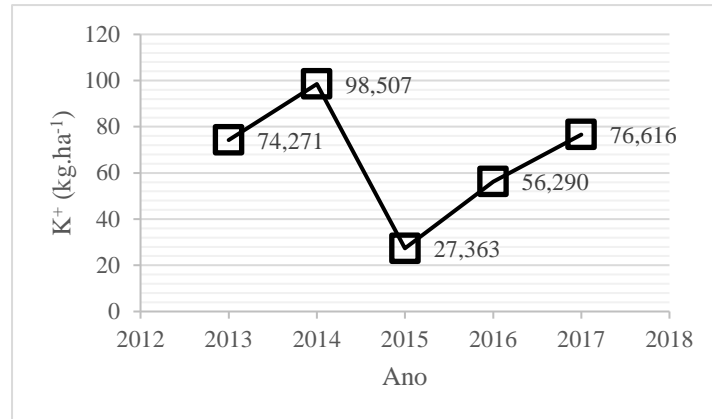
Ano	Dosagem Vinhaça ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ )	K+ ( $kg \cdot ha^{-1}$ )	CTC ( $mmol_c \cdot dm^{-3}$ )	V (%)	m (%)	pH
2013	161,13	74,271	34,94	71,38	0,82	5,50
2014	131,06	98,507	36,92	56,66	2,74	5,40
2015	215,67	27,363	31,68	43,18	3,53	5,00
2016	131,80	56,290	25,64	33,70	6,39	4,80
2017	242,00	76,616	48,90	34,56	2,87	5,00
Média	176,33	66,609	35,62	47,90	3,27	5,14

A Figura 14 apresenta as dosagens das vinhaças na gleba 5.



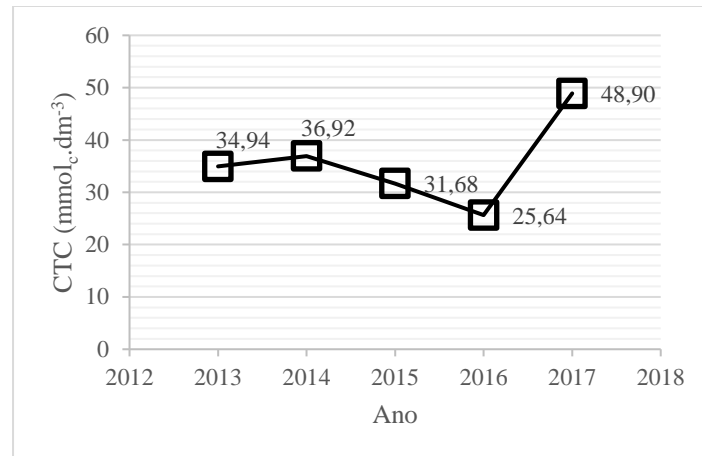
**Figura 14:** Dosagens das vinhaças na gleba 5

Na Figura 15 são mostradas as concentrações de potássio da gleba 5.



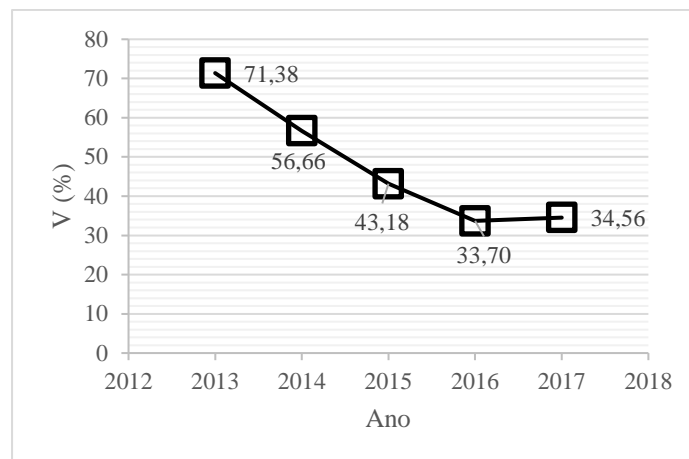
**Figura 15:** Concentração de potássio no solo da gleba 5

Na Figura 16 são mostrados os valores da CTC da gleba 5.



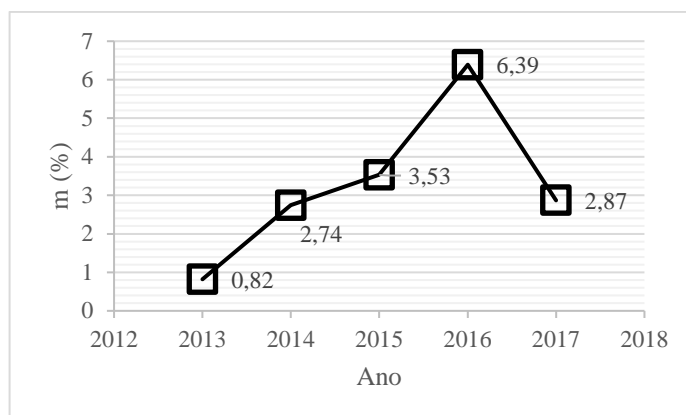
**Figura 16:** Capacidade de Troca Catiônica do solo da gleba 5

Na Figura 17 são mostrados os valores da saturação por bases (V%) da gleba 5.



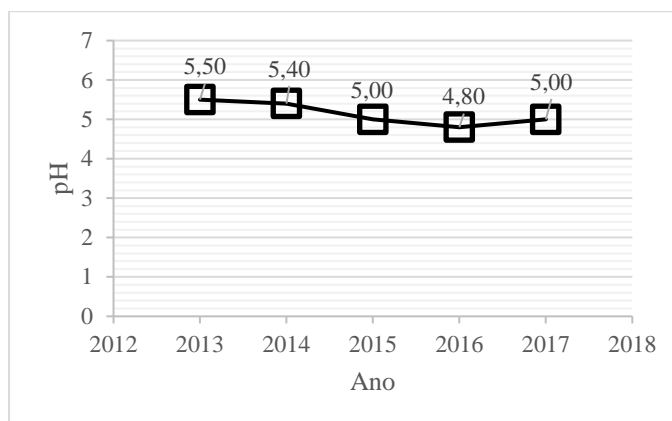
**Figura 17:** Saturação por bases no solo da gleba 5

Na Figura 18 são mostrados os valores da saturação por alumínio (m%) da gleba 5.



**Figura 18:** Saturação por alumínio no solo da gleba 5

Na Figura 19 são mostrados os valores do pH da gleba 5.



**Figura 19:** pH do solo da gleba 5

Avaliando-se primeiramente os valores de dosagem, do ano de 2013 para 2014 houve um aumento da concentração de  $K^+$  no solo implicando a queda do valor da dosagem de vinhaça para o ano seguinte (2014), apesar do pequeno aumento na CTC. Do ano de 2014 para 2015 houve uma diminuição da concentração de  $K^+$  no solo implicando um aumento do valor de dosagem para o ano seguinte (2015), apesar da pequena queda na CTC. Entre 2015 e 2016 o valor da concentração de  $K^+$  volta a subir implicando a queda do valor de dosagem prevista para 2016 já que também houve queda no valor da CTC. Entre 2016 e 2017 o valor da concentração de  $K^+$  volta a subir com aumento também na CTC, o que implicou aumento para o valor de dosagem prevista para 2017.

Na avaliação de V% verifica-se uma contínua queda de 2013 até 2016 com um aumento contínuo também de m%, ou seja, houve aumento da acidez do solo, conforme se comprova

pelos valores do pH que decresceram, e aumento da concentração de  $Al^{3+}$  no solo provavelmente diminuindo a fertilidade. Avaliando-se o valor referencial de V% para a cana-de-açúcar que é 60% (SERRANA, 2001) em 2013 o valor é de 71,38 caindo em 2014 para 56,66, em 2015 para 43,18 e em 2016 para 33,70 confirmando a necessidade crescente da aplicação de corretivo de acidez do solo. Verifica-se aqui a evolução do solo de eutrófico para distrófico neste período com  $V < 50\%$  (BRITO, 2013; RONQUIM 2010). Já para o ano de 2017 houve uma queda no valor de m% com pouca variação no valor de V% que está bem abaixo do valor referencial para a cana-de-açúcar.

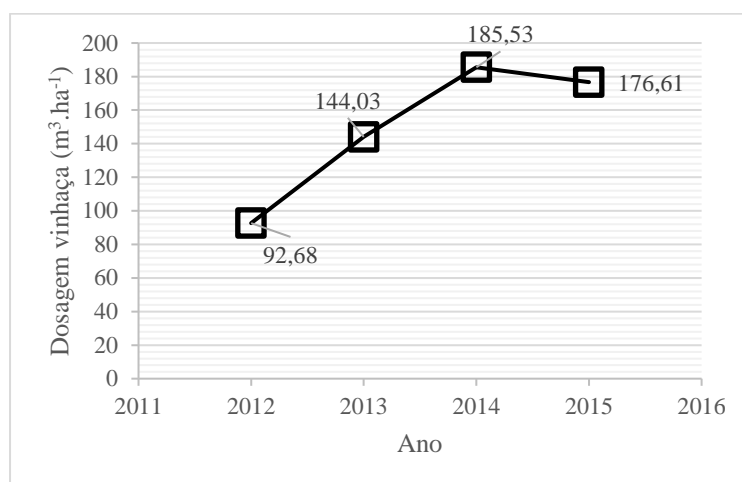
É relevante notar que em 2014, apesar do elevado valor da concentração de potássio, o valor elevado da saturação por alumínio fez cair o valor da saturação por bases (fertilidade), ou seja, o aumento da CTC foi devido ao aumento do  $H+Al$  e não dos cátions de base.

A segunda avaliação foi a análise temporal da gleba 23 para os anos de 2012, 2013, 2014 e 2015, sendo apresentada a Tabela 16 que resume todos os dados.

**Tabela 16:** Resumo dos dados para a gleba 23

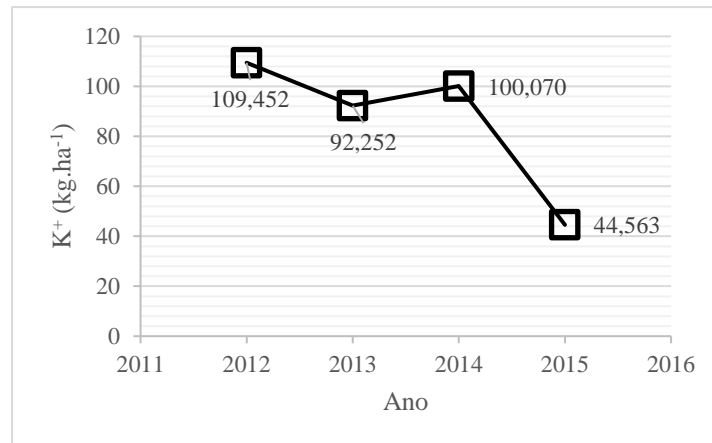
Ano	Dosagem Vinhaça ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ )	K+ ( $kg \cdot ha^{-1}$ )	CTC ( $mmol \cdot dm^{-3}$ )	V (%)	m (%)	pH
2012	92,68	109,452	32,97	60,57	0,00	5,30
2013	144,03	92,252	36,80	64,67	0,69	5,80
2014	185,53	100,070	45,45	64,80	0,94	5,60
2015	176,61	44,563	29,82	32,93	10,32	4,60
Média	149,71	86,584	36,26	55,74	2,99	5,33

A Figura 20 apresenta as dosagens das vinhaças na gleba 23.



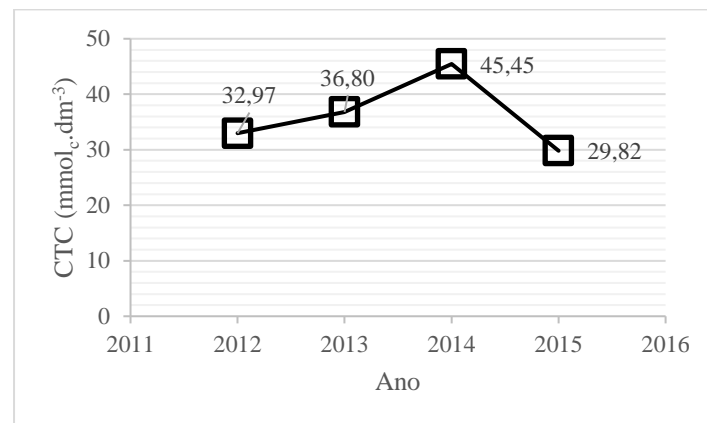
**Figura 20:** Dosagens das vinhaças na gleba 23

Na Figura 21 são mostradas as concentrações de  $K^+$  da gleba 23.



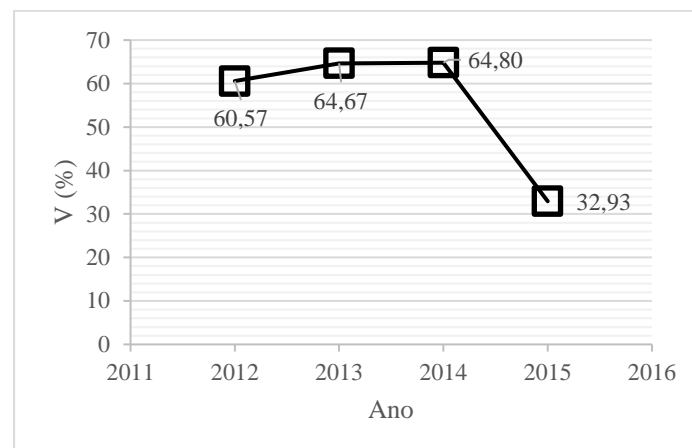
**Figura 21:** Concentração de potássio no solo da gleba 23

Na Figura 22 são mostrados os valores da CTC da gleba 23.



**Figura 22:** Capacidade de Troca Catiônica do solo da gleba 23

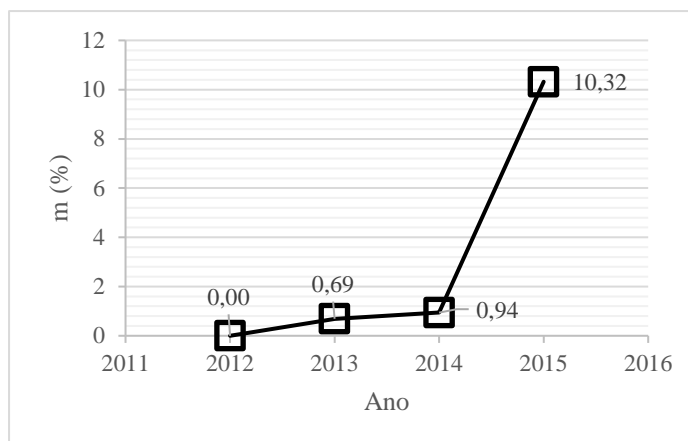
Na Figura 23 são mostrados os valores da saturação por bases (V%) da gleba 23.



**Figura 23:** Saturação por bases no solo da gleba 23

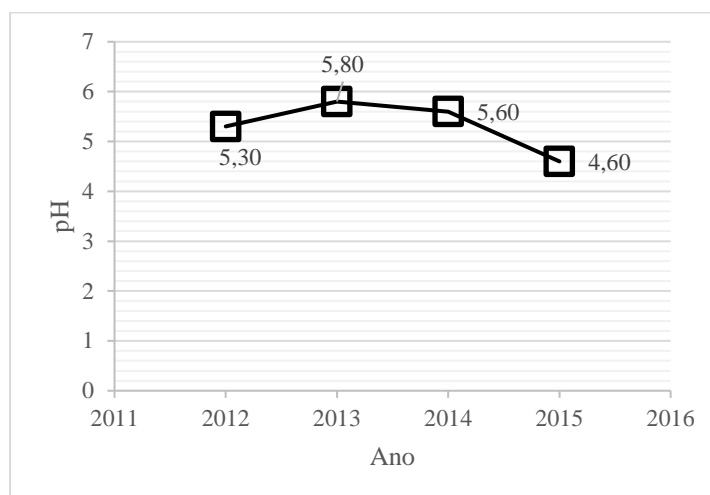


Na Figura 24 são mostrados os valores da saturação por alumínio (m%) da gleba 23.



**Figura 24:** Saturação por alumínio no solo da gleba 23

Na Figura 25 são mostrados os valores do pH da gleba 23.



**Figura 25:** pH do solo da gleba 23

Avaliando-se primeiramente os valores de dosagem, do ano de 2012 para 2013 houve uma diminuição da concentração de  $K^+$  no solo implicando um valor da dosagem de vinhaça para o ano seguinte (2013) maior já que também houve aumento do valor da CTC. Do ano de 2013 para 2014 houve um aumento da concentração de  $K^+$  no solo, mas como houve aumento também no valor da CTC, a dosagem apresentou um valor elevado para o ano seguinte (2014).

Apesar da dosagem elevada em 2014, em 2015 o valor da concentração de  $K^+$  volta a cair, ou seja, ocorre uma inversão pois a saturação por bases (fertilidade) estava elevada implicando um consumo elevado dos macronutrientes entre 2014 e 2015, que é confirmado pela queda também na CTC. A queda na CTC implicou também queda do valor de dosagem prevista para 2015.

Na avaliação de V% verificam-se valores próximos entre 2012 até 2014, próximos também ao valor referencial de 60% para a cana-de-açúcar, com valores de CTC crescentes. Nota-se neste período a inexistência do  $Al^{3+}$  e o solo permanece com fertilidade ou, eutrófico, ou seja, com valores acima de 50%.

Já entre 2014 e 2015 m% aumenta de 0,94 para 10,32% implicando uma queda acentuada no valor de V%, de 64,80 para 32,93%, tornando o solo distrófico, com aumento da acidez do solo, conforme se comprova pelos valores do pH que decresceram de 5,6 para 4,6. Aqui se verifica a necessidade da aplicação de corretivo de acidez do solo.

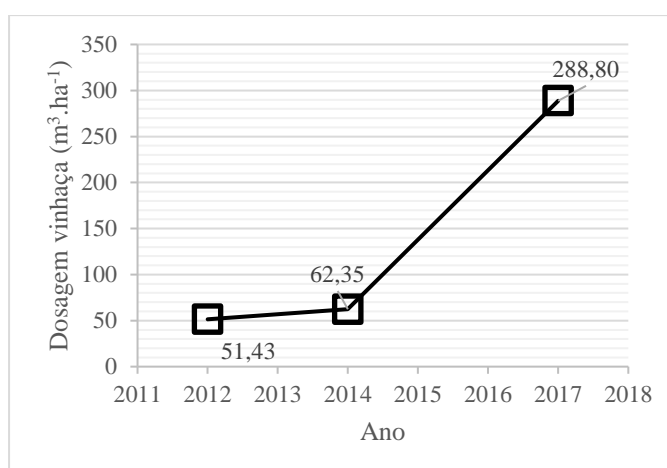
Em relação ao pH entre 2012 e 2013 houve elevação do valor apesar do aumento da saturação por alumínio provavelmente devido à MO e suas reações biológicas de natureza redutora que elevam o pH (ROSSETTO, 1987; MATTIAZZO; GLORIA, 1987).

A terceira avaliação foi a análise temporal da gleba 15 para os anos de 2012, 2014 e 2017, sendo apresentada a Tabela 17 que resume todos os dados.

**Tabela 17:** Resumo dos dados para a gleba 15

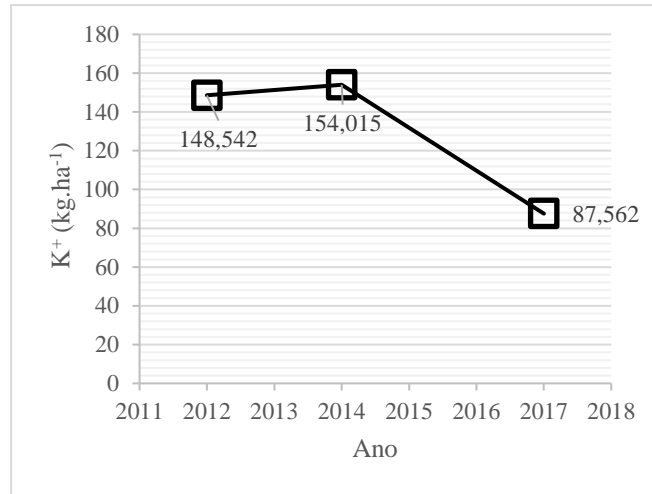
Ano	Dosagem Vinhaça ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ )	K+ ( $kg \cdot ha^{-1}$ )	CTC ( $mmol \cdot dm^{-3}$ )	V (%)	m (%)	pH
2012	51,43	148,542	36,36	53,25	0,60	5,10
2014	62,35	154,015	39,51	44,32	1,52	5,00
2017	288,80	87,562	58,38	55,46	0,43	5,50
Média	134,19	130,040	44,75	51,01	0,85	5,20

A Figura 26 apresenta as dosagens das vinhaças na gleba 15.



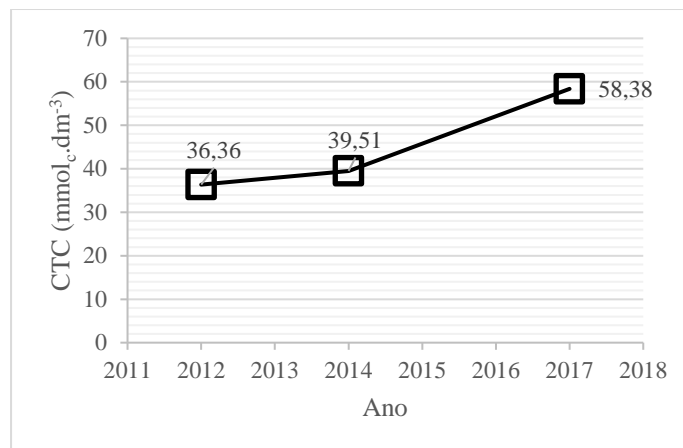
**Figura 26:** Dosagens das vinhaças na gleba 15

Na Figura 27 são mostradas as concentrações de  $K^+$  da gleba 15.



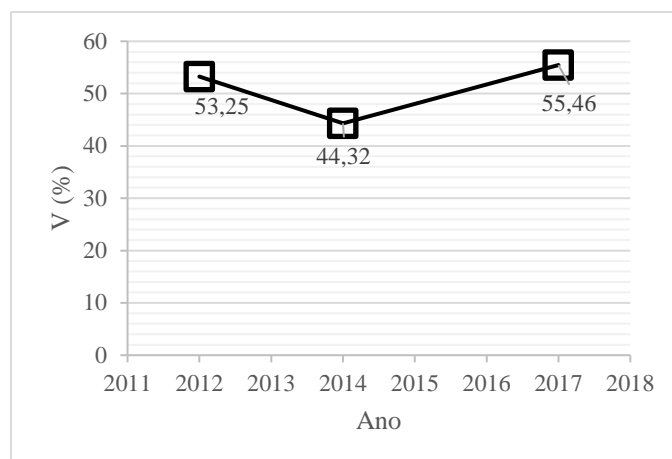
**Figura 27:** Concentração de potássio no solo da gleba 15

Na Figura 28 são mostrados os valores da CTC da gleba 15.



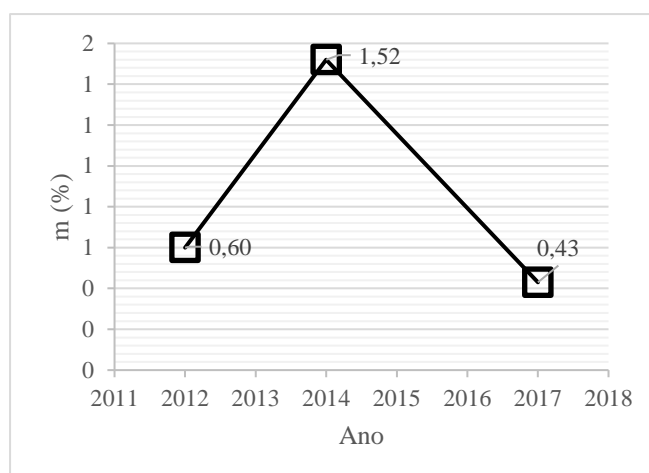
**Figura 28:** Capacidade de Troca Catiônica do solo da gleba 15

Na Figura 29 são mostrados os valores da saturação por bases (V%) da gleba 15.



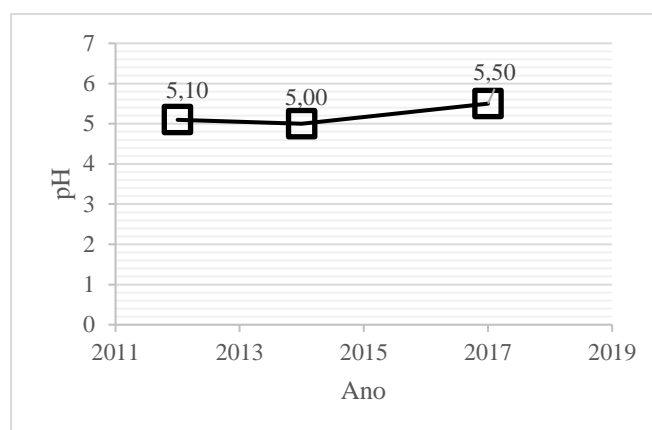
**Figura 29:** Saturação por bases no solo da gleba 15

Na Figura 30 são mostrados os valores da saturação por alumínio (m%) da gleba 15.



**Figura 30:** Saturação por alumínio no solo da gleba 15

Na Figura 31 são mostrados os valores do pH da gleba 15.



**Figura 31:** pH do solo da gleba 15

O valor pequeno de dosagem do ano de 2012 ocorreu dado à alta concentração de  $K^+$  no solo que foi maior que 5% da CTC, valor limitante pela norma vigente. No ano de 2014 a alta concentração de  $K^+$  permanece também próxima ao valor de 5% da CTC, o que implicou um valor pequeno de dosagem neste ano. No ano de 2017 o valor de dosagem já retomou um valor alto pois a concentração de  $K^+$  caiu com um aumento significativo na CTC, ou seja, com CTC elevada e concentração de  $K^+$  baixa o cálculo da dosagem fornecerá um valor alto.

Na avaliação de V% verificam-se valores próximos em 2012, 2014 e 2017 ao valor referencial de 60% para a cana-de-açúcar, com valores de CTC crescentes. Nota-se neste período baixas concentrações do  $Al^{3+}$  e o solo permanece com fertilidade ou, eutrófico.

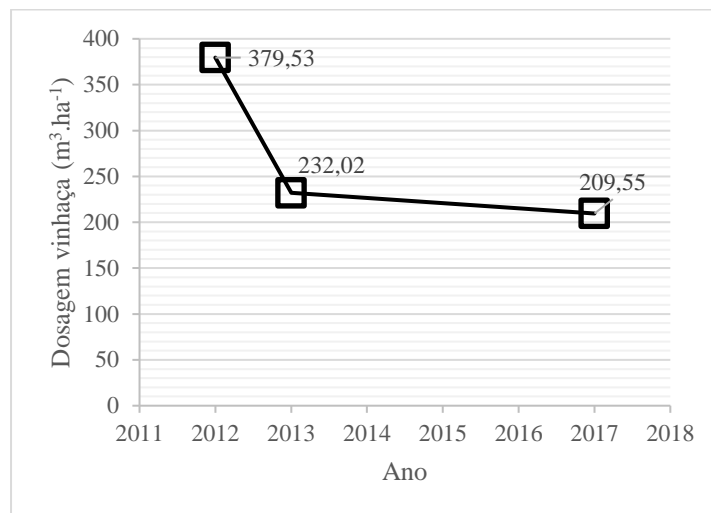
O pH em 2014 caiu devido ao aumento na saturação por alumínio e em 2017 ocorreu a situação inversa.

A quarta avaliação foi a análise temporal da gleba 22 para os anos de 2012, 2013 e 2017, sendo apresentada a Tabela 18 que resume todos os dados.

**Tabela 18:** Resumo dos dados para a gleba 22

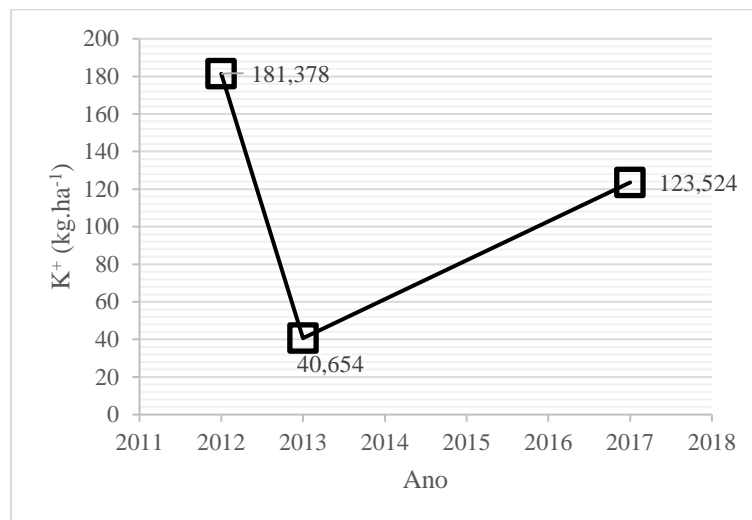
Ano	Dosagem Vinhaça ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ )	K+ ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ )	CTC ( $\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ )	V (%)	m (%)	pH
2012	379,53	181,378	97,34	81,51	0,05	5,70
2013	232,02	40,654	37,70	54,93	0,20	5,20
2017	209,55	123,524	55,69	35,36	4,09	4,90
Média	273,70	115,185	63,58	57,27	1,45	5,27

A Figura 32 apresenta as dosagens das vinhaças na gleba 22.



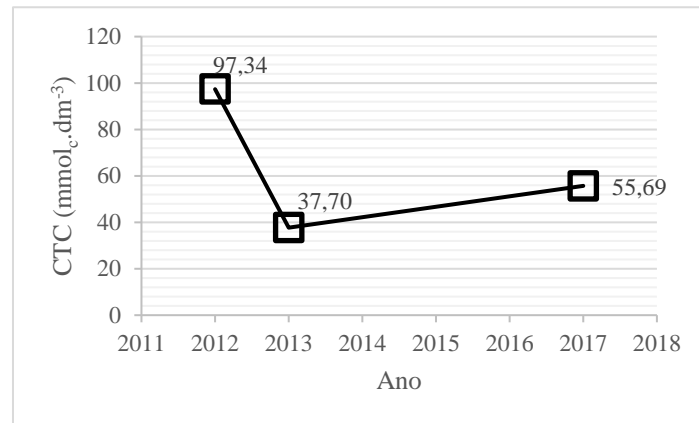
**Figura 32:** Dosagens das vinhaças na gleba 22

Na Figura 33 são mostradas as concentrações de K<sup>+</sup> da gleba 22.



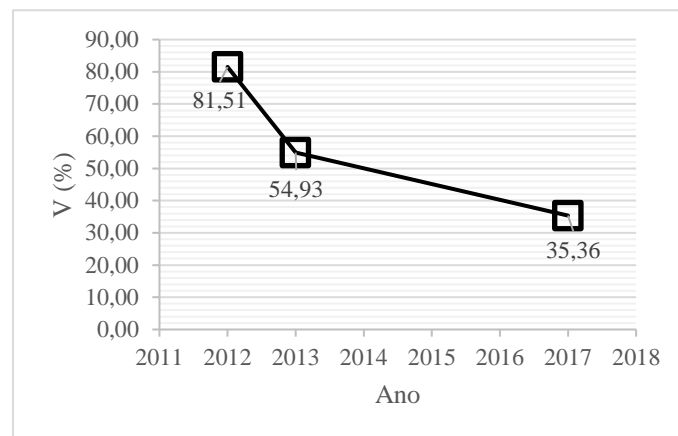
**Figura 33:** Concentração de potássio no solo da gleba 22

Na Figura 34 são mostrados os valores da CTC da gleba 22.



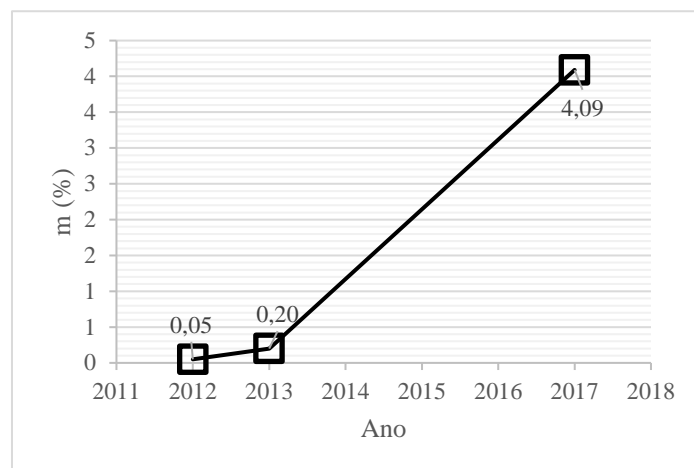
**Figura 34:** Capacidade de Troca Catiônica do solo da gleba 22

Na Figura 35 são mostrados os valores da saturação por bases (V%) da gleba 22.



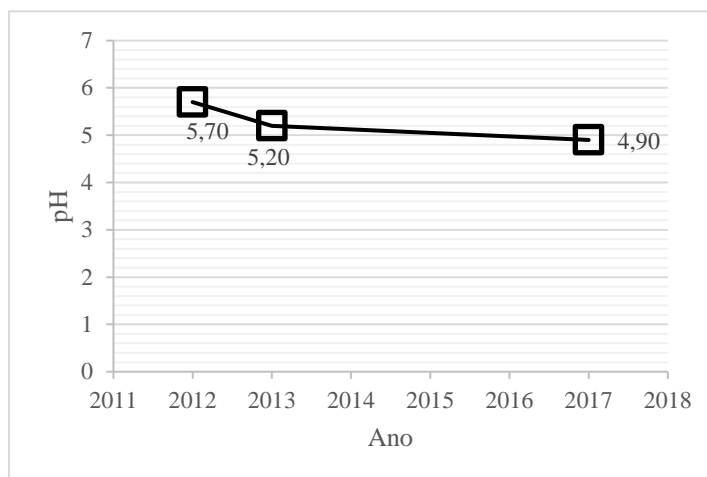
**Figura 35:** Saturação por bases no solo da gleba 22

Na Figura 36 são mostrados os valores da saturação por alumínio (m%) da gleba 22.



**Figura 36:** Saturação por alumínio no solo da gleba 22

Na Figura 37 são mostrados os valores do pH da gleba 22.



**Figura 37:** pH do solo da gleba 22

Conforme já discutido anteriormente, o valor alto de dosagem do ano de 2012 ocorreu dado à alta CTC embora a concentração de  $K^+$  também estivesse alta. No ano de 2013 o valor de dosagem caiu, apesar da queda na concentração de  $K^+$ , devido à queda no valor da CTC. No ano de 2017 o valor de dosagem caiu já que houve um aumento da concentração de  $K^+$  apesar do aumento da CTC. As altas dosagens disponibilizaram também muita MO ao solo.

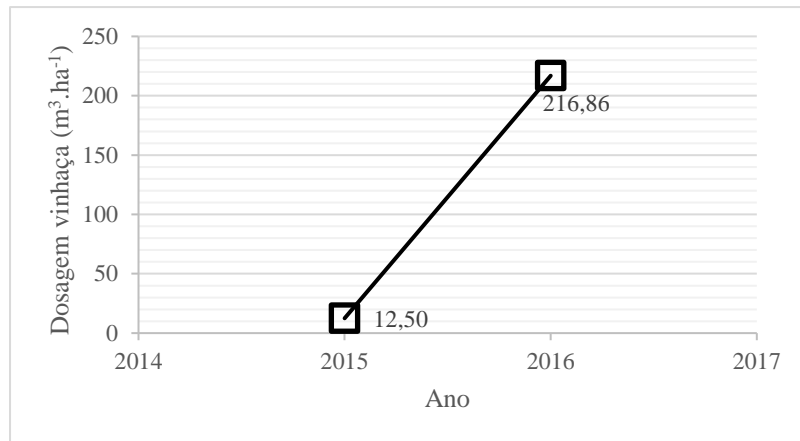
Na avaliação de V% verifica-se um valor alto no ano de 2012, com queda no ano de 2013 e nova queda no ano de 2017, com aumento na concentração do  $Al^{3+}$ . Nota-se neste período diminuição da fertilidade do solo com diminuição do pH, de 5,7 em 2012 para 5,2 em 2013 e 4,9 em 2017. Aqui se verifica a necessidade da aplicação de corretivo de acidez do solo.

A quinta avaliação foi a análise temporal da gleba 9 para os anos de 2015 e 2016, sendo apresentada a Tabela 19 que resume todos os dados.

**Tabela 19:** Resumo dos dados para a gleba 9

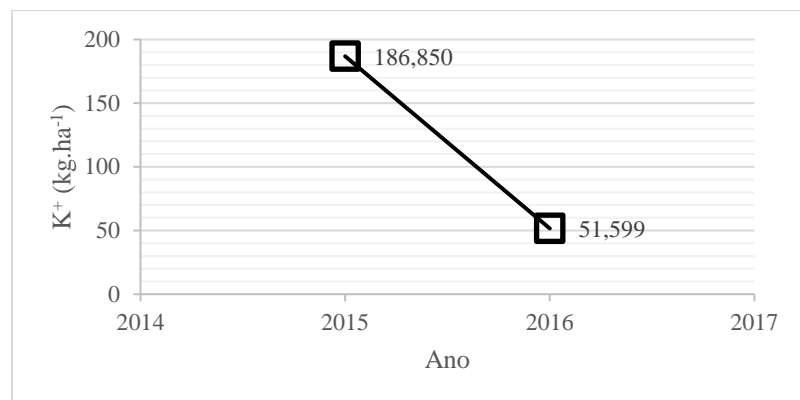
Ano	Dosagem Vinhaça ( $m^3 \cdot ha^{-1}$ )	$K^+$ ( $kg \cdot ha^{-1}$ )	CTC ( $mmol \cdot dm^{-3}$ )	V (%)	m (%)	pH
2015	12,50	186,850	39,92	57,41	0,69	5,30
2016	216,86	51,599	38,07	42,21	3,48	4,70
Média	114,68	119,22	39,00	49,81	2,09	5,00

A Figura 38 apresenta as dosagens das vinhaças na gleba 9.



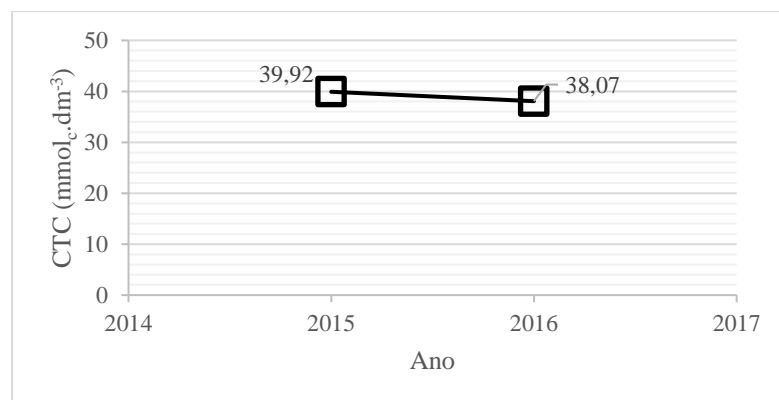
**Figura 38:** Dosagens das vinhaças na gleba 9

Na Figura 39 são mostradas as concentrações de  $K^+$  da gleba 9.



**Figura 39:** Concentração de potássio no solo da gleba 9

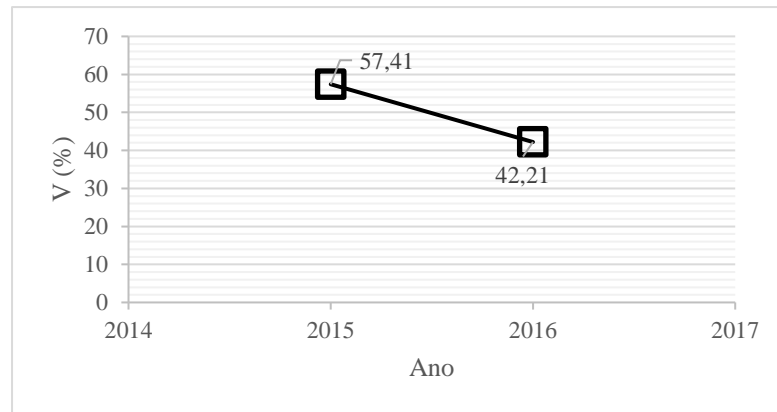
Na Figura 40 são mostrados os valores da CTC da gleba 9.



**Figura 40:** Capacidade de Troca Catiônica do solo da gleba 9

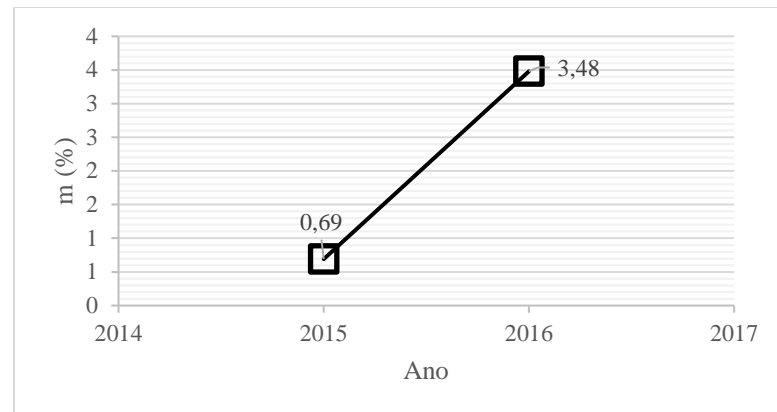


Na Figura 41 são mostrados os valores da saturação por bases (V%) da gleba 9.



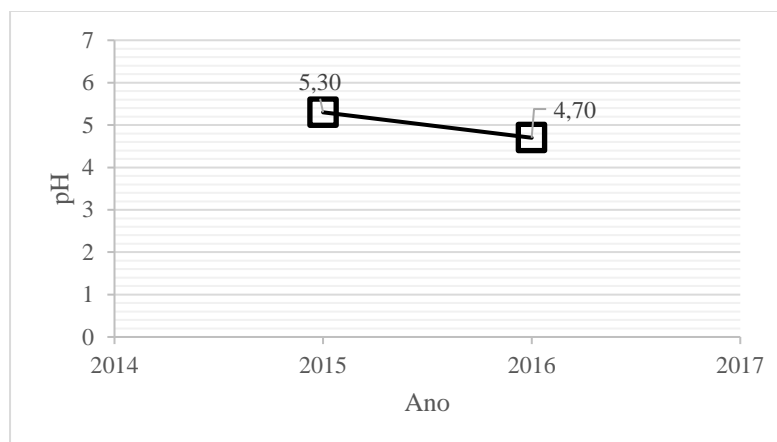
**Figura 41:** Saturação por bases no solo da gleba 9

Na Figura 42 são mostrados os valores da saturação por alumínio (m%) da gleba 9.



**Figura 42:** Saturação por alumínio no solo da gleba 9

Na Figura 43 são mostrados os valores do pH da gleba 9.



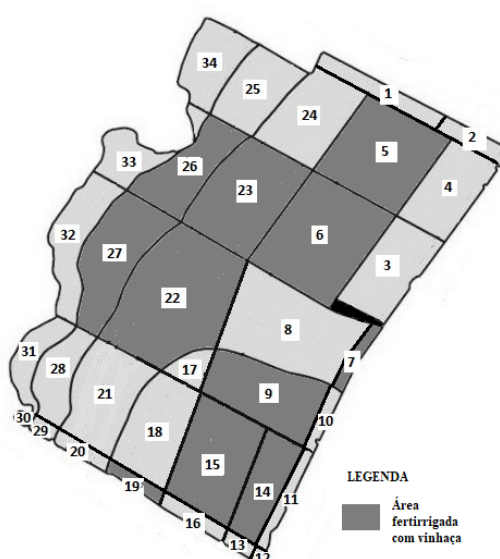
**Figura 43:** pH do solo da gleba 9

Conforme já discutido anteriormente, o valor muito baixo de dosagem do ano de 2015 ocorreu dado à elevada concentração de  $K^+$  no solo que está próxima ao padrão de  $185 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . No ano de 2016 o valor de dosagem para o ano seguinte (2017) cresceu muito, pois houve queda da concentração de  $K^+$ , com a pequena queda no valor da CTC.

Na avaliação de V% verifica-se um valor alto no ano de 2015 e com queda no ano de 2016, com diminuição na concentração do  $Al^{3+}$ , mas com diminuição no pH. Nota-se neste período diminuição da fertilidade do solo com diminuição do pH, de 5,3 em 2015 para 4,7 em 2016, ou seja, o aumento da acidez do solo por íons  $H^+$  fez ocorrer a queda na fertilidade, já que a CTC teve pequena queda com a queda acentuada no potássio e queda no  $Al^{3+}$ . Aqui se verifica a necessidade da aplicação de corretivo de acidez do solo para elevar o pH. Um ponto a ser observado é que o aumento da saturação por alumínio em 2016 implicou a queda do pH do solo.

A sexta avaliação se refere à uma comparação de resultados obtidos nesse trabalho de pesquisa com os resultados obtidos por Galdeano (2019), que analisou as variações das propriedades físico-químicas do solo na fazenda (SJ) na região de Santa Cruz das Palmeiras SP devido à aplicação de vinhaças da mesma usina no mesmo período de 2012 a 2017 onde o tipo de solo predominante é o latossolo vermelho-escuro com altas concentrações de argilominerais, altos teores de óxidos de ferro e óxidos de alumínio e elevadas concentrações de  $Al^{3+}$ . Um resumo desses dados é apresentado na Tabela 20.

O resumo dos dados desse presente trabalho para todas as glebas da fazenda mostradas na Figura 44 e que tiveram no período de 2012 a 2017 aplicações de vinhaça é apresentado na Tabela 21.



**Figura 44:** Glebas fertilizadas com vinhaça na área de estudo (período: 2012 a 2017)

**Tabela 20:** Resumo de dados para a fazenda SJ

Ano	Gleba	Dosagem (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	V (%)	ks (kg.ha <sup>-1</sup> )	CTC (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )
2017	56	343,09	60,59	97,725	71,05
2017	27	271,95	69,27	1362,677	126,93
2016	28	84,38	36,29	139,160	39,24
2016	15	88,19	76,29	395,591	105,45
2015	84	116,39	60,91	405,754	112,57
2015	15	168,31	76,26	311,938	96,89
2014	8	469,33	73,11	151,669	104,13
2014	75	1557,96	23,42	190,759	288,59
2014	38	1019,63	35,55	485,498	277,72
2013	15	21,48	63,93	437,026	105,36
2013	78	635,06	39,07	308,029	170,69
2013	29	141,85	56,59	75,835	32,25
2012	40	354,01	82,31	413,572	152,65
2012	6	368,67	61,13	192,323	84,89
Média		402,88	58,19	354,826	126,32

Fonte: adaptado de GALDEANO, 2019

**Tabela 21:** Resumo de dados da fazenda da área de estudo

Ano	Gleba	Dosagem (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	V (%)	ks (kg.ha <sup>-1</sup> )	CTC (mmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )
2017	15	288,80	55,46	87,562	58,38
2017	19	251,99	43,57	48,472	42,53
2017	22	209,55	35,36	123,524	55,69
2017	26	226,40	44,24	86,780	48,42
2017	5	242,00	34,56	76,616	48,90
2016	5	131,80	33,70	56,290	25,64
2016	9	216,86	42,21	51,599	38,07
2015	9	12,50	57,41	186,850	39,92
2015	23	176,61	32,93	44,563	29,82
2015	5	215,67	43,18	27,363	31,68
2014	23	185,53	64,80	100,070	45,45
2014	5	131,06	56,66	98,507	36,92
2014	7	207,56	34,24	75,053	42,58
2014	27	272,20	75,86	125,088	65,74
2014	15	62,35	44,32	154,015	39,51
2013	14	204,25	17,45	29,708	30,45
2013	22	232,02	54,93	40,654	37,70
2013	23	144,03	64,67	92,252	36,80
2013	5	161,13	71,38	74,271	34,94
2012	6	107,28	66,24	121,961	38,51
2012	23	92,68	60,57	109,452	32,97
2012	22	379,53	81,51	181,378	97,34
2012	15	51,43	53,25	148,542	36,36
Média		182,75	50,80	93,068	43,23

Comparando-se os valores entre os estudos: o valor médio de 402,88 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> para as dosagens de vinhaças foi bem superior ao valor médio de 182,75 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>; a concentração média do potássio no solo de 354,826 kg.ha<sup>-1</sup> foi mais elevada que a concentração média do potássio de 93,068 kg.ha<sup>-1</sup>; a CTC média de 126,32 mmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup> foi maior que a CTC média de 43,23 mmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup> e o valor médio da saturação por bases de 58,19 % teve valor próximo ao valor

médio da saturação por bases de 50,80 %. Assim fica evidenciado que as altas dosagens de vinhaça disponibilizam maiores concentrações de potássio, porém não se evidencia o aumento da fertilidade, que depende de outras características do solo, nível de acidez, saturação por alumínio, aspectos físicos do solo definidos pela geomorfologia e geologia da área estudada e as possíveis reações e alterações dos minerais presentes no perfil de solo (GALDEANO, 2019).

A sétima avaliação se refere aos dados obtidos por Zolin et al. (2011) que fez um estudo em uma área agrícola na região noroeste do Estado do Paraná onde o tipo de solo é o latossolo que recebeu a fertirrigação com vinhaça com um valor fixo de  $150 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  durante 1, 2, 3, 4, 10 e 20 anos. Os resultados obtidos neste estudo confrontam a razão de adsorção de potássio (RAP) (Eq. 9) com a produtividade da cana-de-açúcar.

$$\text{RAP} = K/[(\text{Ca} + \text{Mg})/2]^{1/2} \quad (\text{Eq. 9})$$

Zolin et al. (2011) verificou uma relação entre a RAP e a fertilidade, ou seja, houve um acréscimo da fertilidade do solo com o aumento da razão de adsorção de potássio no solo.

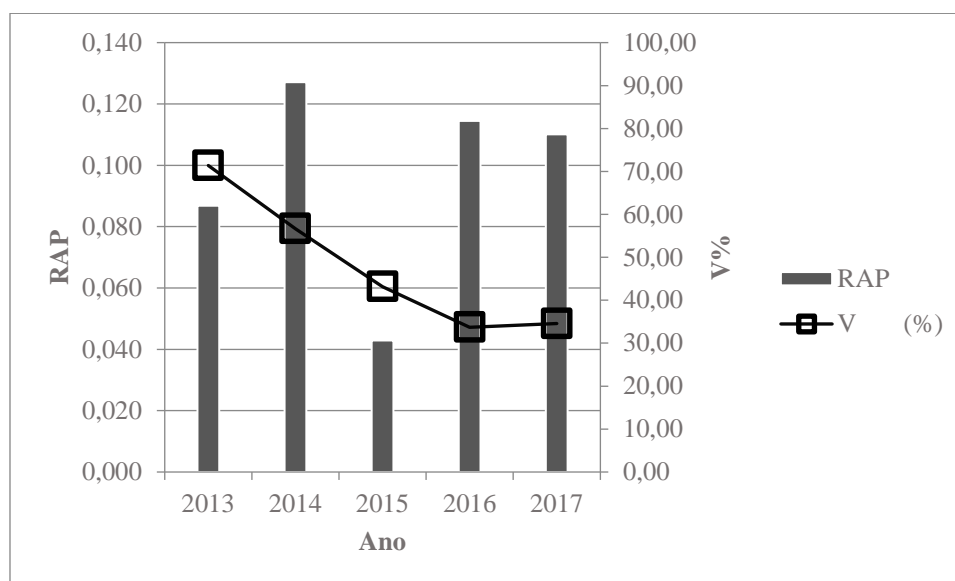
As Tabelas e Figuras apresentadas serão utilizadas para também confrontar os resultados das razões de adsorção de potássio para as glebas 5, 9, 15, 22 e 23 da área de estudo com os valores da fertilidade (saturação por bases - V %) dos solos.

Para a gleba 5 é apresentada a Tabela 22.

**Tabela 22:** Dados da gleba 5 para cálculo da RAP

Ano	V (%)	K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	RAP
2017	34,56	0,10	1,089	0,497	0,110
2016	33,70	0,07	0,582	0,209	0,114
2015	43,18	0,04	0,876	0,456	0,043
2014	56,66	0,13	1,226	0,739	0,127
2013	71,38	0,10	1,721	0,676	0,087

A Figura 45 mostra os valores da RAP e V% para a gleba 5.



**Figura 45:** Valores da RAP e V% para a gleba 5

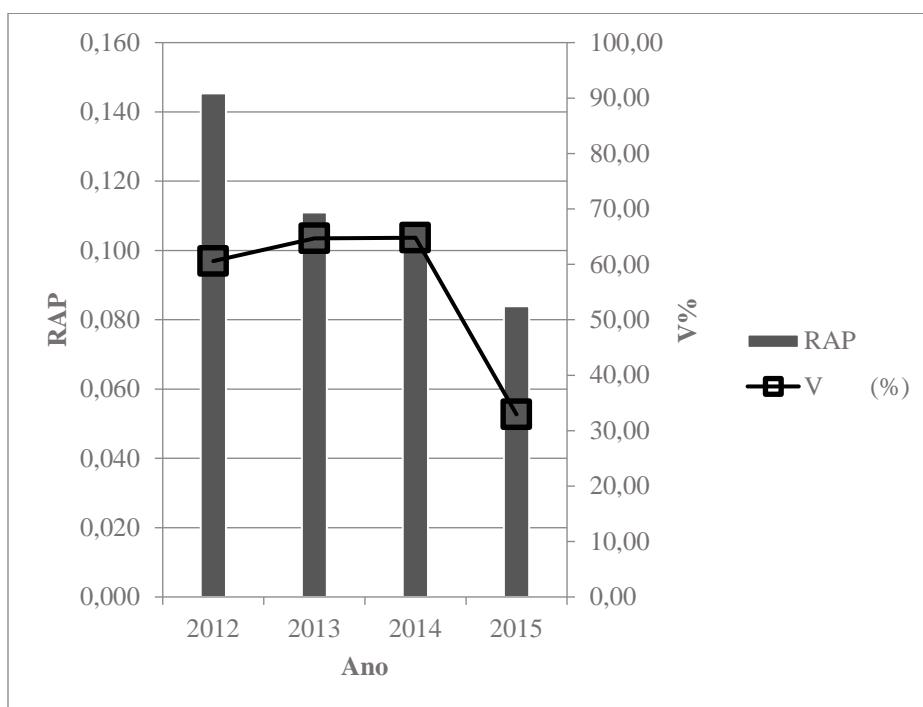
Os valores da fertilidade não seguiram as razões de adsorção do potássio, já que nos anos de 2014 e 2016 houve inversão, com crescimento do RAP e queda em V%, devido ao aumento significativo do valor da saturação por alumínio (Figura 18) que cresceu de 0,82 % para 2,74 % em 2014 e de 3,53 % para 6,39 % em 2016 sinalizando para a necessidade de aplicação de corretivos no solo.

Para a gleba 23 é apresentada a Tabela 23.

**Tabela 23:** Dados da gleba 23 para cálculo da RAP

Ano	V (%)	K <sup>+</sup> (cmolc.dm <sup>-3</sup> )	Ca <sup>2+</sup> (cmolc.dm <sup>-3</sup> )	Mg <sup>2+</sup> (cmolc.dm <sup>-3</sup> )	RAP
2015	32,93	0,06	0,634	0,289	0,084
2014	64,80	0,13	1,842	0,971	0,108
2013	64,67	0,12	1,583	0,678	0,111
2012	60,57	0,14	1,256	0,600	0,145

A Figura 46 mostra os valores da RAP e V% para a gleba 23.



**Figura 46:** Valores da RAP e V% para a gleba 23

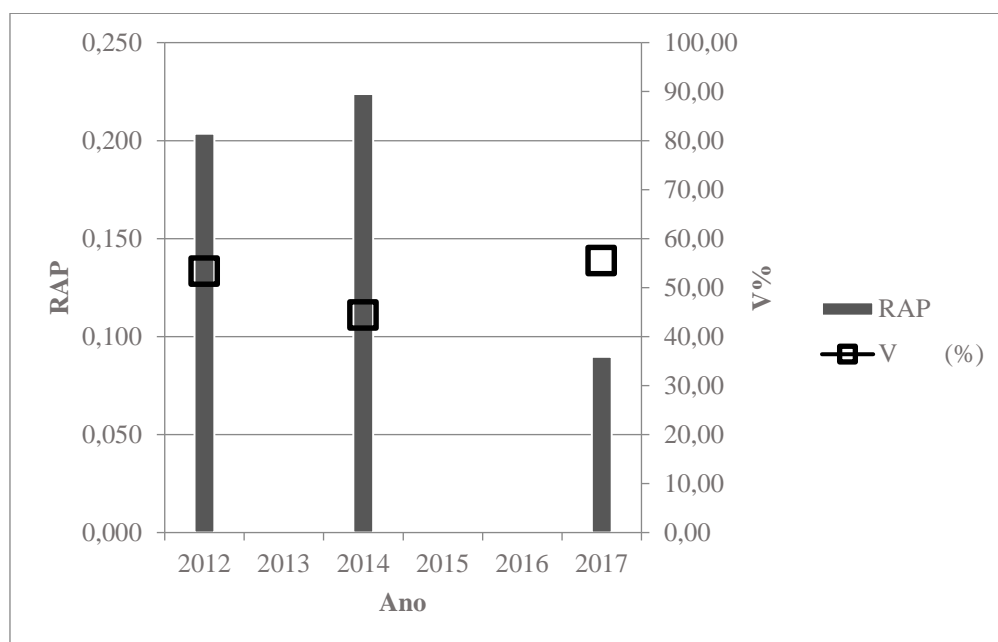
Os valores da fertilidade não seguiram as razões de adsorção do potássio, já que no ano de 2013 houve uma inversão, com queda do RAP e aumento em V%, devido ao aumento do valor da CTC (Figura 22) que cresceu de 60,57 % para 64,67 %

Para a gleba 15 é apresentada a Tabela 24.

**Tabela 24:** Dados da gleba 15 para cálculo da RAP

Ano	V (%)	K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	RAP
2017	55,46	0,11	2,131	0,986	0,090
2014	44,32	0,20	1,079	0,472	0,224
2012	53,25	0,19	1,254	0,490	0,203

A Figura 47 mostra os valores da RAP e V% para a gleba 15.



**Figura 47:** Valores da RAP e V% para a gleba 15

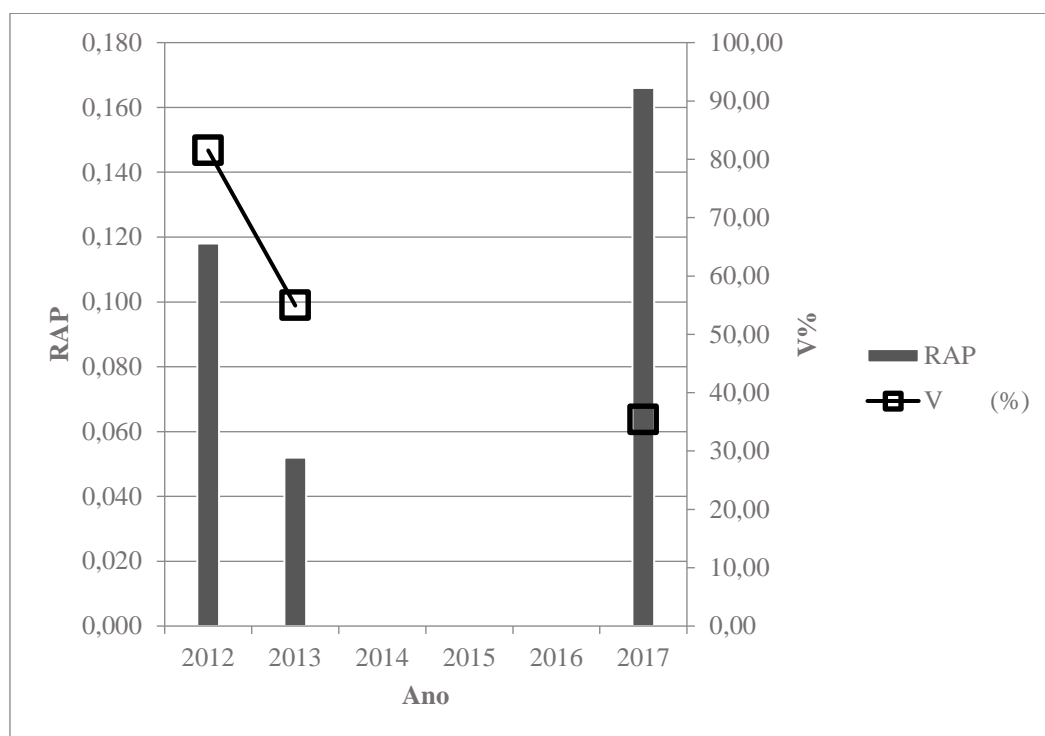
Os valores da fertilidade não seguiram as razões de adsorção do potássio, já que no ano de 2014 houve uma inversão, com crescimento do RAP e queda em V%, devido ao aumento significativo do valor da saturação por alumínio (Figura 30) que cresceu de 0,60 % para 1,52 % sinalizando para a necessidade de aplicação de corretivos no solo.

Para a gleba 22 é apresentada a Tabela 25.

**Tabela 25:** Dados da gleba 22 para cálculo da RAP

Ano	V (%)	K <sup>+</sup> (cmolc.dm <sup>-3</sup> )	Ca <sup>2+</sup> (cmolc.dm <sup>-3</sup> )	Mg <sup>2+</sup> (cmolc.dm <sup>-3</sup> )	RAP
2017	35,36	0,16	1,251	0,554	0,166
2013	54,93	0,05	1,436	0,580	0,052
2012	81,51	0,23	5,907	1,794	0,118

A Figura 48 mostra os valores da RAP e V% para a gleba 22.



**Figura 48:** Valores da RAP e V% para a gleba 22

Os valores da fertilidade não seguiram as razões de adsorção do potássio, já que no ano de 2017 houve uma inversão, com crescimento do RAP e queda em V%, devido ao aumento significativo do valor da saturação por alumínio (Figura 36) que cresceu de 0,20 para 4,09 % sinalizando para a necessidade de aplicação de corretivos no solo.

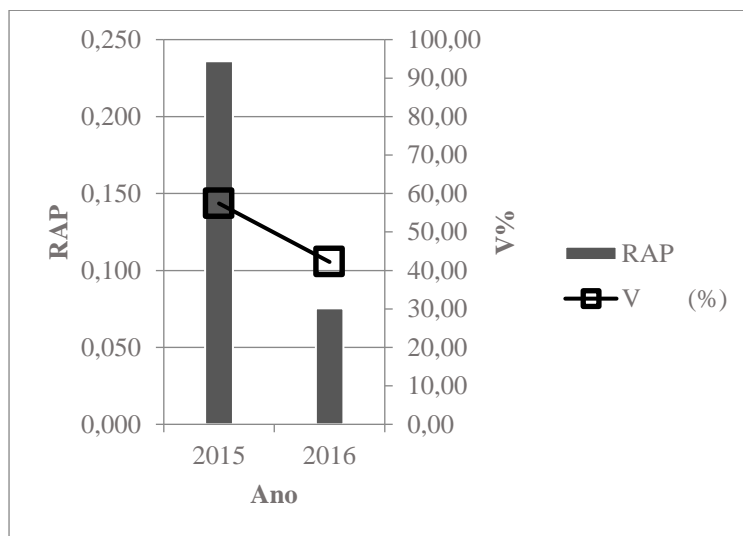
Para a gleba 9 é apresentada a Tabela 26.

**Tabela 26:** Dados da gleba 9 para cálculo da RAP

Ano	V (%)	K <sup>+</sup> (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	Ca <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	Mg <sup>2+</sup> (cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup> )	RAP
2016	42,21	0,07	1,265	0,268	0,075
2015	57,41	0,24	1,430	0,621	0,236



A Figura 49 mostra os valores da RAP e V% para a gleba 9.



**Figura 49:** Valores da RAP e V% para a gleba 9

Os valores da fertilidade seguiram as razões de adsorção do potássio.

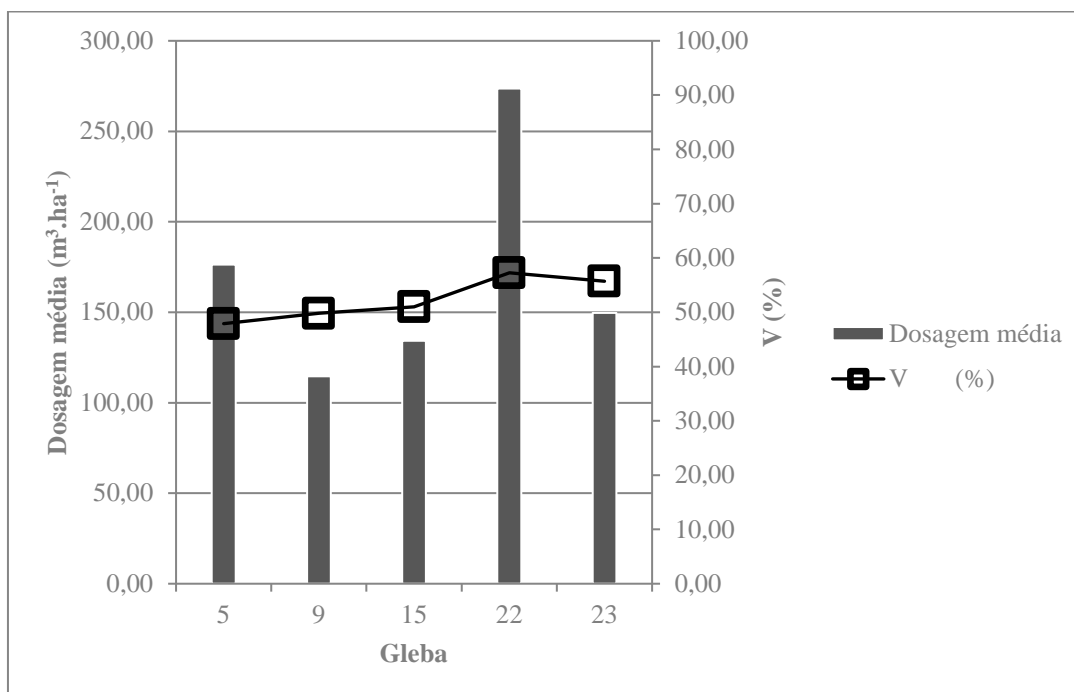
Portanto, nota-se que, apesar de haver uma relação entre o acréscimo da fertilidade do solo com o aumento da razão de adsorção de potássio no solo, outros fatores podem implicar inversões nesta relação, como, por exemplo, a existência de valores elevados da saturação por alumínio. No estudo de Zolin et al. (2011) os valores da saturação de alumínio foram nulos durante os 1, 2, 3, 4 e 10 anos, somente surgindo valores no vigésimo ano, ou seja, este parâmetro não influenciou os resultados obtidos, justificando-se a diferença das avaliações desse presente estudo.

A oitava avaliação se refere à Tabela 27 que apresenta um resumo geral dos dados das glebas analisadas (5, 9, 15, 22 e 23).

**Tabela 27:** Resumo geral dos dados das glebas 5, 9, 15, 22 e 23

Gleba	Dosagem (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	V (%)	ks (kg.ha <sup>-1</sup> )	CTC (mmolc.dm <sup>-3</sup> )
<b>médias</b>				
5	176,30	47,90	66,609	35,62
9	114,68	49,81	119,220	39,00
15	134,19	51,01	130,040	44,75
22	273,70	57,27	115,185	63,58
23	149,71	55,74	86,584	36,26
<b>Média geral</b>	<b>169,72</b>	<b>52,35</b>	<b>103,528</b>	<b>43,84</b>

A figura 50 mostra uma comparação entre os valores médios das dosagens nas glebas 5, 9, 15, 22 e 23 que foram avaliadas nesse estudo e os valores das saturações por bases.



**Figura 50:** Comparação das dosagens médias e V% nas glebas

A gleba 22 que teve o valor médio das dosagens mais elevado de  $273,70 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$  também apresentou um valor médio para a saturação por bases (V%) maior de 57,27 %, evidenciando que a aplicação da vinhaça, desde que controlada a acidez, implica aumento da fertilidade do solo.

Em relação aos valores médios gerais obtidos da fazenda em análises por períodos longos de tempo, estes poderiam ser utilizados na tomada de decisões no planejamento do manejo de uma área específica, ou seja, como por exemplo nesse estudo, que avaliou um período de 5 (cinco) anos, com dosagem média de vinhaça de  $170 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$ , fertilidade média de 52 %, concentração média do potássio de  $104 \text{ kg}.\text{ha}^{-1}$  e CTC média de 44 %.

### 5.3 Avaliações dos parâmetros químicos para a caracterização ambiental dos solos

A primeira avaliação utiliza os dados das análises de solo feitas pela usina das glebas 3, 23 e 26 constantes na Tabela 8.

As análises de solo destas glebas não apresentaram nenhum elemento químico que apresentou concentração maior que os valores de prevenção (VP) ou valores de intervenção

(VI). Em todas as amostras as concentrações dos elementos ficaram abaixo dos valores de referência de qualidade (VRQ) confirmando a condição de solos com qualidade natural nestas três glebas. Também não foram detectados compostos orgânicos voláteis (VOC) ou semivoláteis (SVOC) que poderiam indicar algum tipo de contaminação.

A segunda avaliação utiliza os dados das análises das amostras de solo nos mesmos locais coletadas no campo em 2018 (glebas 3, 23 e 26) que estão na Tabela 10. Estas análises determinaram elementos químicos variados que fazem parte da lista contida na portaria P4.231 que foi apresentada na Tabela 5 e outros elementos que não fazem parte desta lista. Na Tabela 10 estes elementos foram sinalizados.

A partir da Tabela 10 foi elaborada a Tabela 28 que apresenta os elementos que fazem parte da lista da portaria P4.231 e os valores orientadores da CETESB destes elementos para o solo agrícola.

**Tabela 28:** Dados das análises das amostras de solo coletadas no campo – elementos traços pertencentes à lista da portaria P4.231

Composição Química	Amostras						Valores Orientadores		
	P1 30cm	P1 100cm	P2 30cm	P2 100cm	P3 30cm	P3 100cm	VP <sup>(1)</sup>	VRQ <sup>(1)</sup>	VI <sup>(1)</sup>
	Gleba 3	Gleba 3	Gleba 23	Gleba 23	Gleba 26	Gleba 26	(mg.kg <sup>-1</sup> peso seco)	(mg.kg <sup>-1</sup> peso seco)	(mg.kg <sup>-1</sup> peso seco)
Bário (Ba)	28,00	44,50	53,90	38,00	305,40 <sup>(a)</sup>	65,80	120	75	500
Cobalto (Co)	1,00	1,00	2,00	0,50	53,70 <sup>(b)</sup>	3,20	25	13	35
Cobre (Cu)	7,10	6,80	8,90	8,30	122,80 <sup>(a)</sup>	28,50	60	35	760
Cromo (Cr)	80,70 <sup>(a)</sup>	92,00 <sup>(a)</sup>	83,90 <sup>(a)</sup>	172,30 <sup>(b)</sup>	175,60 <sup>(b)</sup>	91,10 <sup>(a)</sup>	75	40	150
Níquel (Ni)	3,50	5,40	1,20	7,00	69,60 <sup>(a)</sup>	23,20 <sup>(c)</sup>	30	13	190
Zinco (Zn)	14,70	15,10	9,00	3,80	106,30 <sup>(a)</sup>	36,80	86	60	1900

(1) Valores Orientadores para Solo no Estado de São Paulo de 22/11/2016 - CETESB

VP - valor de prevenção

VRQ – valor de referência de qualidade

VI – valor de intervenção para solo agrícola

Os valores sinalizados por (a) apresentaram concentrações maiores que os valores de prevenção: os elementos sinalizados são o bário (Ba), o cobre (Cu), o níquel (Ni) e o zinco (Zn) na amostra P3 da gleba 26 na profundidade 30 cm. Para esses casos sugere-se o monitoramento desses elementos nesses locais. Outro elemento sinalizado é o cromo (Cr) que aparece em alta concentração na amostra P1 (gleba 3) que foi considerada como branco por não ter aplicação das vinhaças no período de 2012 a 2017 e, portanto, indica que as amostras dos solos das áreas provavelmente já apresentam altas concentrações de cromo.

Os valores sinalizados por (b) apresentaram concentrações maiores que os valores de

intervenção. Os elementos sinalizados foram o cobalto e o cromo. O cobalto (Co) e o cromo (Cr) com concentrações elevadas foram determinados na amostra P3 da gleba 26 na profundidade 30 cm que teve a última aplicação das vinhaças no ano de 2017 e o cromo (Cr) foi determinado com concentração elevada na amostra P2 da gleba 23 na profundidade 100 cm que teve a última aplicação das vinhaças no ano de 2015. Nesses casos as altas concentrações em diferentes profundidades poderiam ser justificadas pelas diferenças entre o ano da amostragem no campo (março de 2018) e o ano da última aplicação das vinhaças. Também para esses casos sugerem-se ações de remediação já que esses elementos podem lixiviar em direção às águas subterrâneas. Fuess (2013) também constatou em suas análises concentrações de alguns poluentes prioritários (cádmio, chumbo, cobre, cromo, níquel e zinco) capazes de desencadear efeitos nocivos à saúde humana.

O valor sinalizado por (c) apresentou uma concentração maior que o valor de referência de qualidade que se refere ao níquel na amostra P3 da gleba 26 na profundidade 100 cm, porém este valor está abaixo do valor de prevenção.

A Tabela 29 apresenta os valores das faixas adequadas das concentrações dos elementos químicos nutrientes no solo para a cana-de-açúcar.

**Tabela 29:** Faixas de concentrações adequadas de nutrientes no solo para a cana-de-açúcar

	Elemento	Unidade	Faixa
Macronutrientes	Nitrogênio (N)		18-25
	Fósforo (P)		1,5-3,0
	Potássio (K)	g.kg <sup>-1</sup>	10-16
	Cálcio (Ca)		2,0-8,0
	Magnésio (Mg)		1,0-3,0
	Enxofre (S)		1,5-3,0
Micronutrientes	Boro (B)		10-30
	Cobre (Cu)		6-15
	Ferro (Fe)	mg.kg <sup>-1</sup>	40-250
	Manganês (Mn)		25-250
	Molibdênio (Mo)		0,005-0,2
	Zinco (Zn)		10-50

**Fonte:** adaptado de RAIJ et al., 1997

Avaliando-se as faixas, as amostras P3 da gleba 26 apresentaram valores elevados das concentrações acima do limite superior para o cobre, 122,8 mg.kg<sup>-1</sup> para a profundidade 30 cm e 28,2 mg.kg<sup>-1</sup> para a profundidade 100 cm e para o zinco, 106,30 mg.kg<sup>-1</sup> para a profundidade 30 cm. Estas concentrações acima do limite superior da faixa podem indicar suficiência do nutriente, mas não excesso que prejudique a produtividade (RAIJ, 1997).

Já as amostras P2 da gleba 23 apresentaram valores menores que o limite inferior para

o zinco,  $9,00 \text{ mg.kg}^{-1}$  para a profundidade 30 cm e  $3,80 \text{ mg.kg}^{-1}$  para a profundidade 100 cm indicando a deficiência de zinco o que implica a necessidade da aplicação deste nutriente com a adubação de plantio (RAIJ, 1997). As amostras P1 da gleba 3 (branco) apresentaram valores dentro da faixa adequada para a cana-de-açúcar.

Na Tabela 10 ficaram evidenciadas as maiores concentrações da maioria dos elementos químicos para a amostra P3 da gleba 26 na profundidade 30 cm (Bário, Cério, Cobalto, Cobre, Estrôncio, Ítrio, Lantânio, Nióbio, Níquel, Rubídio, Vanádio, Zinco e Zircônio). Na profundidade 100 cm as concentrações decresceram, mas permaneceram mais elevadas que as concentrações das outras amostras P1 da gleba 3 (branco) e P2 da gleba 23. Esse local provavelmente se manteve mais intemperizado que os demais locais amostrados.

A terceira avaliação é em relação à composição química dos óxidos presentes nas amostras de solo coletadas (Tabela 11), onde foram encontrados altos percentuais de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) entre 31,12 a 87,00 %. A segunda maior concentração foi de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) entre 5,51 a 19,64 %, seguida de altos percentuais de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) de 3,27 a 22,54 %, além da presença relevante de rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) com variação entre 0,82 a 6,00 %.

A grande quantidade de sílica e dos óxidos de ferro e de alumínio é indicativo da presença de altas quantidades de silicatos, possivelmente quartzo, argilominerais e minerais secundários, produtos de intemperismo. Como já discutido, tais minerais são característicos de latossolos vermelhos/amarelos como os observados na área de estudo (ARCADIS TETRPLAN, 2011; PLANO DE APLICAÇÃO DE VINHAÇA, 2017; CBH-MOGI et.al.,1999). O mineral pesado rutilo também é característico da região da área de estudo (WU, 1981).

A relação Sílica-Alumina da amostra, representada pela expressão a seguir (Eq. 10), é considerada como um índice de intemperismo do solo (BAPTISTA et al., 1998), indicando que quanto menor o valor mais intemperizado é o solo, ou seja, já houve a remoção da sílica com posterior aumento da concentração da alumina. Para esses solos intensamente intemperizados,  $K_i$  é essencialmente uma medida das proporções da caulinita  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  e da gibbsita  $\text{Al}(\text{OH})_3$ .

$$K_i = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1,7 \quad (\text{Eq. 10})$$

Para a avaliação dos respectivos índices para as amostras P1, P2 e P3 é apresentada a Tabela 30.

**Tabela 30:** Relação Sílica-Alumina das amostras P1, P2 e P3

Composição Química	Fórmula	Un	Amostras					
			P1 30cm	P1 100cm	P2 30cm	P2 100cm	P3 30cm	P3 100cm
			Gleba 3	Gleba 3	Gleba 23	Gleba 23	Gleba 26	Gleba 26
Alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	7,41	7,00	5,51	5,79	19,64	10,12
Sílica	SiO <sub>2</sub>	%	83,44	84,60	87,00	86,68	31,12	79,33
K <sub>i</sub>	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .1,7		19,15	20,53	26,83	25,47	2,69	13,33

Portanto, a amostra P3 da gleba 26 na profundidade 30 cm teve o índice K<sub>i</sub> mais baixo (2,69) indicando que a crosta superficial do solo desse local pode ter sofrido intemperismo químico por hidrólise com eliminação parcial da sílica e aumento da alumina com prováveis maiores escoamentos das águas superficiais. Na profundidade 100 cm o índice da amostra P3 já se apresentou mais elevado (13,33) indicando a presença de maior concentração da sílica e menor intemperismo dada à essa maior profundidade. Para as demais amostras P1 da gleba 3 e P2 da gleba 23, os índices indicaram a presença de maior concentração da sílica e menor intemperismo.

Também a concentração da hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de 22,54 % da amostra P3 da gleba 26 na profundidade 30 cm indica que a crosta superficial do solo desse local pode ter sofrido intemperismo químico por oxidação.

Em relação aos outros compostos químicos, os menores valores de concentração obtidos foram, da ordem de menor para o maior percentual, Na<sub>2</sub>O (0,01 a 0,02 %), K<sub>2</sub>O (0,01 a 0,07 %), MnO (0,01 a 0,12 %), MgO (0,01 a 0,22 %) e CaO (0,03 a 0,34 %). A similaridade dos dados da análise química com os parâmetros de fertilidade do solo foi a presença da relação CaO > MgO > K<sub>2</sub>O que pode ser verificada na Tabela 7.

As amostras P1 da gleba 3, consideradas como amostras em branco, apresentaram os menores teores de K<sub>2</sub>O (0,01 %), mostrando que o latossolo vermelho/amarelo da área de estudo tem insuficiência de potássio e a aplicação da vinhaça pela fertirrigação repõe este macronutriente desde que adequadamente realizada. Nos locais com aplicação das vinhaças (glebas 23 e 26) os teores de K<sub>2</sub>O foram maiores, 0,02% para a gleba 23 e 0,06 e 0,07 % para a gleba 26.

## 6. CONCLUSÕES

O trabalho de pesquisa apresentou uma análise temporal de determinadas glebas da fazenda, onde foram aplicadas vinhaças da usina no período entre 2012 a 2017, concluindo serem importantes as avaliações dos parâmetros químicos das análises de solo, pois poderão ser necessárias alterações no manejo do solo quando as condições de fertilidade se mostrarem alteradas ou quando as concentrações de determinados elementos químicos estiverem em desacordo com os valores orientadores vigentes.

Em alguns casos ficou evidenciada a elevação da acidez do solo e aumento da concentração do alumínio sinalizando a necessidade de aplicação de corretivos. Também ficou evidenciada a queda dos valores da saturação por bases (V%) indicativos de queda da fertilidade do solo sinalizando necessidade de ações no manejo do solo destas áreas.

As dosagens de vinhaças de 2012 a 2016 resultaram em baixo risco de salinização por sodificação dos solos já que as relações de adsorção de sódio (RAS) foram inferiores a 10.

Nas análises das vinhaças ficaram evidenciados os valores do pH ácido com valor médio de 4,7, a disponibilidade de MO e dos cátions  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  em concentrações elevadas, principalmente como fonte do nutriente potássio. Em relação às concentrações de sódio, indicativas da característica de salinidade, a amostra de 2017 apresentou um valor elevado de  $58 \text{ mg.L}^{-1}$  que representa um risco de salinização do solo. Também foram avaliadas as altas concentrações do sulfato que disponibilizam o enxofre que causa mau cheiro e proliferação de moscas.

Os resultados das análises de solo mostraram a presença de óxidos de ferro e alumínio que fazem parte da fração coloidal do solo, conjuntamente com a matéria orgânica estabilizada, capaz de adsorver cátions, contribuindo para o aumento da CTC total do solo por certos períodos. É importante salientar que também foram obtidos valores de concentração de determinados elementos como o cobalto e o cromo maiores que os valores de intervenção sinalizando a necessidade de remediação destes problemas nas áreas analisadas evidenciando-se a preocupação do reuso agrícola da vinhaça.

## REFERÊNCIAS

AGEITEC, Agência Embrapa de Informação Tecnológica. *Árvore do conhecimento – cana-de-açúcar*. Embrapa, disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_18\\_3112006152934.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_18_3112006152934.html)> acesso em 20/02/2020.

ANA, Agência Nacional de Águas. *Manual de Conservação e Reuso de Água na Agroindústria Sucroenergética*. Agência Nacional de Águas; Federação das Indústrias do Estado de São Paulo; União da Indústria da Cana-de-açúcar; Centro de Tecnologia Canavieira. Brasília, 2009.

ARCADIS TETRAPLAN. *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, 2011.

BALDACIN, A. C.; PINTO, G. M. F. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás. *Revista Eletrônica FACP*, Ano III – n. 7, Paulínia SP, janeiro de 2015.

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. 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., 2010.

BAPTISTA, G.M.M.; MADEIRA NETTO, J.S.; MENESES, P.R. Determinação da Relação Sílica - Alumina a partir dos Dados do Sensor AVIRIS (JPL/NASA), para Discretização Espacial do Grau de Intemperismo de Solos Tropicais. *Anais IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, INPE, Santos SP, p. 1345-1355, 11-18 setembro 1998.

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

BRASIL. ABNT NBR 10.004 – *Norma Técnica: Resíduos Sólidos – Classificação*. 2014.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. *Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham nas ETAS*, Brasília DF, 2014<sup>a</sup>.

BRITO, A.P.F. *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, 2013.

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

CATANI, R.A., GLÓRIA, N.A., VITTI, G.C. Adsorção de sulfato pelo solo. *Anais da ESALQ*, vol. 28, p. 244, Piracicaba SP, 1971.



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

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Valores orientadores para solo e água subterrânea*. Qualidade do solo, 2020. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/solo/valores-orientadores-para-solo-e-agua-subterranea>> Acesso em 20/02/2020.

CHERUBIN, R. A. *Efeitos da viabilidade da levedura e da contaminação bacteriana na fermentação alcoólica*. 2003. Tese de Doutorado. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11138/tde-10092003-144216/publico/rudimar.pdf>> Acesso em 20/02/2020.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. *Acompanhamento da safra brasileira - cana-de-açúcar*. – Vol. 6, safra 2019/2020 n.2 Segundo levantamento1. Brasília, 2019. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>> Acesso em 20/02/2020.

CORDEIRO, G. G. *Qualidade de água para fins de irrigação - Conceitos básicos e práticas*. Embrapa Semiárido, Petrolina, PE, 2001.

DONAGEMA, G.K. [et al.] *Manual de métodos de análise de solos*. Dados eletrônicos. 2ª. ed. revista. Embrapa Solos, Rio de Janeiro RJ, 230 p. , 2011.

ELIA NETO, A. *Estado da Arte da Vinhaça*. 2º Workshop "Resíduos urbanos e agrícolas: energia, reciclagem de nutrientes e produção de fertilizantes". Campinas SP, 2016.

ELIA NETO, A. *Normas de Aplicação da Vinhaça e Outorga de Água*. IV Irrigacana, Ribeirão Preto SP, 2019.

FUESS, L.T. *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, 2013.

GALDEANO, L. R. *Fertilidade e mineralogia do solo sujeito à disposição de vinhaça de uma fazenda em Santa Cruz das Palmeiras*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro SP, 2019.

LAESPIGA, M.A.M. *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, 2008.

LOPES, A. S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. *Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo*. ANDA, São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.agronomiaufs.com.br/index.php/download-e-videos/category/75-downloads>> Acesso em 15/02/2020.

LOPES, A. S. *Manual Internacional de Fertilidade do Solo*. Tradução e Adaptação 2ª. ed. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, Piracicaba SP, 1998.

LYRA, M.R.C.C.; ROLIM, M.M.M.; SILVA, J.A.A. Toposseqüência de solos fertirrigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 7, n. 3, p. 525-532. 2003.

MATTIAZZO, M.E. & GLÓRIA, N.A. Efeito da vinhaça na acidez do solo. *STAB. Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil*, Piracicaba SP, v. 4, n.2, p.35-40, 1985.

MOLIN, J.P. & RABELLO, L.M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. *Revista Eng. Agrícola*, v.31, n.1, p.90-101, Jaboticabal SP, jan./fev. 2011.

MORTATTI, B.C. *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, 2010.

NARDY, A. J. R. et al. *Determinação de elementos maiores e menores em rochas silicáticas por espectrometria de fluorescência de Raios-X: resultados preliminares*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 6., 1997, Salvador. Anais. SBGeoquímica, Salvador, 1997, v. 2, p. 346-348.

OLIVEIRA, W. A. *Modelos estatísticos integrados à metodologia Lean Seis Sigma visando ao aumento da produtividade na obtenção do etanol*. 2010. Tese de Doutorado. Disponível em: <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11134/tde-20092010-092946/publico/Wilson\\_Oliveira.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11134/tde-20092010-092946/publico/Wilson_Oliveira.pdf)>. Acesso em: 20/02/2020.

PEREIRA, A.C.A. *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, 2015.

PEREIRA, S.Y et al. *Os Estudos dos Impactos da Vinhaça no Solo e na Água Subterrânea, Ênfase na EDR – Ribeirão Preto – Uma Análise da Situação Atual do Conhecimento e Perspectivas*. ICTR2004 -Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável. Florianópolis SC, 2004.

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.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. *Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais*. IAC, Campinas SP, 285p. 2001.

RAIJ, B. van, CANTARELLA, H., QUAGGIO, J.A., FURLANI, A.M.C. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. Boletim Técnico n. 100, 2ª. ed., IAC, Campinas SP, 1997.

REICHERT, J.M. *Introdução à Ciência do Solo*. Apostila. UFSM, Santa Maria RS, 2011.

ROCHA, F.J. *Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar submetida a diferentes doses de vinhaça*. Tese de Doutorado. ESALQ – USP, Piracicaba SP, 2013.

RONQUIM, C. C. *Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais*. Embrapa Monitoramento por Satélite. Campinas SP, 2010.

ROSSETTO, A. J. *Utilização agrônômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira*. In: PARANHOS, S.B. (ed.). *Cana-de-açúcar: cultivo e utilização*. Campinas: Fundação Cargill, 1987, v.2, p.435-504.

ROSSETTO, R. *Uso da vinhaça na adubação da cana*. IAC, Campinas SP, 2018.

SAWYER, C. N.; McCARTHY, P. L. *Chemistry for environmental engineering*. McGraw Hill, 532p. Singapore, 1978.

SERRANA FERTILIZANTES, Boletim Técnico – *Calagem da Cana-de-açúcar*. 2001. Disponível em <<http://www.serrana.com.br>> Acesso em 2/11/2019.

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

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N. & OLIVEIRA, S.A. *Acidez do solo e sua correção*. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. *Fertilidade do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa MG, 2007.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. *Latosolos*. Embrapa, 2005. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01\\_96\\_10112005101956.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_96_10112005101956.html)> Acesso em 20/02/2020.

TAVARES, Fo.,A.;BARROS, M F. C.; ROLIM,M.M.; SILVA,E.F.F. Incorporação de gesso para correção da salinidade e sodicidade de solos salino-sódicos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, n.3, UAEA/UFCEG, Campina Grande PB, p.247–252, 2012.

TEIXEIRA, P.C. [et al.] *Manual de métodos de análise de solos*. 3ª. ed. revista e ampliada. Embrapa Solos, Brasília DF, 2017.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION *Guidelines for safe use of wastewater, excreta and greywater*. Genebra, Suíça, 218p. (v.2, Wastewater use in agriculture). 2006.

WU, F. T. *Minerais pesados das seqüências arenosas paleozóica e mesozóica no centro-leste do Estado de São Paulo*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP, 1981.

ZOLIN, C.A.; PAULINO, J.; BERTONHA, A.; FREITAS, P.S.L.; FOLEGATTI, M.V. 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. 22-2, 2011.