

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO - UFRPE
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL - DTR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
PPEAMB

INTERAÇÃO DO POTÁSSIO EM SOLO DA ZONA CANAVIEIRA VIA
VINHAÇA

Joycyely Marytza de Araujo Souza Freitas

Orientador: Prof. Dr. André Maciel Netto

Co-orientador: Prof. Dr. Marcus Metri Corrêa

Recife, PE
Agosto, 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO - UFRPE
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL - DTR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
PPEAMB

Joycyely Marytza de Araujo Souza Freitas

INTERAÇÃO DO POTÁSSIO EM SOLO DA ZONA CANAVIEIRA VIA
VINHAÇA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, Área de Concentração: Controle e Remediação da Poluição.

Orientador: Prof. Dr. André Maciel Netto

Co-orientador: Prof. Dr. Marcus Metri Corrêa

Recife, PE
Agosto, 2015

Ficha Catalográfica

F866i Freitas, Joycyely Marytza de Araujo Souza
Interação do potássio em solo da zona canavieira via vinhaça /
Joycyely Marytza de Araujo Souza Freitas. – Recife, 2015.
63 f.: il.

Orientador(a): André Maciel Netto.
Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia
Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Departamento de Tecnologia Rural, Recife, 2015.
Referências.

1. Cana-de-açúcar 2. Vinhoto 3. Isotermas Langmuir e
Freundlich I. Netto, André Maciel, orientador II. Título

CDD 628

DEDICATÓRIA

Dedico à Deus primeiramente. Sem Ele não teria forças de superar cada dia. Só Ele sabe os medos que tive e as angústias que passei.

Aos meus pais, Mariluce Araujo Silva e Jorge Henriques de Souza, por ensinarem o verdadeiro exemplo de fé, perseverança, paciência e confiar em Deus. Sem as orações de vocês, esse sonho não teria sido concretizado. Amo vocês para sempre, não importa a distância.

Ao meu esposo Luciano Oliveira Freitas por todo amor e paciência nos momentos mais difíceis. Que sofreu comigo até os últimos minutos e também se alegrou com a NOSSA vitória.

Aos meus irmãos Jodielder Henry (meu professor exemplo e espelho), Jorge Eduardo (meu maior exemplo de dedicação e determinação), Aline Ferreira (Mestra, que me aconselhou nos momentos de cansaço dos transportes), Jefferson Ferreira (exemplo de força e persistência) e Romulo Ferreira (exemplo de alegria) sem o carinho de vocês seria mais difícil chegar até aqui.

As minhas cunhadas Samara Lima (exemplo de garra e confiança), Virginia Izaias (exemplo de atitude) e Vivienne Freire de Souza (exemplo de entusiasmo). E sobrinhas Vyvyan Souza, Rebeka Vitoria Ferreira e Jeniffer Souza, tia mesmo ausente ama muito vocês.

A família Souza por todas as orações e compreensão.

As escolas por onde trabalhei que me desejaram os melhores caminhos e deixaram uma janela para retorno. Principalmente nunca terei como agradecer a Taci Rocha e dona Márcia Monique por toda confiança depositada, o carinho de vocês foi fundamental. E aos meus ex-alunos queridos que apoiaram, vibraram e torceram comigo cada instante.

As amigas Josiane Cavalcante (que se fez presente em todos momentos), Mércia Fonseca (pelo carinho e preocupação, sempre presentes), Wilnne Maia (o seu incentivo foi combustível nessa caminhada), Reneid Emanuele (suas orações e palavras de confiança me deram muita força), Juliana Figueiredo (seu exemplo de superação, me fez acreditar que era possível) Rebeca Barros (pelo carinho sempre presente), Ursula Emanuelle (por me presentear com sua força e amizade), Elaine Maria (suas orações foram essenciais em cada passo) e Valesca Guimarães (suas orações e compreensão foram importantes para me fazer mais forte).

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador o Prof. Dr. André Maciel Netto pela confiança do projeto e por acreditar na minha capacidade de conduzir essa pesquisa, mesmo nas adversidades e nos momentos difíceis para mim.

Aos professores por toda dedicação e aprendizado proporcionado, especialmente Brivaldo Gomes. TUDO que APRENDI sobre solo foi graças aos SEUS ENSINAMENTOS. Sempre prestativo, a qualquer que seja o discente. Humildade lhe define, qualidade rara no meio acadêmico. Agradeço muito sua ajuda durante todas as fases da pesquisa.

Aos professores Marcus Metri (meu co-orientador que cuidou de todas as burocracias nas vezes que precisei e ajudou-me na coleta de solo, sempre a postos a ajudar); Vicente Paulo (por incentivar e encorajar-me nos momentos mais baixos da trajetória); Romildo Morant (por sinalizar os melhores caminhos); Fernando Cartaxo (seu carisma e alegria me fizeram acreditar que tudo poderia destinar ao sucesso); Marcelo Metri (pela tradução de mineralogia); Rômulo Mendes e Maria Betânia Galvão (por me auxiliar nas análises químicas); Ceres Almeida (seus conselhos foram preciosos durante a pesquisa); Victor Psicoya (mostrou-me por vezes os melhores conselhos); Soraya El-Deir (meu currículo nunca seria o mesmo sem seus preciosos esforços); Willian Severi (pela simplicidade em ensinar e enriquecer-me com tanta informação).

Aos funcionários da UFRPE Ednalva, Cristiane, Bartolomeu, Granja pela torcida e ajuda em todos os processos burocráticos. E aos técnicos dos laboratórios da UFPE por toda paciência e disponibilidade em ajudar-me nas análises: Claudenice, Maurício; Gilberto; Dário.

Ao amigo Fernando Xavier pela amizade e contribuição em todas as fases da pesquisa. Nunca esquecerei seu altruísmo e desejo-lhe sucesso infinito.

Aos colegas que nunca esquecerei e agradecerei sempre pelo auxílio durante a pesquisa: Paula Araújo, José Angelim, Mércia Fonseca, Fernando Cunha, Bruno Toríbio, Valerio Marcelo, Kamilla Araújo, Clodomir Barros Pereira, Zalmon Almeida, Elvis, Waldemir, Elisangela, Hermon, Fabiana, Wagner, Heitor, Thiago, Jailson, Karina, Jhonata, Emanuele, Ariane, Monaliza, Abedson, Débora Pedrosa, Adriana, Isabela Regina, Yenê Paz, Marília Macêdo Almeida, Liliana Santos.

À Usina São José, nas pessoas do Sr. Vital, José Roberto e Charllyson.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

RESUMO

A vinhaça é rica em nutrientes, principalmente em potássio, porém é classificada como rejeito do processo de destilação do caldo da cana-de-açúcar para processo de fabricação do álcool, que não possui legislação estadual vigente sobre o descarte no meio ambiente. Dessa forma, o objetivo do estudo é avaliar as interações do íon potássio (K^+), aplicados via vinhaça, em um solo representativo da zona canavieira (tabuleiro costeiro de textura arenosa) por meio de isothermas de adsorção. A metodologia empregada foi baseada na caracterização física, química e mineralógica do solo, bem como de ensaios de equilíbrio em lote baseado nas recomendações da Environmental Protection Agency (EPA-USA), onde as curvas experimentais foram ajustadas pelos modelos de Isothermas de Langmuir e Freundlich com auxílio do software Sigma Plot versão 11.0. Com relação as isothermas, o modelo de Freundlich demonstrou melhor ajuste da curva nas duas formas: linear e não-linear (ajuste direto), sendo o modelo não-linear escolhido em função dos valores do coeficiente de determinação (R^2). A interação do potássio com o solo se deu principalmente com a matéria orgânica e a presença de caulinita do solo, pois apresentaram íons negativos na superfície externa, favorecendo assim a adsorção. A capacidade de adsorção do potássio ao solo foi maior para a primeira camada (0-20 cm), diminuindo em profundidade.

Palavras chaves: **Cana-de-açúcar. Vinhoto. Isothermas Langmuir e Freundlich.**

ABSTRACT

The vinasse is rich in nutrients, particularly potassium, but it is classified as waste distillation process the juice of sugarcane for alcohol manufacturing process, which has no current state legislation on the discharge to the environment. Thus, the objective of the study is to evaluate the potassium ion interactions (K^+), applied via vinasse in a representative soil of sugarcane zone (coastal board sandy texture) using adsorption isotherms. The methodology was based on physical, chemical and soil mineralogical and batch tests based on the recommendations of the Environmental Protection Agency (EPA-USA), where the experimental curves were adjusted by Langmuir and Freundlich isotherm models using the Sigma Plot 11.0 Software. Regarding the isotherms, the Freundlich model showed better fit the curve in two ways: linear and non-linear (direct adjustment), the non-linear model chosen on the basis of values of the coefficient of determination (R^2). The potassium interaction with soil was mainly with organic matter and the presence of soil kaolinite, it had negative ions on the outer surface, thereby promoting the adsorption. The soil potassium adsorption capacity was higher for the first layer (0-20 cm) decreasing in depth.

Keywords: Sugarcane. Vinasse. Langmuir and Freundlich isotherms.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vinhaça em tanque de armazenamento	16
Figura 2 – Localização da amostragem de solo da Usina São José – PE (7° 42' 33" S e 34° 54' 22" W)	27
Figura 3 – Etapas do transporte da vinhaça na Usina São José.....	28
Figura 4 – Mapa de solo de Itapissuma.....	29
Figura 5 – Difratoograma da fração argila natural da camada de 0 - 20 cm.....	44
Figura 6 – Difratoograma da fração argila natural da camada de 20 - 40 cm.....	45
Figura 7 – Difratoograma da fração argila natural da camada de 40 - 60 cm.....	46
Figura 8 – Cinética de adsorção de potássio	47
Figura 9 – Isotermas experimentais (três repetições) para as camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm.....	49
Figura 10 – Isotermas experimentais (valor médio de três repetições) ajustadas pelos modelos de Freundlich (ajuste direto e ajuste linear) e Langmuir (ajuste direto e por dois modelos lineares), para as camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm	50
Figura 11 – Isotermas experimentais (média de três repetições e desvios padrões), ajustadas pelos modelos Freundlich e Langmuir para as camadas de solos A) 0-20 cm, B) 20-40 cm e C) 40-60 cm.....	52

LISTA DE FÓRMULAS

Equação 1 – Equação de Freundlich.....	25
Equação 2 – Modelo de Freundlich sob Forma Linearizada.....	25
Equação 3 – Equação de Langmuir	26
Equação 4 – Densidade de Partícula.....	31
Equação 5 – Densidade de Solo	31
Equação 6 – Porosidade Total	31
Equação 7 – Acidez Potencial	33
Equação 8 – Equação da Concentração Adsorvida.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constituição química da vinhaça de acordo com a classificação de mosto	19
Tabela 2 – Modelos de isothermas de Freundlich e Langmuir não linear e linearizados, bem como equações utilizadas no SigmaPlot para os ajustes diretos dos modelos	37
Tabela 3 – Caracterização dos atributos físicos do Latossolo Amarelo Distrófico Psamítico fase de Floresta Subperenifólia relevo suave ondulado	39
Tabela 4 – Caracterização dos atributos químicos do Latossolo Amarelo Distrófico Psamítico fase de Floresta Subperenifólia relevo suave ondulado	42
Tabela 5 – Caracterização da vinhaça	46
Tabela 6 – Valores dos parâmetros dos modelos de Freundlich e Langmuir estimados por ajuste direto e ajustes lineares (no caso do modelo de Langmuir, dois modelos lineares foram empregados)	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Solo de Tabuleiro Costeiro	15
2.2 Vinhaça: Características e Propriedades	16
2.3 Importância do Potássio.....	19
2.4 Consequências do Potássio não aproveitado no Meio Ambiente	20
2.5 Adsorção ou Interação de Potássio	23
2.6 Referencial Teórico das Equações de Isotermas.....	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Local do estudo.....	27
3.2 Análises Físicas, Químicas e Mineralógicas de solo	29
3.3 Análise da Vinhaça	34
3.4 Ensaios de Equilíbrio em Lotes	35
3.5 Análise dos dados	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Caracterização Física, Química e Mineralógica de solo	38
4.1.1 Atributos do Solo.....	38
4.1.2 Atributos Físicos do Solo.....	38
4.1.3 Atributos Químicos do Solo.....	39
4.1.4 Atributos Mineralógicos do Solo	44
4.2 Dados obtidos da análise química da vinhaça	46
4.3 Cinética de Potássio.....	47
4.4 Interação da isoterma de sorção	48
4.4.1 Repetibilidade das curvas ajustadas	48
4.4.2 Média das isotermas	49

4.4.3 Parâmetros estimados pelos ajustes dos modelos das isothermas de Freundlich e Langmuir	51
5 CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

A vinhaça ou vinhoto é um subproduto originado da destilação do caldo de cana-de-açúcar durante o processo de industrialização para formar o açúcar ou álcool. Durante muitos anos, o material citado não tinha um descarte correto e nem legislação que orientasse e fiscalizasse os produtores. Inicialmente despejavam "in natura", com altíssima temperatura, no leito dos rios prejudicando assim toda biota. Um problema crescente, pois o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e o segundo gerador do mundo de etanol, executor de 20% da geração mundial e 20% das exportações globais (UNICA, 2013).

Com objetivo de evitar e reduzir os impactos ambientais da vinhaça foram realizados diversos estudos sobre seu uso, inclusive na fertirrigação, designando assim um local para a destinação, que quando aplicado corretamente, contribui para melhorar as características nutricionais da cana-de-açúcar, assim como os atributos físico-químicos do solo em condições controladas. Assim, legislações e normas foram criadas visando regulamentar sua disposição e utilização, como a criação da Norma Técnica da CETESB P4.231/05 (CETESB, 2007) e a indicação do Projeto de Lei 5.182/13 que regula o transporte, o armazenamento e a aplicação de vinhaça pela atividade sucroenergética. Esse último encontra-se em conclusão nas comissões de Agricultura, Pecuária, Abastecimento e Desenvolvimento Rural; de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável; e de Constituição e Justiça e de Cidadania (AGÊNCIA CÂMARA, 2013).

Além de fornecer água e nutrientes, a vinhaça introduz nutrientes em profundidade como o Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , enriquecendo os solos. A problemática surge da desproporção, de algumas Usinas, no entendimento que o potássio (K^+) é um dos elementos químicos de maior quantidade na vinhaça. Dessa forma, aplicando-se elevadas doses, esperam ter um grande lucro tanto na economia da adubação quanto na produtividade agrícola.

O potássio seja da água, do solo ou da vinhaça favorece a vegetação e o perfilhamento da cana-de-açúcar, pois atua em vários aspectos fisiológicos. Porém, o excesso desse nutriente pode desregular várias funções estruturais e metabólicas da planta, bem como, no solo, pode promover a lixiviação, contaminando as águas subterrâneas e até causar a salinização da área.

A contaminação depende de uma série de fatores relacionados à quantidade de resíduos depositados no solo, a concentração desses resíduos, ao clima local (precipitação pluvial) e a capacidade de retenção do solo (AMARAL SOBRINHO et al., 1992; BRITO, ROLIM & PEDROSA, 2009).

O solo adsorve a vinhaça (soluto) e atua como transportador dos componentes desse material. Tendo em vista os altos teores de nutrientes, como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ e, principalmente, de matéria orgânica, a disposição da vinhaça no solo como fertilizante, não deve ultrapassar, quando aplicada em grandes quantidades, a capacidade de retenção de água do solo (SILVA et al., 2007), uma vez que pode promover a lixiviação de vários desses elementos, principalmente o potássio, presente em grande quantidade nesse resíduo, com a possibilidade de alcançar e contaminar as águas subsuperficiais.

As recomendações para o rejeito de resíduos nos solos devem ser precedidas por estudos detalhados dos fatores que afetam a precipitação, a adsorção e o transporte das substâncias. Portanto, o objetivo da pesquisa consiste em avaliar as interações por meios de isotermas de adsorção do íon potássio (K^+), aplicados via vinhaça, em um solo representativo da zona canavieira (tabuleiro costeiro de textura arenosa).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Solo de Tabuleiro Costeiro

No litoral Brasileiro, principalmente na região Nordeste, é evidenciado um formato fisiográfico composto por tabularidades, que são reduzidos obstáculos transversais de solo, de onde deriva a denominação Tabuleiro Costeiro. Abrangem margens entre 50 a 60 km de largura, com declives tênues menores que 6% e altitudes entre 20 e 150 metros, que finalizam próximo ao mar (PEIXOTO, 2007).

Os tabuleiros costeiros são compostos de sedimentos derivados da formação de barreiras que ocasionam os Argissolos e Latossolos, empregados rotineiramente para o cultivo de cana-de-açúcar, gênero *Saccharum L.* (PEIXOTO, 2007).

Os Latossolos caracterizam-se por serem solos minerais, considerados não hidromórficos (ou seja, com excesso de água ou umidade em condições naturais), de grande profundidade (geralmente maiores que 2 metros) e nesse tipo de solo sendo identificado como horizonte B bastante espesso (maior que 50 cm) (NASCIMENTO & ABREU, 2012). Estes solos, encontram-se em fase avançada de intemperismo (processo físico e químico de degradação de rochas) apresentando perfil com horizontes uniformes, relacionados à aspectos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos. São basicamente argilominerais 1:1, óxidos, quartzo e alguns poucos minerais primários resistentes ao intemperismo (PERNAMBUCO, 2006). Expressam baixo risco à salinização, bom potencial para empregabilidade agrícola devido as boas condições de drenagem e grande profundidade efetiva (ROLIM NETO et al., 2009).

As cores dos Latossolos podem ser apresentadas entre vermelho escuro até amarelado, em tonalidade gradiente (mais escura superiormente e mais clara na região inferior) (NASCIMENTO & ABREU, 2012). Exibem estrutura granular em microescala, tornando-se solos secos macios e em solos úmidos altamente quebradiços (SOUSA & LOBATO, 2005).

Geralmente localizam-se em relevo plano com pequena ondulação e não ultrapassa 7% de declividade, favorecendo a mecanização em culturas. A empregabilidade desse tipo de solo pode ser para cultivos anuais ou perenes, pastagens e reflorestamento. São permeáveis mesmo quando argilosos quebradiços e de fácil manejo (NASCIMENTO & ABREU, 2012).

As restrições que o Latossolo revela, em geral, são a baixa fertilidade natural, existência de horizonte coeso, baixo teor de matéria orgânica e quando for o caso, o relevo movimentado que requer cuidados especiais para evitar a erosão (ROLIM NETO et al., 2009).

Devido a exploração do Latossolo é necessário conservar e manejar corretamente, para a proteção do ambiente e da biodiversidade atuante no solo (SOUSA & LOBATO, 2005).

Dessa forma é importante entender os fatores físicos, químicos e mineralógicos do solo pesquisado, bem como conhecer o resíduo da vinhaça através do processo de produção da cana-de-açúcar e etanol da Usina (PELUCO et al., 2013).

2.2 Vinhaça: Características e Propriedades

A vinhaça é a denominação para o rejeito do processo de destilação do caldo da cana-de-açúcar chamada vinho derivada do sistema de fermentação alcoólica. Ela pode ser conhecida também como: vinhoto, restilo, garapão, entre outros nomes regionais (ANA, 2009). Em estado físico líquido, possui coloração marrom claro, pois é formado de 93% de água e 7% de sólidos orgânicos e inorgânicos (figura 1) (ROLIM et al., 2013).

Figura 1 – Vinhaça em tanque de armazenamento.



Fonte: FREITAS, 2013.

De acordo com a Norma 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a vinhaça apresenta características poluidoras e é classificada como Resíduos classe II A -

Não inertes, pois tem essência de ser solúvel em água, fazer combustão e biodegradar-se (ABNT, 2004). Estima-se que a cada litro de etanol produzido é rejeitado de 7 à 16 litros de vinhaça, sendo despertada a preocupação ambiental devido ao crescimento da fabricação de álcool após 1950 com os incentivos do PROÁLCOOL (ANA, 2009).

A constituição da vinhaça é expressa por caráter ácido em termos de Potencial Hidrogeniônico (pH), excesso de matéria orgânica (MO), grandes concentrações de macro e micronutrientes, por isso são reaproveitados como fertilizantes orgânicos (ANA, 2009; PELUCO et al., 2013; ROLIM et al., 2013).

Porém existem as circunstâncias positivas e negativas evidenciadas por Ferreira & Monteiro (1987) apud Brito, Rolim e Pedrosa (2009)¹ sobre a utilização da vinhaça no solo. Na evidência benéfica, temos o aumento do pH, elevação da Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e o favorecimento de nutrientes como potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), fósforo, entre outros, além do desenvolvimento de agregação do solo, proporcionando mais retenção de água e evolução da microfauna e microflora do solo. Como fundamento desfavorável, pode causar desequilíbrio nutricional, poluição das águas de superfície e subterrâneas quando empregadas dosagem em excesso ou em solos inconvenientes para a prática.

Atualmente, no Brasil a vinhaça é constantemente aplicada na lavoura de cana-de-açúcar por dois fatores, primeiro que resolve o problema de descarte do resíduo que era despejado em corpos hídricos superficiais e segundo que substitui a adubação mineral devido sua fonte de constituintes benéficos à plantação. Por isso, a vinhaça proporciona dois tipos de lucro, o direto, por causa da economia na adubação e o indireto, por promover o crescimento da fertilidade natural do solo (ANA, 2009; ROLIM et al., 2013).

Logo, é fundamental entender o processo de aplicação da vinhaça na produção de cana-de-açúcar denominado de fertirrigação. Inicialmente, a escolha da cana é realizada pela separação das melhores espécies, das quais são retirados os toletes (mudas da cana-de-açúcar). O plantio e a colheita são efetivados de forma mecanizados (UNICA, 2013).

Da fabricação do álcool é descartada a vinhaça, que escoia da destilaria a temperatura de 60° à 78° C através de transporte dutoviário. O sistema consiste em tubulações de alumínio tanto para a vinhaça, como para as águas residuárias do processo de fabricação, até tanques de armazenamento chamados de poços. Esses poços devem ser revestidos por geomembranas

¹ Ferreira, E.S.; Monteiro, A.O. Efeitos da aplicação da vinhaça nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. **Boletim Técnico Copersucar**, v. 37, p. 3-7, 1987 apud BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R. Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.4, n.4, p.456-462, 2009.

sintéticas de impermeabilização (Asfáltica, PVC ou Geotextil) tanto para suportar a alta temperatura que a vinhaça sai da destilaria, quanto para evitar contaminação das águas subterrâneas (ANA, 2009; ROLIM et al., 2013; UNICA, 2013).

Dessa forma o mecanismo de aspersão da vinhaça além de atingir a lavoura, alcança os espaçamentos entre as plantas, dificultando o processo de decomposição realizado por microrganismos e elevando a concentração de nutrientes da vinhaça no solo (ANA, 2009; ROLIM et al., 2013; UNICA, 2013).

A vinhaça deve ser empregada com cuidado, verificando os níveis aceitáveis para não causar lixiviação dos nutrientes por ela proporcionada. Dessa maneira, é possível ajudar na produtividade da plantação de cana-de-açúcar e preservar o meio ambiente, sem acarretar desequilíbrio nutricional para as plantas e poluição das águas de superfície e subterrâneas (PELUCO et al., 2013).

Pesquisas sobre a fertirrigação com a vinhaça demonstram que esse tipo de manejo agrícola modifica a dinâmica do ciclo de elementos químicos do solo, conseqüentemente alterando a fertilidade e a nutrição das plantas, também por motivo do acréscimo da matéria orgânica, através de torta de filtro. O aumento do pH do solo se dá pelo aumento de cátions disponibilizados pela vinhaça no solo, que por anaerobiose (processo que as bactérias provocam reações químicas na ausência de oxigênio) são decompostas juntamente com a matéria orgânica (BRITO, ROLIM & PEDROSA, 2009; CARVALHO et al., 2013).

O uso excessivo da vinhaça pode provocar elevação de sais no local aplicado. Conseqüentemente o resultado é a expansão da argila quando irrigada e contração da argila quando em períodos sem irrigação, graças aos cátions que agirão de forma trocável com o solo. Os prejuízos desse fenômeno são a redução da infiltração dos nutrientes por causa do entupimento dos poros do solo, lixiviação de cargas e diminuição de matéria orgânica por causa da ação das bactérias no processo de decomposição da vinhaça (ROLIM et al., 2013; UYEDA et al., 2013).

Estudos evidenciam a associação da cana-de-açúcar com os componentes presentes na vinhaça (Tabela 1), principalmente o potássio que é absorvido em grande quantidade durante o crescimento da planta (RODRIGUES, 1995; QUINTANA, 2010).

Tabela 1 - Constituição química da vinhaça de acordo com a classificação de mosto.

Parâmetro	Melaço	Caldo	Misto
pH	4,2 – 5,0	3,7 – 4,6	4,4 – 4,6
Temperatura (°C)	80 - 100	80 - 100	80 - 100
DBO (mg.L ⁻¹ O ₂)	25.000	6.000 – 16.500	19.800
DQO (mg.L ⁻¹ O ₂)	65.000	15.000 – 33.000	45.000
Sólidos totais (mg.L ⁻¹)	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg.L ⁻¹)	60.000	20.000	40.000
Sólidos Fixos (mg.L ⁻¹)	21.500	3.700	12.700
Nitrogênio (mg.L ⁻¹ N)	450 – 1.610	150 - 700	480 - 710
Fósforo (mg.L ⁻¹ P ₂ O ₅)	100 - 290	10 - 210	9 - 200
Potássio (mg.L ⁻¹ K ₂ O)	3.740 – 7.830	1.200 – 2.100	3.340 – 4.600
Cálcio (mg.L ⁻¹ CaO)	450 – 5.180	130 – 1.540	1.330 – 4.570
Magnésio (mg.L ⁻¹ MgO)	420 – 1.520	200 - 490	580 - 700
Sulfato (mg.L ⁻¹ SO ₄)	6.400	600 - 760	3.700 – 3.730
Carbono (mg.L ⁻¹ C)	11.200 – 22.900	5.700 – 13.400	8.700 – 12.100
Relação C/N	16 – 16,27	19,7 – 21,7	16,4 – 16,43
Matéria Orgânica (mg.L ⁻¹)	63.400	19.500	3.800
Substâncias redutoras (mg.L ⁻¹)	9.500	7.900	8.300

DBO: Demanda bioquímica de oxigênio; DQO: Demanda química de oxigênio.

Fonte: MARQUES, 2006 apud ROSSETTO & SANTIAGO, 2007.

2.3 Importância do Potássio

O potássio segundo a NBR 13805 (ABNTa, 1997) é caracterizado como elemento químico, com número atômico 19 e massa atômica 39,102 g.mol⁻¹. Pertencente à família dos metais alcalinos, em quantidade expressiva na natureza na forma composta. Encontrado em estado sólido, de coloração branco metálico e muito reativo (ABNTa, 1997).

Em relação à disposição no Meio Ambiente, o potássio está presente em todas as fontes de água. Na água potável, apresenta baixas concentrações e não desempenha risco à saúde (CETESB, 2012).

Na cana-de-açúcar, o potássio é estimulante das enzimas agregada ao metabolismo das proteínas e carboidratos. Também é o cátion mais importante do citoplasma, pois equilibra as trocas aniônicas e auxilia na regulação osmótica (ANDERSON & BOWEN, 1992 apud QUINTANA, 2010)².

Quando a cana-de-açúcar apresenta deficiência de potássio nas folhas envelhecidas é perceptível o aspecto fisiológico de mosqueado (partes de cores verde-claras e escuras) com

² ANDERSON, D. L.; BOWEN, J. E. **Nutrição de cana-de-açúcar**. Tradução de José Orlando Filho. Piracicaba: POTAFOS, p. 40, 1992 apud QUINTANA, K. A. **Irrigação e fertirrigação por gotejamento para cana-de-açúcar na presença e ausência de boro**. 2010. 70 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista: Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP. 2010.

bordas cloróticas (marrom) causando doença com decomposição dos tecidos (necrose). Essa carência ocasiona ainda, menor quantidade de sacarose no colmo e diminuição da fotossíntese devido à oclusão dos estômatos e menor assimilação de gás carbônico (CO_2) (VITTI et al., 2005; MARQUES, 2010).

A concentração de potássio da vinhaça está relacionada ao tipo de material da qual foi proveniente. O vinhoto, resultante da fermentação do melão, é mais concentrado, do que o oriundo da fermentação do caldo de cana, o que acarreta diferentes valores químicos (ROSSETTO & SANTIAGO, 2007).

Outra fonte de potássio é o solo que de acordo com o tipo de mineral de origem, da execução de fertilizantes, da Capacidade Troca Catiônica e da ciclagem dos nutrientes pelas plantas pode estar disponível ou como reserva desse elemento. O potássio do solo está na forma de cátion monovalente (K^+) que pode ser classificado de forma trocável (reserva disponível para as plantas) e não-trocável (reserva não disponível, que pode sofrer transformação para tornar-se disponível), portanto sendo importantes meios para a nutrição da cultura implantada (WERLE, GARCIA & ROSOLEM, 2008).

Por isso, o teor de potássio presente na vinhaça e a avaliação química do solo devem ser considerados ao estimar a quantidade do vinhoto a ser empregado no canavial. A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) designa que a quantidade de vinhaça para cada talhão, deve ser de acordo com a saturação de potássio e da determinação da capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, com intenção de minimizar efeitos prejudiciais ao Meio Ambiente (ROSSETTO & SANTIAGO, 2007).

2.4 Consequências do Potássio não aproveitado no Meio Ambiente

O uso contínuo e com medidas descontroladas e/ou excessivas de vinhaça no solo, acarreta vários problemas ambientais. Conseqüentemente, o potássio oriundo desse material no solo pode se apresentar como adverso as boas condições do meio ambiente.

O vínculo entre potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) disponíveis no vinhoto acontece nas plantas e no solo, de formas a serem criteriosamente observadas e tornaram-se objeto investigativo em vários estudos. Esses elementos possuem propriedades químicas

semelhantes, disputando sítios de adsorção, absorção e transporte na parte exterior das raízes da cana-de-açúcar (FAGERIA et al., 1991 apud REIS JUNIOR, 2001)³.

A mudança e o aumento da concentração de íons disponíveis na solução do solo é um impacto ocasionado pelo excesso de "nutrientes" da vinhaça (CRUZ, 2013). No estudo de Brito, Rolim e Pedrosa (2005) foi evidenciado que em quantidades crescentes de vinhaça, foram elevadas as concentrações de potássio trocável as camadas mais superficiais de Argissolos, Espodosolos e Nitossolos. Embora a aglutinação de potássio no solo nos estudos de Cunha et al. (1981) apud Silva, Griebeler e Borges (2007)⁴ não foi significativa, pois o potássio foi mantido até 0,50 m de profundidade, com pequena lixiviação do mesmo via drenagem. Bebé (2007) analisou Espodosolos com diferentes históricos de aplicação de vinhaça e um Argissolo Amarelo com 10 anos de emprego de vinhoto e concluiu que em todas as profundidades houve alterações dos níveis de potássio no solo, principalmente na camada inicial até 0,20m.

De acordo Silva e Trevizam (2015), as relações iônicas do solo interferem na capacidade da planta absorver os nutrientes, principalmente pela disputa de elementos transportados e/ou concentrados na solução do solo. As propriedades físico-químicas dos elementos químicos, disponíveis no solo como íons monovalentes ou bivalentes diferenciaram em três conceitos para essas relações iônicas: sinergismo, antagônica e inibição.

A *Inibição* ocorre quando a absorção de um elemento é danificada por outro. Esse conceito pode ser classificado de dois tipos (SILVA & TREVIZAM, 2015):

- Inibição por competição que significa dois íons disputarem o mesmo sítio do transportador, minimizando a atuação do íon de menor concentração. Acontece com elementos de propriedades físico-químicas similares com valência e raio iônico. Ocorrem geralmente com cátions como potássio (K^+) e sódio (Na^+).

³ FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of fields crops**. New York: M. Dekker, p. 476, 1991 apud REIS JUNIOR, R. A. Probabilidade de resposta da cana-de-açúcar à adubação potássica em razão da relação $K^+ (Ca^{2+}+Mg^{2+})^{-0,5}$ do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 9, p. 1175-1183, set. 2001.

⁴ Cunha, R. C. A.; Costa, A. C. S.; Maset Filho, B.; Casarini, D. C. P. Effects of irrigation with vinasse and dynamics of its constituents in the soil: I – physical and chemical aspects. **Water Science Technology**, v.19, n.8, p.155-165, 1981 apud 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.

- Inibição não competitiva que ocorre a medida que um elemento não disputa o mesmo sítio do transportador, porém propiciam carência de outro elemento. Acontece com os íons potássio (K^+) atuando sobre o íon cálcio (Ca^{2+}) e o íon magnésio (Mg^{2+}).

Dessa forma, o aumento de potássio na solução do solo ocasiona minimização de cálcio e magnésio pelo efeito de diluição explicado por Silva e Trevizam (2015). Mesmo que uma cultura tenha déficit de cálcio e magnésio, mas possua teores de potássio suficientes, não existem danos ao crescimento da planta e nem perda na produção. Porém, o excesso de potássio acarreta prejuízo na produção, devido o aumento do efeito de diluição (SILVA & TREVIZAM, 2015).

Em especial na cana-de-açúcar, a quantidade excedente de potássio prejudica a cristalização do açúcar, minimizando seu rendimento e age como alimentação para as leveduras que auxiliam o processo produtivo do álcool (RODRIGUES, 1995; KYOTOKU, 2011).

E como foi mencionada anteriormente, a inibição por competição entre Na^+ e K^+ pode influenciar no aumento da concentração de sais no solo e causar risco de salinização em casos mais graves (MADEJÓN, 2001). Assim como o aumento de potássio e cálcio pode influenciar na carência de magnésio, devido à inibição não competitiva. Essa inibição consiste no K^+ transpassar a membrana plasmática com elevada velocidade, minimizando a capacidade de absorver cátions mais lentos como Ca^{2+} e Mg^{2+} . A prioridade do potássio acontece por ter menor grau de hidratação em comparação com os cátions bivalentes e por ser classificado como monovalente (SILVA & TREVIZAM, 2015).

Assim, alguns aspectos que podem ser elencados devido as relações iônicas são: a influência no contato entre a raiz da planta e os nutrientes, bem como a desorganização da nutrição da planta por deficiência, toxicidade ou menor rendimento da cultura. (SILVA & TREVIZAM, 2015).

O solo tem capacidade de transportar e também de reter o potássio, caso não esteja acima do teor recomendado, como citado por Lyra et al. (2002), onde os níveis investigados apresentaram valores bem menores do que a vinhaça pura. Bem como, também citado por Brito, Rolim e Pedrosa (2007), que apresentaram após 30 dias com doses mínimas e máximas de vinhaça, que os solos transportaram e mantiveram em profundidade, baixas concentrações de K^+ em Argissolo e Espodosolo.

Ainda é importante destacar duas formas de movimentação desse elemento no solo proveniente da fertirrigação: Na estação chuvosa o potássio lixivia para regiões além do

sistema radicular da cana-de-açúcar e na estação seca, o deslocamento ocorrer até 0,6 m de profundidade e com alcance horizontal de 1,20 m (QUINTANA, 2010). Entender essas formas acaba ajudando a combater as perdas de potássio durante o manejo da cultura, pois o potássio da vinhaça fertirrigada é recomendado para solos de textura arenosa e com teor de matéria orgânica reduzido (URIU et al., 1977; VILELA et al., 1986 apud QUINTANA, 2010)⁵.

O íon potássio da vinhaça não é poluidor potencial, porém em elevadas concentrações beneficia a estruturação de complexos químicos com elementos poluentes, como o fosfato e nitrato (CRUZ, 2013). Além disso, no estudo de Werle, Garcia e Rosolem (2008), a lixiviação do potássio foi acentuada no Argissolo com textura arenosa, embora a maior lixiviação tenha ocorrido no solo de textura argilosa, considerando aplicações anteriores do material oriundo da adubação potássica.

2.5 Adsorção ou Interação de Potássio

A relação entre a área superficial das partículas sólidas (solo) e a fase líquido-gasosa (soluto) é baseada na agregação e transporte de íons, moléculas e/ou compostos que engloba o procedimento de troca catiônica (ROWE, QUIGLEY & BOOKER, 1995; ZUQUETTE, SILVA JUNIOR & GARCIA, 2008; NICOCHELLI, 2011).

Para Ritter, Leite e Machado (2001), sorção é definida através do coeficiente de distribuição ou de partição que dá a relação entre a quantidade do soluto (espécie química dissolvida) adsorvida pela partícula sólida (S) e a concentração, em equilíbrio, da mesma espécie química na solução em estudo. O fenômeno de transferência de massa no qual as partículas na fase líquida unem-se à fase sólida é denominado Sorção (MARTINS, 2006), que pode ser classificada em:

A adsorção é definida como o agrupamento superficialmente de partículas químicas a um meio sólido (ZUQUETTE, SILVA JUNIOR & GARCIA, 2008). Acontece devido às ligações químicas de dipolo-dipolo, forças de Van der Waals e pontes de hidrogênio (NICOCHELLI, 2011).

⁵ VILELA, L.; SILVA, J.E. da; RITCHEY, K.D.; SOUZA, D.M.G. de. Potássio. In: GOEDERT, W.J. **Solos do cerrado: tecnologias e estratégias de manejo**. Brasília: EMBRAPA/CPAC, p. 203-222, 1986 *apud* QUINTANA, K. A. **Irrigação e fertirrigação por gotejamento para cana-de-açúcar na presença e ausência de boro**. 2010. 70 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista: Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP. 2010.

O inverso da adsorção é designado dessorção que consiste na liberação da molécula investigada para a solução do solo, ocasionando nova estabilidade da solução (CORREIA et al., 2007; FÜHR et al., 1998 apud NICOCELLI, 2011)⁶.

A absorção consiste na imersão da partícula química para a parte interna do meio absorvente (BOSCOV, 1997 apud NICOCELLI, 2011)⁷.

A sorção química resulta da união das partículas químicas, promovendo ligações químicas com moléculas não livres na superfície do sólido (NICOCELLI, 2011).

A troca iônica ocorre quando há mudança entre partículas químicas compatíveis eletricamente. As argilas do solo, os oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, assim como as substâncias orgânicas (matéria orgânica, húmus, entre outros) possuem grande capacidade de troca iônica por possuírem cargas eletricamente negativas (ânions) que possibilita a união com as cargas eletricamente positivas (cátions) (NASCENTES, 2006).

Inicialmente, a sorção ocorre na matéria orgânica, porém quando esta é menor que 10% no solo as superfícies minerais prevalecem e comandam a sorção (PIGNATELLO, 1989). Embora que em menores quantidades ou em solos arenosos, ainda sim a matéria orgânica auxilia na permanência de cátions (COSTA, 2002).

A importância dos estudos sobre sorção é descrita principalmente por motivo de analisar a gestão qualitativa da água, bem como de verificar e remediar locais contaminados para evitar desastres ambientais (QUEIROZ, 2005; NORTHCOTT et al., 2010).

As isotermas de sorção são curvas que revelam a relação entre o teor da concentração de equilíbrio (líquido) e a sorção (sólido) (REDDI & INYANG, 2000). O resultado da sorção é adquirido nos ensaios de equilíbrio em lote e nas análises químicas do solo e da solução. No qual os ensaios devem ser realizados em tempos estabelecidos para que aconteça a máxima sorção (ZUQUETTE, SILVA JUNIOR & GARCIA, 2008).

⁶ FÜHR, F.; OPHOFF, H.; BURAUDEL, P.; WANNER, U.; HAIDER, K. Modification of the definition of bound residues. In: FÜHR, F.; OPHOFF, H. **Pesticide bound residues in soil**. Weinheim: Wiley-VCH, p. 175-176, 1998 apud NICOCELLI, L. M. **Sorção ao potássio de diferentes materiais submetidos à aplicação de vinhaça**. 2011. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT. 2011.

⁷ BOSCOV, M. E. G. **Contribuição ao Projeto de Sistemas de Contenção de Resíduos Perigosos Utilizando Solos Lateríticos**. 1997. 259 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo, 1997 apud NICOCELLI, L. M. **Sorção ao potássio de diferentes materiais submetidos à aplicação de vinhaça**. 2011. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT. 2011.

2.6 Referencial teórico das Equações de Isotermas

As equações de isotermas classificadas como não linear e linear (principalmente as Isotermas de Freundlich e Langmuir) são utilizadas frequentemente para ajustar os resultados de isotermas obtidos empiricamente (REDDI & INYANG, 2000).

As diversas combinações químicas e solo nos ensaios de lotes em equilíbrio, principalmente para as altas concentrações de soluto são ajustadas pelas equações de adsorção não lineares. Uma capacidade de sorção limitada resulta em isotermas de adsorção não lineares. E o modelo comumente empregado é o da equação de Freundlich (Equação 1 e 2), onde o coeficiente de Freundlich relacionadas com a capacidade de adsorção (K_F) e a constante estabelecida com a intensidade de adsorção (n) dependem das condições do sistema (SHACKELFORD, 1993).

$$S = K_F C_{eq}^n \quad (1)$$

Onde: S é a quantidade de massa adsorvida na superfície; K_F é o coeficiente de partição indicando o grau de absorção; C_{eq} é a concentração de equilíbrio da solução; n é o expoente de Freundlich, geralmente associado aos sítios de ligação.

A equação 2 apresenta o modelo de Freundlich sob forma linearizada (YAMAMURA, 2009):

$$\log S = \log K_F + n \log C_{eq} \quad (2)$$

Segundo Yamamura (2009), o modelo de Freundlich hipoteticamente indica que os íons são infinitamente aglomerados na superfície do adsorvente, visto que a quantidade de sítios de adsorção é muito maior do que a quantidade de moléculas de soluto. Para Rowe, Quigley e Booker (1995), a isoterma de Freundlich é considerada o modelo que representa a melhor descrição quantitativa da sorção. Reddi e Inyang (2000) afirmam ainda que a isoterma linear é um caso especial da isoterma de Freundlich, com o expoente da concentração de equilíbrio da solução igual a um.

A isoterma de Langmuir fundamenta-se na hipótese de que a sorção está limitada a uma única camada de moléculas da substância em contato com a superfície das partículas sólidas.

Assim as forças de atração propagadas entre o soluto e o sorvido são de curta duração (Equação 3) (BORGES, 1996 apud COSTA, 2002)⁸.

$$S = \frac{S_M K_L C_{eq}}{1 + K_L C_{eq}} \quad (3)$$

Onde: S é a quantidade de massa adsorvida na superfície; K_L é a Constante de Langmuir; S_M é a capacidade máxima de sorção da superfície sólida; C_{eq} é a concentração de equilíbrio da solução.

Segundo Yamamura (2009), o modelo de Langmuir é também empregado no ajuste matemático de dados experimentais, do processo de adsorção cujas superfícies são homogêneas. Porém ele explica que devido a limitação da quantidade de sítios de adsorção, esse modelo indica um aumento linear da adsorção com aumento da concentração do soluto, aproximando-se de um valor constante.

Portanto, para obter a constante de Langmuir associada à energia de adsorção, é empregada a equação do modelo de Langmuir linearizada, a fim de verificar se ocorreu bom ajuste dos dados experimentais aos modelos não lineares.

As isotermas, de forma abrangente, são representações do soluto com o solo. Embora as constantes dos modelos estejam relacionadas ao tipo de solo, soluto utilizado e as circunstâncias ambientais e por isso necessitam da execução de ensaios experimentais, que mesmo assim não são interpretações reais das deparadas em campo. Logo, as isotermas são representações qualitativas do fenômeno que ocorre no campo (BORGES, 1996 apud COSTA, 2002)⁸. Portanto, as isotermas devem ser empregadas somente como representação qualitativa da ocorrência que acontece no ambiente natural ponderando na escolha da curva que melhor se adapta ao desfecho alcançado na execução dos procedimentos analíticos (YONG et al., 1992 apud NASCENTES, 2003)⁹.

⁸ BORGES, A. F. **Avaliação dos mecanismos de transporte de Hexaclorociclohexano (HCH) no Solo da Cidade dos Meninos, Duque de Caxias, RJ.** 1996. 205 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 1996 *apud* COSTA, P. **Avaliação em laboratório de parâmetros de transporte do chorume no Aterro Sanitário de Saúpe/BA.** 2002. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. – Rio de Janeiro, RJ. 2002.

⁹ YONG, R. N.; MOHAMED, A. M. O.; WARKENTIN, B. P. Principles of Contaminat Transport in soils. Developments in Geotechnical Engineering 73. **Elsevier Science Publishers** B. V. The Netherlands.p. 327, 1992 *apud* NASCENTES, C. R. **Coeficiente de dispersão hidrodinâmica e fator de retardamento de metais pesados em solo residual compactado.** 2003. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2003.

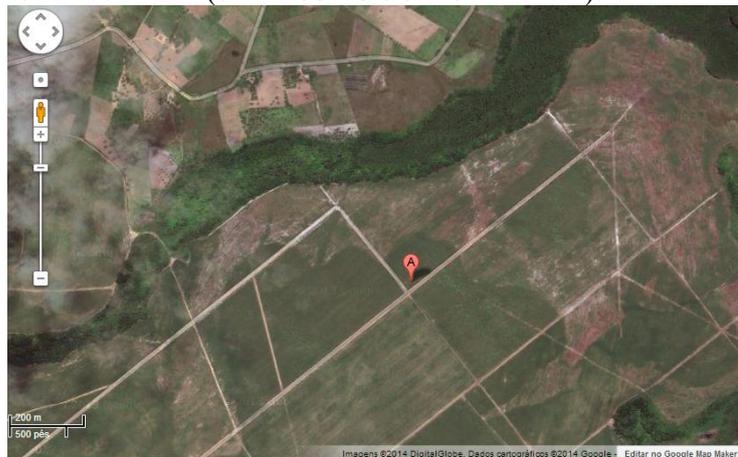
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Local do estudo

A pesquisa foi realizada na Usina São José, do grupo empresarial Cavalcanti Petribu, que iniciou sua história em 1710 com o oficial Capitão João Cavalcanti de Albuquerque. Atualmente possui área com 28 mil hectares, sendo 17 mil hectares de extensão estabelecida para o plantio da cana-de-açúcar (USINA SÃO JOSÉb, 2013).

A área estudada (figura 2) possui histórico de seis anos de utilização de vinhaça, proveniente da fermentação do caldo de cana-de-açúcar, na fertirrigação. Onde uma vez por ano foi aplicada lâminas de 20 mm.ha⁻¹(nos primeiros 5 anos) e no último ano foi alterada a lâmina para 30 mm.ha⁻¹ de vinhaça diluída.

Figura 2 – Localização da amostragem de solo da Usina São José – PE (7° 42' 33" S e 34° 54' 22" W).



Fonte: Google maps, 2014.

No poço 1 é realizado a diluição da vinhaça 150 m³ de água para 150 m³ de vinhaça, a fim de evitar problemas de infiltração, rompimentos e desastres ambientais e equilibrar a vinhaça com a temperatura ambiente. Porém devido o armazenamento à céu aberto os tanques proporcionam mau cheiro (devido envelhecimento da vinhaça) e insetos vetores de doenças (USINA SÃO JOSÉa, 2013).

Os poços 2 e 3 recebem a vinhaça diluída e redistribui para regiões mais distantes na propriedade, sendo aplicada na plantação de cana-de-açúcar por meio da aspersão. A aplicação da vinhaça, assim denominada de fertirrigação, é feita em aproximadamente 90 m de largura (Figura 3) (ANA, 2009; ROLIM et al., 2013; UNICA, 2013).

Figura 3 – Etapas do transporte da vinhaça na Usina São José.



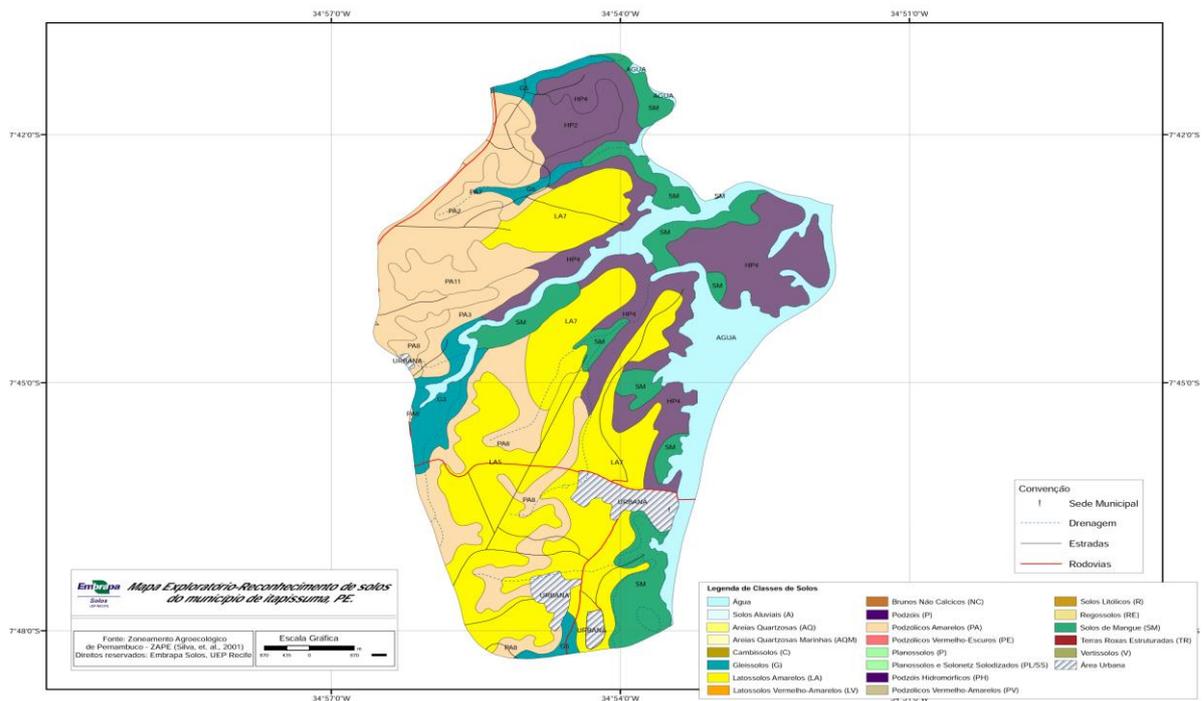
Fonte: FREITAS, 2013.

Os solos de Itapissuma são geralmente profundos (podendo existir solos rasos a pouco profundos), abundantemente drenados e com diminuição da fertilidade natural. O clima é denominado Tropical chuvoso com verão seco, com média anual de precipitação de 1.867 mm. A vegetação é composta por Floresta Subperenifólia de Restinga (CPRM, 2005).

A definição de Tabuleiro Costeiro está baseada nas características morfológicas, geológicas e de localização, ou seja, de acordo com sua forma tabular, quebra abrupta de relevo (escarpas), sua composição sedimentar e sua localização costeira (PEREIRA & CESTARO, 2012).

A área da pesquisa está estabelecida na mesorregião Metropolitana e na Microrregião de Itamaracá do Estado de Pernambuco, na cidade de Itapissuma. Demarcada ao norte com Goiana, ao sul com Igarassu, a leste com Itamaracá e a oeste com Igarassu. O local teve o solo classificado como LATOSSOLO AMARELO Distrófico psamítico fase de floresta subperenifólia relevo suave ondulado (Figura 4) (EMBRAPA, 2013) e está situado a 15 metros de altitude em relação ao nível do mar e com coordenadas geográficas de 7° 42' 33" S e 34° 54' 22" W (CPRM, 2005).

Figura 4 – Mapa de solo de Itapissuma.



Fonte: EMBRAPA, 2000.

3.2 Análises Físicas, Químicas e Mineralógicas de solo

As caracterizações física, química e mineralógica das amostras, provenientes do solo cultivado com a cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça, foram realizadas nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, com 3 repetições por amostra, executadas nos laboratórios de Avaliação da Contaminação do Solo, Fertilidade de Solo e Física de Solo do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Também foram utilizados para a realização das análises, os laboratórios de Física de Solo, Química de Solo e Mineralogia de Solo pertencentes à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), seguindo as metodologias descritas no Manual de métodos de análise de solos (EMBRAPA, 2011) e Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes (EMBRAPA, 2009).

Para a classificação do solo foi utilizado o método de tradagem. As tradagens foram realizadas até 2m de profundidade, onde foram observadas e registradas as características de profundidade, textura (ao tato), coloração, entre outros aspectos. Em seguida, a classificação final foi concluída baseada no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), sendo o solo definido como LATOSSOLO AMARELO Distrófico psamítico fase de floresta subperenifólia relevo suave ondulado (EMBRAPA, 2013).

Para a determinação da densidade do solo, foi empregado o amostrador do tipo Uhland, cujas dimensões do anel volumétrico foram de 0,051 m de diâmetro e 0,05 m de altura (volume de $1,02 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$), mantendo-se as estruturas do solo não deformada. Após a retirada do anel do amostrador, foi efetuado o toilette, tampado, envolto em fita isolante (EMBRAPA, 2011). As densidades globais do solo foram determinadas em sextuplicatas representativas para as camadas de solo de 0 – 20, 20 – 40 e 40 – 60 cm.

Também foram coletadas amostras de deformadas, com auxílio de pá, armazenadas em sacolas plásticas, identificadas e transportadas até os laboratórios. Estas amostras de solo foram utilizadas para as determinações Físicas, tais como: granulometria do solo (peneiramento e sedimentação), densidade de solo e das partículas, além de porosidade total.

As amostras deformadas úmidas, após a coleta no campo, foram secas ao ar por 24 horas (TFSA) e destorroadas em peneiras de malha de 2 mm inicialmente. Após o procedimento, foram pesadas, dispostas em estufa a temperatura de 105° C até atingir peso constante (EMBRAPA, 2011).

A análise granulométrica foi estabelecida o método do hidrômetro sugerido por Gee & Or (2002), alterado e relatado por Almeida (2008), no qual ocorre peneiramento da fração areia, dispersão mecânica e química (acrécimo de dispersante), que promove a sedimentação da fração silte evidenciando a argila na suspensão. O solo foi seco em estufa a temperatura de 105° C até atingir peso constante, destorroado, peneirado, pesado, agitado com dispersante (solução de hexametáfosfato de sódio tamponada com carbonato de sódio) durante 16 h no agitador rotatório tipo Wagner a 50 rpm e transferido para peneira de malha 0,053 mm para retenção de areia. A areia obtida foi seca em estufa por 24 horas à temperatura de 105° C , foi posicionado no dessecador para esfriar e pesada para obtenção da fração areia. Com relação à fração argila, após repouso de 24 horas da agitação, foi efetuada a leitura com hidrômetro. A fração silte é calculada pela diferença dos sólidos do solo e as frações areia e argila.

Para a determinação da densidade de partículas, foi necessário um pré-tratamento no solo, utilizando-se o peróxido de hidrogênio para reduzir o teor de matéria orgânica. Esse pré-tratamento faz-se necessário, pois o solo foi fertirrigado com vinhaça e aplicado torta de filtro, ambos ricos em matéria orgânica, que alteram a quantidade de partículas de sólidos do solo. Após esse procedimento, foi pesado 20 g de solo seco em estufa à 105° C e empregado o método do balão volumétrico, que utilizando 50 mL de álcool etílico, subtraindo o volume de álcool gasto para preencher o espaço poroso do solo. A densidade de partícula foi determinada usando a equação 4 (FLINT & FLINT, 2002).

$$D_p = \frac{M_{ss}}{V_s} \quad (4)$$

Onde: D_p é a densidade de partículas sólidas, g.cm^{-3} ; M_{ss} é a massa do solo seco em estufa, g; V_s é o volume sólidos, cm^3 .

Para a análise da densidade de solo, as amostras de solo foram obtidas com o auxílio do amostrador de Uhland, que consiste em obter amostras volumétricos indeformadas. Assim foi necessário determinar os cálculos por meio da equação 5 (FLINT & FLINT, 2002).

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_t} \quad (5)$$

Onde: D_s é a densidade de solo, g.cm^{-3} ; M_{ss} é a massa do solo seco em estufa, g; V_t é o volume total do solo, cm^3 .

O método empregado para determinar a porosidade total (Equação 6) foi o da estimativa (indireto), baseado nos valores de densidade de partícula e densidade de solo (EMBRAPA, 2011).

$$PT(\%) = \left(1 - \frac{D_s}{D_p} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Onde: PT é a porosidade total, (%); D_s é a densidade do solo, (g.cm^{-3}); D_p é a densidade de partícula (g.cm^{-3}).

As determinações químicas estabelecidas foram pH (H_2O e KCl), Carbono Orgânico (CO), Fósforo disponível e remanescente, Cálcio trocável (Ca^{2+}), Magnésio trocável (Mg^{2+}), Potássio trocável (K^+), Sódio trocável (Na^+), Alumínio trocável (Al^{3+}), Enxofre trocável (S^{2-}), Acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$), Nitrato, micronutrientes essenciais: Zinco (Zn), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Boro (B) e Condutividade elétrica. Os atributos de Matéria Orgânica (MO), Hidrogênio extraível (H^+), Capacidade de Troca Catiônica Efetiva (CTC_{ef}) e Capacidade de Troca Catiônica à pH 7,0, Soma de bases, saturações por Bases, Alumínio, Sódio foram estimados através de cálculos.

Para determinar o potencial hidrogeniônico (pH) do solo, foi preparado o extrato de saturação do solo e no peagâmetro de Bancada, foi feita aferição eletroquímica da

concentração efetiva dos íons H^+ presentes na solução do solo. No procedimento, foram utilizados água e solução de Cloreto de Potássio (KCl). O valor de variação do pH (ΔpH) foi obtido pela subtração do pH em cloreto de potássio (KCl) do pH em água (H_2O), ou seja, $\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H_2O}$ (EMBRAPA, 2011).

O carbono orgânico (CO) foi estabelecido pelo método de oxidação da matéria orgânica com dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$), conhecido também como método do Walkey-Black. Titulado com solução padrão de sulfato ferroso amoniacal ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) $0,1 \text{ mol.L}^{-1}$ e a Matéria Orgânica (MO) é calculada pela multiplicação do carbono orgânico pelo fator médio de carbono presente na composição do húmus (1,724) (EMBRAPA, 2011).

Para a determinação do fósforo “disponível”, utilizou-se a solução extratora de Mehlich 1 (Ácido Clorídrico $0,05 \text{ M}$ + ácido sulfúrico $0,0125 \text{ M}$) na qual a intensidade da cor do complexo fosfomolibdico formado na redução do molibdato com o ácido ascórbico foi indicado valor correspondente no aparelho Espectrofotômetro (EMBRAPA, 2009). O teor de fósforo remanescente foi determinado pelo contato do solo com solução de Cloreto de Cálcio $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$ contendo 60 mg.L^{-1} de fósforo, sendo o extrato verificado, após os procedimentos necessários, no mesmo Espectrofotômetro mencionado (EMBRAPA, 2009).

Os valores dos cátions trocáveis de Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}) e Alumínio (Al^{3+}) foram obtidos por meio do preparo do solo com solução extratora de Cloreto de Potássio (KCl) 1 mol.L^{-1} , e determinado por espectrofotometria de absorção atômica. Onde Ca^{2+} e Mg^{2+} foram determinados com solução de lantânio no espectrofotômetro de absorção atômica. E o Alumínio foi determinado mediante azul de bromotimol, por titulação com solução de Hidróxido de Sódio ($NaOH$) $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$ (EMBRAPA, 2011).

Para se determinar os teores trocáveis de Sódio (Na^+) e Potássio (K^+) pelo método de fotometria de chama, foi empregado o método direto no aparelho fotômetro de chama utilizando como extrator do solo a solução de Mehlich 1 (EMBRAPA, 2011).

O Enxofre trocável (S^{2-}) foi determinado por gravimetria utilizando o ataque da solução do solo com Ácido Clorídrico (1:1), precipitação com Cloreto de Bário ($BaCl_2$), Calcinação com Sulfato de Bário ($BaSO_4$) e determinação gravimétrica do precipitado, que é calculado pela multiplicação do peso do precipitado calcinado pelo fator de conversão do Sulfato para Enxofre (68,65) (EMBRAPA, 2011).

A acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$) foi determinada pela extração com solução de Acetato de Cálcio $Ca(C_2H_3O_2)_2$ com indicador fenolftaleína, seguido de titulação com solução de Hidróxido de Sódio $0,025 \text{ mol.L}^{-1}$, onde é possível calcular o teor de acidez potencial (Equação 7) (EMBRAPA, 2009).

$$H^+ + Al^{3+} = (L - Lb) \cdot 1,65 \quad (7)$$

Onde: $H^+ + Al^{3+}$ é a acidez potencial, ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$); L é a solução gasta na titulação da amostra, (mL); Lb é a solução gasta na titulação da prova em branco, (mL); 1,65 fator de correção, decorrente das alíquotas tomadas e da limitação da metodologia extrai apenas 90% da acidez.

O Hidrogênio extraível (H^+) foi estimado por meio da subtração do Alumínio (Al^{3+}) da quantidade de acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$) (EMBRAPA, 2011).

Na determinação do nitrato do solo, foi utilizado o método de Salicilato de Sódio ($C_7H_5NaO_3$) que é baseado na reação eletrofílica de substituição aromática, com auxílio do Espectrofotômetro (YANG et al., 1998).

Para a obtenção dos teores dos micronutrientes essenciais como: Zinco (Zn), Cobre (Cu), Ferro (Fe) e Manganês (Mn), foram extraídos com a solução extratora Mehlich 1 e determinados por espectrofotômetro de absorção atômica. E o Boro (B) foi identificado pela solubilização do B do solo pelo Cloreto de Bário ($BaCl_2 \cdot 2H_2O$) 0,125 % a quente (EMBRAPA, 2009).

A determinação da Condutividade Elétrica (CE) do extrato de saturação de solo foi obtida por leitura direta num condutivímetro, que indicou a medida da CE (EMBRAPA, 2011).

Dessa forma, foi possível calcular com os valores obtidos nas marchas analíticas: Variação de pH (ΔpH), Soma de Bases Trocáveis (SB), Percentagem de Saturação por Bases (V), Percentagem de Saturação por Alumínio (m) e Percentagem de Saturação por sódio, com fórmulas mencionadas em Embrapa (2011).

A CTC efetiva foi calculada pela soma dos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ e Al^{3+} trocáveis (LOPES & GUILHERME, 2004). E a CTC a pH 7,0, pela soma dos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ e $H^+ + Al^{3+}$ (EMBRAPA, 2011).

A análise mineralógica foi determinada para a fração argila nas três camadas definidas no estudo. Foi eliminada das amostras de TFSA a matéria orgânica com peróxido de hidrogênio, para evitar interferências nos resultados, e realizadas as dispersões mecânica e química com Hexametáfosfato de Sódio no agitador tipo Wagner por 16 h. A coleta da fração argila foi efetuada por sifonação e o volume da proveta foi preenchido com mais dispersante até a retirada total da amostra.

A fração argila foi analisada como argila natural (pó não orientado). Em seguida, foi seca em estufa à 105° C, macerada em almofariz de ágata, peneirada com passagem de 48 mesh, na qual foi submetida à pré-tratamentos para eliminação de carbonatos e óxidos de ferro e disposta em lâmina de vidro para aquisição da amostra orientada sob a forma de esfregaço (JACKSON, 1975).

Os difratogramas foram determinados em um Difrátômetro de Raios X, modelo Shimadzu XRD 6000, operando a uma tensão de 40 kV, com corrente de 30 mA e radiação de $\text{CuK}\alpha$, vinculado ao monocromador de cristal de grafite. O ensaio foi realizado no laboratório de Física do solo da Unidade Agrônômica de Garanhuns da UFRPE. Para a interpretação dos difratogramas da fração argila, foram considerados o espaçamento interplanar (d), formato, largura e intensidade dos picos de difração (BROWN & BRINDLEY, 1980; JACKSON, 1975; MOORE & REYNOLDS, 1989)

3.3 Análise da vinhaça

A vinhaça foi coletada no dia 05 de fevereiro de 2014 em um tanque de vinhaça diluída na proporção 1:1 (água:vinhaça) chamado de Poço 3. A amostra foi submetida à caracterização físico-química nos equipamentos: peagâmetro, condutivímetro e fotômetro de chama, sendo executadas três repetições para cada procedimento.

O potencial hidrogeniônico (pH) foi aferido com o auxílio do peagâmetro de bancada.

A Condutividade Elétrica (CE) foi verificada no condutivímetro.

Para a caracterização de Potássio (K^+) e Sódio (Na^+), foram necessários pré-tratamentos das amostras de acordo com a Norma Brasileira 13809 (ABNTc, 1997). Essa norma delimita o método de tratamento preliminar de amostras de efluente industrial (vinhaça) para a determinação de metais por emissão em chama. O procedimento executado foi o de metais extraíveis por ácido - Tratamento com ácido diluído a quente, que consiste em extrair os materiais adsorvidos sobre a amostra, após manipulação da adição de ácidos (nitríco e clorídrico) em condições estabelecidas (ABNTc, 1997).

A amostra pré-tratada é vaporizada e atomizada em chama proporcional às concentrações dos elementos (Potássio e Sódio) a serem determinados conforme a Norma Brasileira 13805 (ABNTa, 1997). O procedimento consiste na aspiração da amostra pelo

fotômetro de chama. É importante destacar que o pH da solução, conforme o pré-tratamento, é ajustado para valor abaixo de 2 (ABNTa, 1997; ABNTb 1997).

3.4 Ensaios de equilíbrio em lotes

Antes da realização dos ensaios de equilíbrio em lotes, foi realizado o teste de cinética de sorção do potássio. Os tempos estabelecidos foram de 0, 2, 6, 12, 18, 24, 36 e 48 h. Os tubos preparados foram dispostos na posição horizontal, na mesa agitadora modelo TE – 140 da marca Tecnal, com rotação de 100 rpm.

As amostras do ensaio de cinética estavam sob temperatura ambiente, com a mesma proporção do ensaio de equilíbrio em lotes (razão 1:4) e concentração, única e intermediária, de 213,87 mg.L⁻¹ de potássio da solução de vinhaça diluída, para identificar o tempo de estabilização ideal para adsorção do soluto no solo.

Posteriormente, as amostras da cinética de potássio e equilíbrio em lotes foram centrifugadas a 3000 rpm durante 10 minutos, separadas o sobrenadante, filtradas (NICOCELLI, 2011) e preparadas para a determinação por fotometria de chama (descrita conforme análise da vinhaça) (ABNTa, 1997).

O ensaio de Equilíbrio em Lotes fundamenta-se na associação da massa de soluto adsorvida e as concentrações de equilíbrio estabelecidas previamente (NASCENTES, 2006).

Em cada camada de solo, foram utilizados 5 g de TFSA para 20 mg.L⁻¹ de solução de vinhaça (razão 1:4) com concentrações definidas, em tubos para centrifuga tipo Falcon com capacidade de 50 mL. Três frascos apenas com as concentrações de equilíbrio, convencionadas como brancos, para observar a quantidade de potássio que seria aderido ao recipiente (USEPA, 1992). O ensaio foi realizado em triplicata e tempo de 24 h sob agitação horizontal conforme resultado da cinética de potássio.

Para preparar as concentrações de equilíbrio, foram utilizadas a vinhaça pura, com diluições diferentes (NICOCELLI, 2011), resultando nas soluções com respectivos teores de potássio 24,4, 44,13, 111,8, 213,87, 453,05, 694,2, 1192,1 e 1582,4 mg.L⁻¹, sendo a última concentração, o teor de vinhaça pura amostrada no Poço 1. Importante mencionar que todas as soluções foram pré-tratadas conforme NBR 13809 (ABNTc, 1997) e o teor de potássio

indicado na água deionizada para preparação das concentrações de equilíbrio correspondem a 0,04% da vinhaça pura.

Assim, a solução adsorvida é calculada a partir da expressão (Equação 8) (SHACKELFORD, 1993).

$$S = \frac{(C_0 - C_{eq})V}{M_s} \quad (8)$$

Onde: S é a concentração adsorvida (mg.g^{-1}); C_0 é a concentração conhecida (Branco) (mL); C_{eq} é a concentração de equilíbrio (mL); V é o volume do soluto (mL); M_s é a Massa de solo seco (g).

Dessa forma, é possível obter os gráficos com valores de concentração de equilíbrio versus sorção, que foram ajustadas aos modelos de isoterma de Langmuir e Freundlich.

3.5 Análises dos dados

Para a análise estatística dos dados, foram realizados os cálculos das médias simples e desvio padrão das três repetições. E com auxílio do programa SigmaPlot, versão 11 (SIGMA PLOT, 2008), foi estimado qual o melhor ajuste dos dados experimentais utilizando os modelos de isotermas de Freundlich e Langmuir nas suas formas diretas.

A estimativa da capacidade de retenção de potássio pelo solo foi verificada por meio da isoterma de adsorção, que descreve a relação de equilíbrio entre a concentração na fase líquida e a concentração que é adsorvida pela fase sólida do solo.

As isotermas de adsorção utilizadas para a compreensão da relação entre as quantidades de potássio fixas por unidade de peso do solo e da concentração de potássio na solução foram as de Freundlich e Langmuir. Para a obtenção dos parâmetros das isotermas de adsorção a partir dos dados experimentais, foram empregados os modelos nas formas não-linear e linearizadas, conforme apresentado na Tabela 2 (LINHARES et al., 2008; WU et al., 2014).

As isotermas experimentais foram ajustadas pelos modelos de Freundlich e Langmuir na forma direta com o software SigmaPlot, versão 11.

Os parâmetros dos modelos de Freundlich e Langmuir nas formas linearizadas foram determinados na análise de dados por Regressão utilizando o Excel (Microsoft Professional Plus 2013).

Tabela 2 - Modelos de Isotermas de Freundlich e Langmuir não linear e linearizados, bem como equações utilizadas no SigmaPlot para os ajustes diretos dos modelos.

Modelo	Freundlich	Langmuir	
Não linear	$S = K_F C_{eq}^n$	$S = \frac{S_M K_L C_{eq}}{1 + K_L C_{eq}}$	
		Modelo 1	Modelo 2
Linearizado	$\ln S = \ln K_F + n \ln C_{eq}$	$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_M} + \frac{1}{K_L S_M C_{eq}}$	$\frac{S}{C_{eq}} = \frac{1}{K_L S_M} + \frac{C_{eq}}{S_M}$
Ajuste direto com o SigmaPlot	$y = ax^b$	$q = \frac{cz}{1 + dz}$	

S - quantidade de adsorção em equilíbrio (g.kg^{-1}); K_F - Constante de Freundlich relacionadas com a capacidade de adsorção ($\text{g.kg}^{-1})(\text{m}^3.\text{g}^{-1})$; C_{eq} - Concentrações de líquidos no equilíbrio (g.m^{-3}); n - Constante relacionada com a intensidade de adsorção; $a - K_F$; $b - n$; $x - C_{eq}$; S_M - Quantidade de adsorção correspondente à cobertura monocamada (g.kg^{-1}); K_L - Constante de Langmuir (m^3/g); $q - S$; $c - S_M K_L$; $z - C_{eq}$; $d - K_L$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização Física, Química e Mineralógica de Solo

4.1.1 Atributos do solo

Os problemas naturais efetivos e característicos dos tabuleiros costeiros foram minimizados com o progresso das práticas agrícolas e implantação de investimentos na tecnologia. Mesmo assim, muitos estudos comprovam que os procedimentos utilizados por empresas e agricultores ocasionam modificações nas propriedades do solo, evidenciando várias características de degradações ambientais (SILVA & RIBEIRO, 1997).

Os valores numéricos analíticos (Tabelas 2,3,4 e 5), obtidos com os procedimentos metodológicos mencionados, especifica a delimitação dos parâmetros para o solo do estudo classificado como LATOSSOLO AMARELO Distrófico psamítico, fase de floresta subperenifólia relevo suave ondulado.

Os Latossolos de textura média são constituídos por altos valores de areia, equiparadas com as Areias Quartzosas, sendo muito vulneráveis à erosão. Dessa forma, para evitar esse e outros problemas, é necessário o manejo cauteloso e práticas conservacionistas. A percolação da água, de forma vigorosa e em grande quantidade no perfil desse solo, vinculado à baixa Capacidade de Troca Catiônica, pode promover a lixiviação de nutrientes (SOUSA & LOBATO, s.d.).

Especificando os níveis categóricos, os Latossolos Amarelos possuem boas características físicas indicando boa permeabilidade, sendo dessa forma empregado abundantemente para o plantio de cana-de-açúcar. A particularidade de ser distrófico indica a baixa fertilidade. No quarto nível categórico, é definido como solo arenoso com dificuldade de reter umidade (ZARONI & ALMEIDA, s.d; SANTOS, 2013).

4.1.2 Atributos Físicos do Solo

Os atributos físicos do solo estão organizados na Tabela 3. Os valores da granulometria de solo demonstraram elevação do teor de argila nas camadas, entre 7,33 a 8,23 %, consecutivamente.

Tabela 3 - Caracterização dos atributos físicos do LATOSSOLO AMARELO Distrófico psamítico fase de floresta subperenifólia relevo suave ondulado.

Camada cm	Granulometria da TFSA				Ds	Dp	Pt*
	Areia	Silte	Argila	Classe Textural			
	%						
0-20	90,59 (0,58)	2,07 (0,58)	7,33 (0,00)	Arenosa	1,77 (0,01)	2,48 (0,04)	28,71
20-40	90,56 (3,06)	1,91 (8,98)	7,52 (5,92)	Arenosa	1,81 (0,13)	2,46 (0,04)	26,40
40-60	89,94 (2,73)	1,82 (2,73)	8,23 (0,00)	Arenosa	1,78 (0,03)	2,44 (0,06)	27,19

Valores médios e desvios padrões (entre parênteses).

TFSA: Terra Fina Seca ao Ar; Ds: Densidade de solo; Dp: Densidade de partículas do solo; Pt: Porosidade Total.

* Observação: A porosidade total, dessa pesquisa, foi estimada por meio da média dos valores de densidade de partículas e da densidade de solo, portanto, não foi possível calcular o desvio padrão.

As variações da densidade do solo entre 1,77 a 1,81 g.cm⁻³ revelam a influência da preparação do solo, devido à gradagem e escarificação feitas 10 meses antes da coleta do solo. Portanto, o revolvimento do solo promoveu desestabilização dos agregados do solo interferindo no resultado de densidade do solo.

A camada superficial do solo (0-20 cm) apresentou o maior valor de densidade das partículas de solo 2,48 g.cm⁻³ após tratamento para a remoção da matéria orgânica com peróxido de hidrogênio. Contudo, conforme Verdade (1954), a água oxigenada empregada no procedimento não destrói totalmente a matéria orgânica, pois sempre existirá resíduo.

4.1.3 Atributos Químicos do Solo

Os atributos químicos do solo encontram-se na Tabela 4. O resultado do pH extraído em água, CaCl₂ e KCl indicou acidez com valores entre 4,93 a 6,40, confirmado pelo estudo de Silva e Ribeiro (1997), que mencionam a aplicação de vinhaça no solo colabora para o aumento do pH do solo. O ΔpH (pH KCl – pH água) das camadas apresentam-se acima do ponto de carga zero e os coloides indicam carga elétrica líquida negativa. A faixa ácida está de acordo com os baixos teores de bases trocáveis, característicos de solos muito intemperizados

e lixiviados (ARAÚJO & SALCEDO, 1997). Os Latossolos geralmente contêm altos índices de acidez tanto na camada superficial quanto na camada subsuperficial, o que é evidenciado com os valores obtidos (CAVALCANTI & LOPES, 1994 apud Santos et al., 2012)¹⁰.

O carbono orgânico (CO) diminuiu com a profundidade das camadas, sendo o maior valor registrado de 13,56 g.kg⁻¹ referente a área superficial do solo, seguido de 12,30 e 10,52 g.kg⁻¹ para as demais camadas. Segundo Vasconcelos et al. (2010a), os valores são considerados médio de teor de CO por estar entre 6 e 12 g.kg⁻¹. Vasconcelos et al. (2010a) comentam que nas áreas tropicais alguns fatores contribuem para o aumento de carbono orgânico nos solos agricultáveis, são eles: as altas temperaturas e umidade do ar e a preparação do solo (principalmente caracterizada pelo revolvimento do solo que ocasiona decomposição mais veloz através da ação microbiana).

O teor de matéria orgânica (MO) é decrescente, sendo de 23,38 a 18,14 g.kg⁻¹, vale ressaltar que o solo da pesquisa antes da coleta possuía adição de torta de filtro. Vasconcelos et al. (2010b) observaram que a vinhaça e a torta de filtro aplicados no solo auxiliam para o aporte de matéria orgânica. E, portanto, age beneficemente nas características do solo, pois atua como cimentante no processo de constituição de agregados, promovendo a retenção de água, estabilidade de agregados, aeração do solo e movimentação de água no solo.

De acordo com Quintana (2010), os solos do Brasil geralmente são bem intemperizados e com argilas pouco reativas. Consequentemente, possuem menor capacidade para reter os íons, dependendo dos teores de matéria orgânica do solo para viabilizar nutrientes para as plantas.

Dos cátions Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺ e Na⁺ trocáveis presentes no solo, os maiores valores foram de cálcio trocável, variando de 1,50 a 1,97 cmol_c.dm⁻³, supõe-se que seja devido a calagem feita para plantação da cana-planta.

Inúmeras pesquisas atribuem o alto teor de potássio no solo às aplicações sucessivas de vinhaça e a adubação química (QUINTO, 2008; UYEDA, 2009; VASCONCELOS et al., 2010). Com relação ao potássio, os valores decresceram conforme a profundidade, com valores de 0,31 a 0,11 cmol_c.dm⁻³. Mesmo o potássio em grandes quantidades no solo, ele não consegue evitar o efeito de atração entre os cátions bivalentes (Ca²⁺ e Mg²⁺) com a matéria orgânica (VASCONCELOS et al., 2010). Segundo Cavalcanti (2008), o teor de potássio acima de 0,15 cmol_c.dm⁻³ é classificado como alto valor, para solos agricultáveis com cana-planta.

¹⁰ CAVALCANTI, A.C. & LOPES, O.F. **Condições edafoclimáticas da Chapada do Araripe e viabilidade de produção sustentável de culturas**. Brasília, Embrapa, p. 42, 1994 apud SANTOS, R. L.; AZEVEDO, V. M.; FREIRE, F. J.; ROCHA, A. T.; TAVARES, J. A.; FREIRE, M. B. G. S. Extração e eficiência de uso de nutrientes em capim-elefante na presença de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 497-505, 2012.

Assim, as duas primeiras camadas possuem alto teor de potássio e a camada de 40-60 cm apresenta médio teor de potássio no solo para cultura de cana-de-açúcar.

Os reduzidos valores de saturação por bases (V), variando entre 32,44 a 22,84 %, confere a classificação distrófica ao solo (> 50%). Esse aspecto está associado à fertilidade natural do solo, devido material de origem pobre em ferro ou porque o ferro foi removido do solo pela água de percolação, sendo indicadas correções de adubação para a utilização agrícola (SANTOS; ZARONI e ALMEIDA, s.d.).

O parâmetro de condutividade elétrica do solo diminuiu conforme a profundidade das camadas entre 0,347 a 0,229 dS.cm⁻¹. Uyeda (2009) explica que essa característica não menciona os íons presentes na amostra, porém, colabora para reconhecer os impactos ambientais, pois quanto maior for à quantidade de íons dissolvidos, maior será a condutividade elétrica da amostra.

Tabela 4 - Caracterização dos atributos químicos do LATOSSOLO AMARELO Distrófico psamítico fase de floresta subperenifólia relevo suave ondulado

Camada	pH		Δ pH	CO	MO	P		K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	*S ²⁻	Al ³⁺	Acidez Potencial	H ⁺
	H ₂ O*	KCl				Mehlich	Rem								
cm	-----		g.kg ⁻¹		mg.dm ⁻³	mg.L ⁻¹	cmolc.dm ⁻³				mg.dm ⁻³	cmolc.dm ⁻³			
0-20	6,4	5,4 (0,02)	-1,00	13,56 (0,32)	23,38 (0,55)	19,56 (0,53)	2,95 (0,12)	0,31 (0,007)	1,64 (0,12)	0,21 (0,006)	0,03 (0,003)	9,00	0,3 (0,00)	4,57 (0,10)	4,23 (0,08)
20-40	6,3	5,4 (0,02)	-0,90	12,3 (0,79)	21,21 (1,37)	30,74 (2,16)	2,2 (0,18)	0,2 (0,004)	1,97 (0,12)	0,2 (0,005)	0,03 (0,003)	11,00	0,9 (0,00)	5,06 (0,19)	4,16 (0,19)
40-60	6,1	4,93 (0,01)	-1,17	10,52 (0,39)	18,14 (0,67)	17,01 (0,69)	3,63 (0,06)	0,11 (0,003)	1,5 (0,18)	0,18 (0,007)	0,02 (0,003)	6,00	2,23 (0,15)	6,11 (0,29)	3,87 (0,30)

Valores médios e desvios padrões (entre parênteses).

pH: Potencial Hidrogeniônico; Δ pH: variação do potencial hidrogeniônico; CO: Carbono Orgânico; MO: Matéria Orgânica; P: Fósforo; K⁺: Potássio trocável; Ca²⁺: Cálcio trocável; Mg²⁺: Magnésio trocável; Na⁺: Sódio trocável; S²⁻: Enxofre; Al³⁺: Alumínio trocável; H⁺: Hidrogênio extraível.

* Observação: Os resultados foram fornecidos pelo Laboratório de análise Agrônoma, Ambiental e preparo de soluções químicas Fullin que disponibilizou apenas os valores médios, portanto não foi possível calcular o desvio padrão.

Tabela 4 - Continuação da caracterização dos atributos químicos de solo LATOSSOLO AMARELO Distrófico psamítico fase de floresta subperenifólia relevo suave ondulado

N-NO₃	Zn*	Fe*	Mn*	Cu*	B*	SB	t	T	V	m	Saturação por Sódio	CE	
mg.kg ⁻¹			mg.dm ⁻³				cmolc.dm ⁻³			%		μS.cm ⁻¹	dS.cm ⁻¹
0,19						2,19	2,49	6,76	32,44	12,05	0,49	347,33	0,347
(0,01)	2,4	239	6	1,1	0,21	(0,12)	(0,12)	(0,10)	(1,44)	(0,57)	(0,04)	(0,002)	(0,002)
0,18						2,4	3,3	7,46	32,21	27,27	0,37	292,33	0,292
(0,00)	0,7	240	3	1	0,23	(0,12)	(0,12)	(0,15)	(1,69)	(0,97)	(0,04)	(0,006)	(0,006)
0,18						1,81	4,04	7,91	22,84	55,3	0,31	229,33	0,229
(0,01)	0,8	387	1	0,3	0,15	(0,18)	(0,06)	(0,25)	(2,3)	(4,11)	(0,02)	(0,005)	(0,005)

Valores médios e desvios padrões (entre parênteses).

N-NO₃: Nitrato do solo; Zn: Zinco; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Cu: Cobre; B: Boro; SB: Soma de bases; t: Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; T: Capacidade de Troca Catiônica à pH 7,0; V: Saturação de bases; m: Saturação de Alumínio; CE: Condutividade Elétrica.

* Observação: Os resultados foram fornecidos pelo Laboratório de análise Agrônoma, Ambiental e preparo de soluções químicas Fullin que disponibilizou apenas os valores médios, portanto não foi possível calcular o desvio padrão.

4.1.4 Atributos Mineralógicos do Solo

Os espectros dos difratogramas da fração argila natural demonstraram constituição e distribuição mineralógica homogênea entre as camadas (Figura 5, 6 e 7), caracterizado pela predominância de minerais 1:1 do grupo da caulinita. A ordem dos principais minerais indica a presença da caulinita (Ct) $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, da gibbsita (Gb) $\text{Al}(\text{OH})_3$ e da goethita (Gt) $(\text{Fe,Al})\text{OOH}$ nas amostras de solo. A caulinita como principal mineral presente na argila é originária da intemperização direta de feldspatos e mica.

Outros picos foram observados (distâncias interplanares de 0,39; 0,37 e 0,28 nm) e não foi possível estabelecer relação com minerais comuns em solos. A zona de ocorrência desses picos está relacionada principalmente aos feldspatos, contudo, sua ausência após o tratamento de desferrificação e saturação com potássio, descarta a possibilidade desses minerais nas amostras estudadas. Assim, acredita-se que estejam associadas a detritos de adubos e/ou corretivos empregados intensamente no cultivo de cana-de-açúcar.

O pico referente ao de 0,28 nm foi atribuído a presença da dolomita. Para Blaya e Garcia (2003), os solos que prevalecem o mineral caulinita, retêm em pequena quantidade o potássio. A área superficial efetiva da caulinita limita-se as camadas externas que podem absorver os íons de potássio, porém, não os fixa nas suas unidades cristalinas. Solos onde existe predominância de caulinita apresentam pequena capacidade de troca catiônica, ou seja, maior capacidade de troca de ânions (MOTA e OLIVEIRA, 1999).

Figura 5 – Difratoograma da fração argila natural da camada de 0-20 cm.

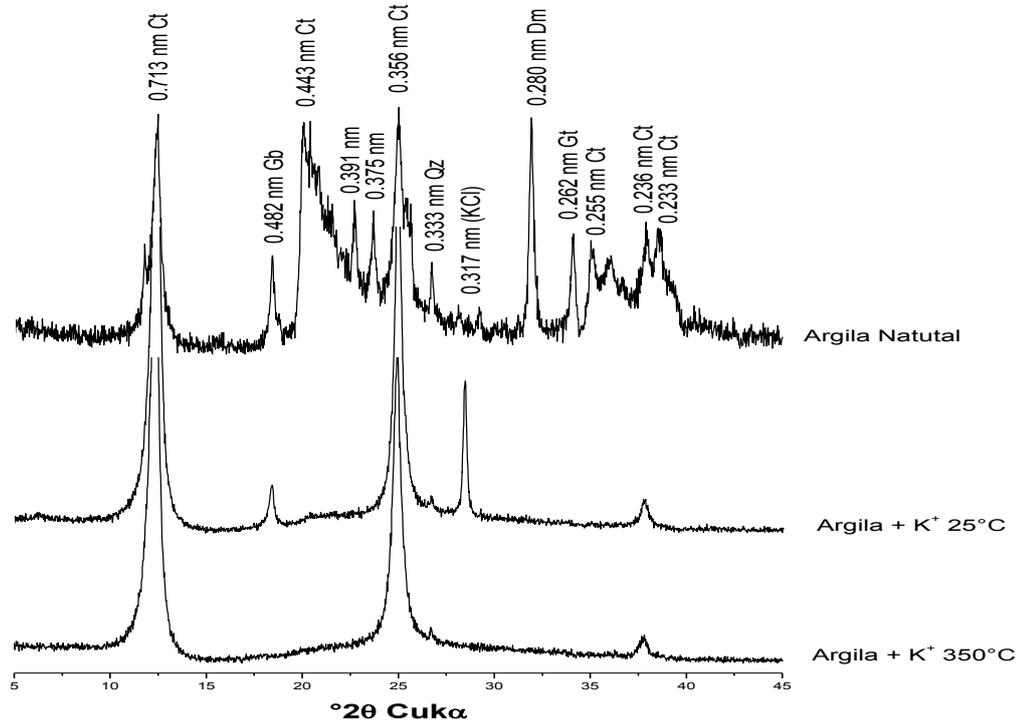


Figura 6 – Difratoograma da fração argila natural da camada de 20-40 cm.

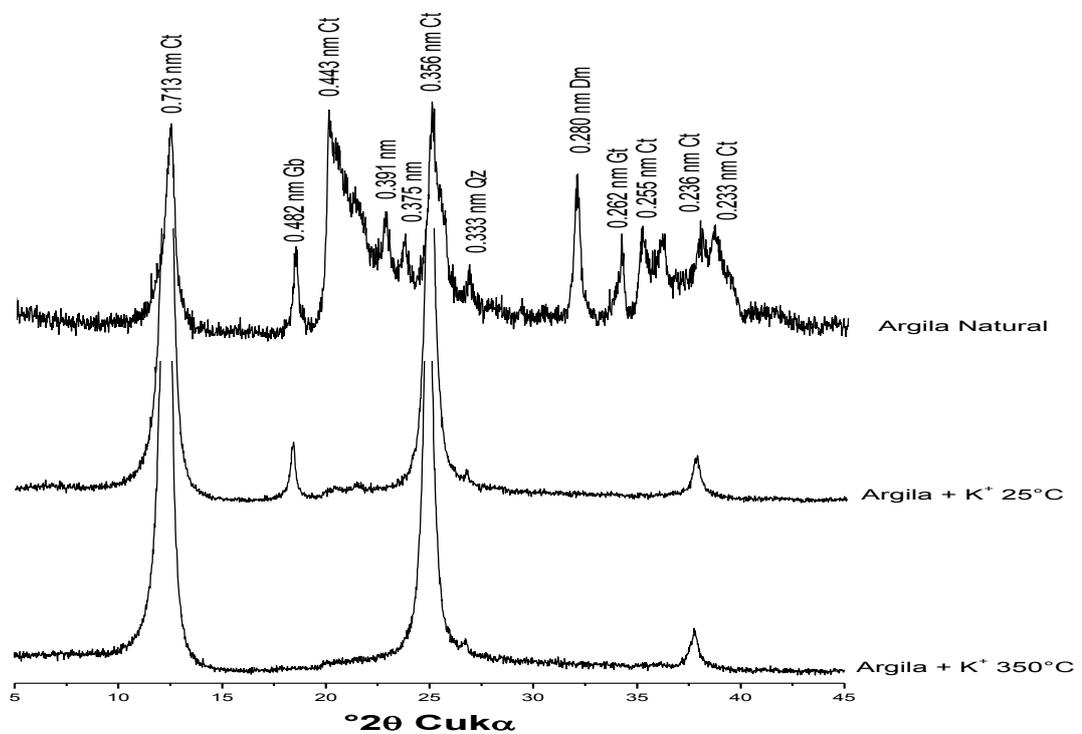
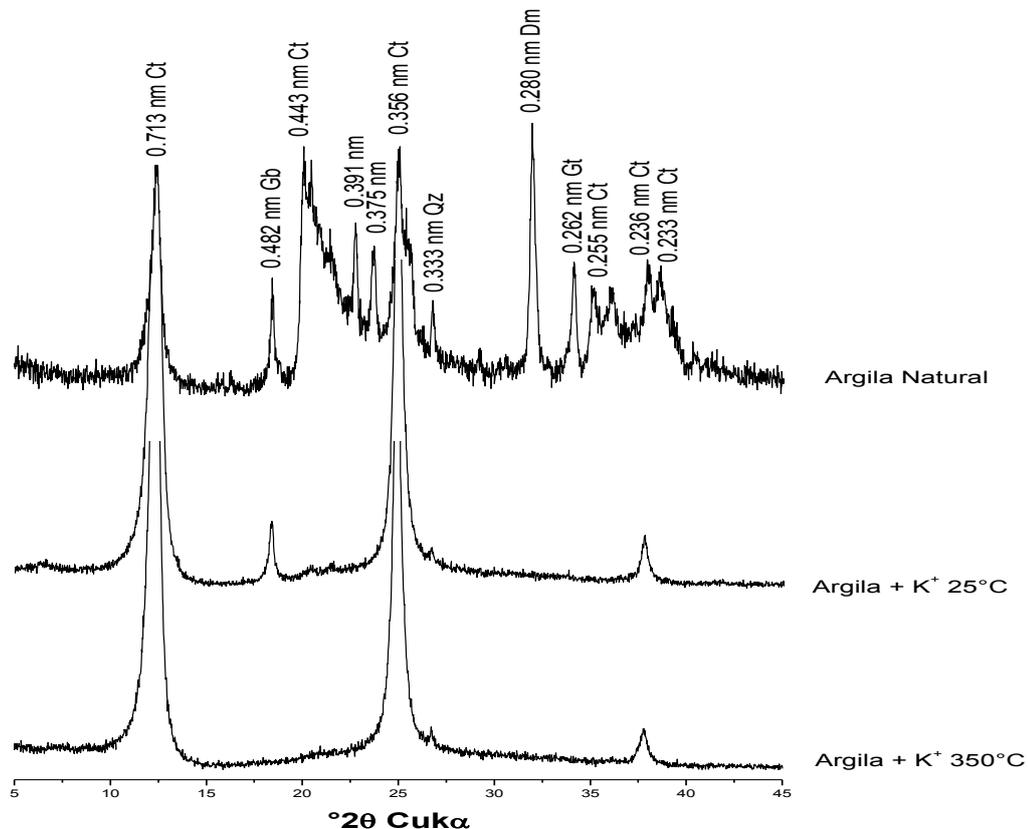


Figura 7 – Difratoograma da fração argila natural da camada de 40-60 cm.



4.2 Dados obtidos da análise química da vinhaça

Os resultados da análise da vinhaça são apresentados na Tabela 5. Corroboram o argumento de Shenbagavalli e Mahimairaja (2009) apud Nicochelli (2011)¹¹, no qual a vinhaça possui caráter ácido ($\text{pH} < 4,0$) e altos níveis de potássio.

Tabela 5 - Caracterização da vinhaça.

	pH	CE dS.cm^{-1}	K Na	
			mg.L^{-1}	
Poço 3	3,78 (0,004)	4,63 (0,025)	1582,4 (0,000)	17,67 (0,416)

Valores médios e desvios padrões (entre parênteses).

pH: Potencial Hidrogeniônico; CE: Condutividade Elétrica; K: Potássio;
Na: Sódio.

¹¹ SHENBAGAVALLI, S., MAHIMAIRAJA, S. Agricultural use of distillery spentwash and its environmental impact. *Pollution research*, v.28, n.3, p. 367-382, 2009 apud NICOHELLI, L. M. **Sorção ao potássio de diferentes materiais submetidos à aplicação de vinhaça**. 2011. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT. 2011.

A condutividade elétrica baixa da vinhaça, de $4,63 \text{ dS.cm}^{-1}$, confirma a explicação de Lyra, Rolim e Silva (2003), na qual o indicativo de baixa condutividade elétrica sugere um aumento da concentração de sais na solução do solo, além de maior potencial para salinizar a área, com emprego indiscriminado de vinhaça ao longo dos anos.

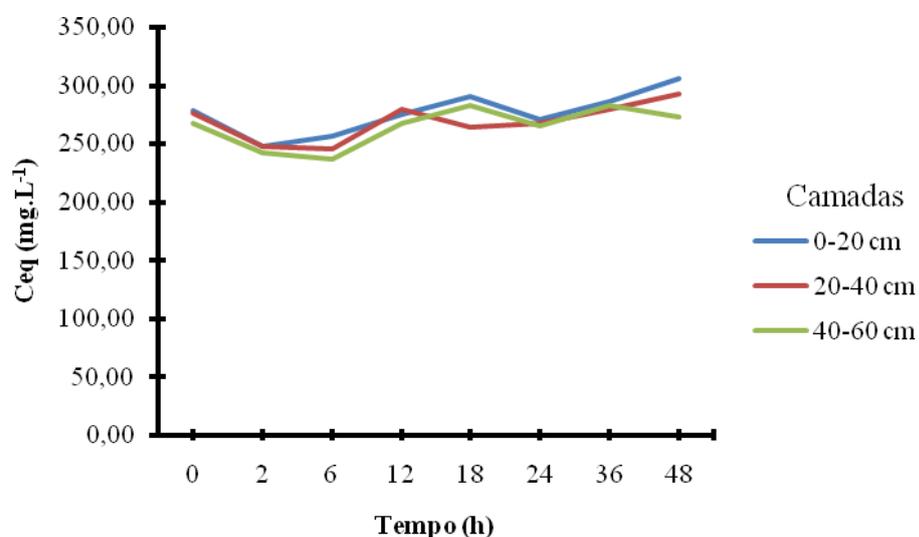
Bebé (2007) menciona que a aplicação inadequada de vinhaça pode favorecer a elevação da quantidade de elementos químicos no solo, como o potássio e o sódio, que contribuem para o aumento da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo.

4.3 Cinética de Potássio

Com a finalidade de descobrir as condições ótimas do processo de adsorção, que determinasse de modo preciso a menor taxa de alteração da concentração do soluto em solução, o ensaio de equilíbrio em lotes foi realizado com diferentes tempos de agitação. A quantidade de adsorção do potássio no tempo estimado foi calculada conforme a diminuição da sua concentração em solução, quando comparada a solução-branco (GUO et al., 2008).

O gráfico de adsorção de potássio (Figura 8) indica que o equilíbrio de adsorção foi atingido em torno das 24 h, intervalo este comumente utilizado para o estabelecimento das condições de equilíbrio (Mellis e Rodela, 2008; Nicochelli, 2011). Sendo assim, este tempo foi empregado para os demais ensaios de equilíbrio em lote para a determinação das isotermas de adsorção.

Figura 8 – Cinética de adsorção de Potássio.



4.4 Interação da isoterma de sorção

Em muitas aplicações, alguns pesquisadores linearizam as isotermas não-lineares para ajustar uma reta com o objetivo de facilitar o processo de estimação dos parâmetros. No entanto, segundo Drape e Smith (1998), o processo de linearização pode gerar estimadores menos precisos, e, portanto, sem representação física do fenômeno estudado. Gonçalves e Beijo (2011) avaliaram o viés médio relativo dos parâmetros das isotermas de Langmuir, nas formas não-linear e linearizadas, chegando-se a conclusão que os modelos linearizados induziram valores menos precisos e com pouca exatidão para os parâmetros, comparados ao modelo não-linear.

4.4.1 Repetibilidade das curvas ajustadas

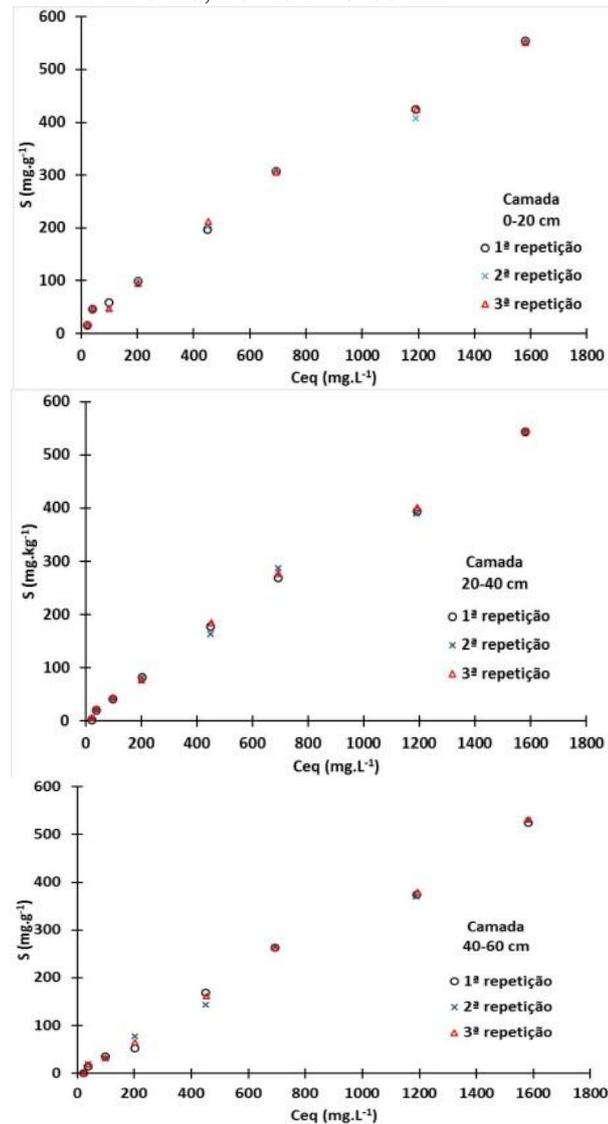
Para avaliar a repetibilidade dos ensaios para as isotermas experimentais de Freundlich e Langmuir, foram realizadas três repetições para cada ensaio e para cada camada de solo.

A repetibilidade indicou condições constantes, na qual a variabilidade dos dados é mencionada conforme características iguais de operador, procedimento, local, tempo, entre outras (VIEIRA, 2014).

A Figura 10 apresenta os gráficos das isotermas experimentais para as três repetições nas três camadas de solo.

As isotermas observadas com os resultados empíricos foram ajustadas pelos modelos de Freundlich e Langmuir na forma direta com o software SigmaPlot. Para cada camada foi efetuado o mesmo método analítico, empregado o mesmo aparelho de aferição três vezes, caracterizando-se como repetições 1, 2 e 3 (Figura 9).

Figura 9. Isotermas experimentais (três repetições) para as camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm.

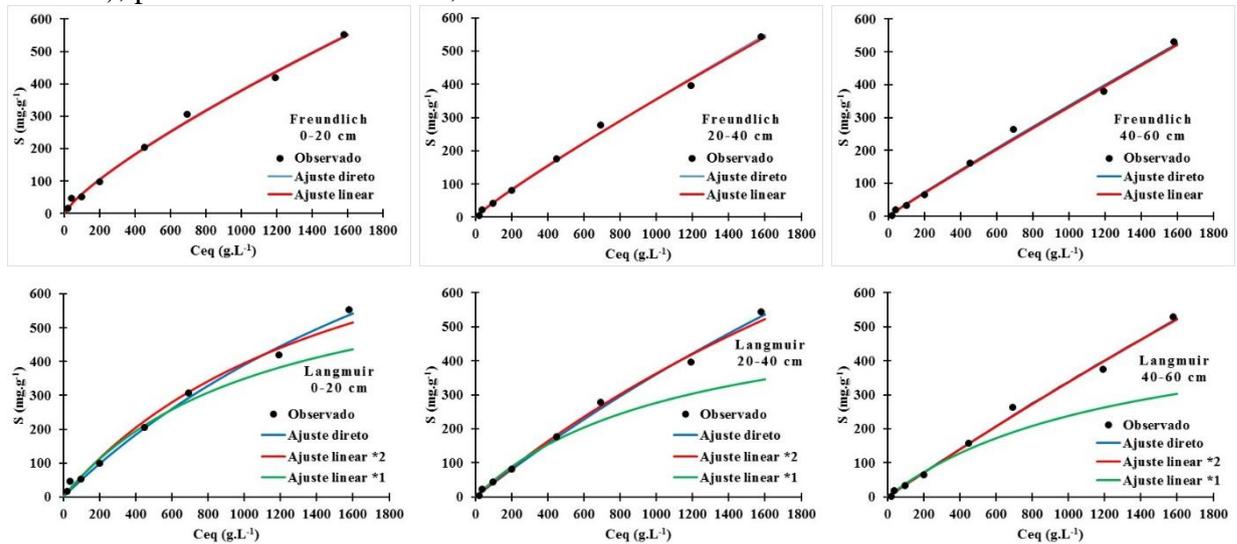


Ao examinar os gráficos de cada camada de solo observa-se uma excelente repetibilidade nos ensaios, mesmo para as concentrações mais baixas, que foram submetidas a diluições da vinhaça.

4.4.2 Média das isotermas

A Figura 10 apresenta as curvas das isotermas experimentais, média de três repetições, ajustadas pelos modelos de Freundlich e Langmuir nas formas não-linear e linearizadas conforme equações definidas na Tabela 5 para cada camada de solo.

Figura 10. Isotermas experimentais (valor médio de três repetições) ajustadas pelos modelos de Freundlich (ajuste direto e ajuste linear) e Langmuir (ajuste direto e por dois modelos lineares), para as camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm.



Observa-se na figura 10 que para as curvas ajustadas com o modelo de Freundlich, nas formas direta e linearizada, não há diferença entre as curvas ajustadas pelos dois métodos, pois as curvas chegam a praticamente se sobreporem. Além disso, os valores dos parâmetros são semelhantes tanto para as constantes de Freundlich, relacionada com a capacidade de adsorção (K_F), como para as constantes estabelecidas com a intensidade de adsorção (n) e também os coeficientes de determinação (R^2).

A comparação entre as isotermas de Langmuir (observado experimentalmente, ajuste direto e ajustes linearizados pelos modelos 1 e 2) apresenta dados visivelmente desiguais, principalmente para a curva do ajuste linear do modelo 1 (Tabela 2). Ho (2006) esclarece que quando empregado os variados tipos de isotermas de Langmuir, não-linear ou nas formas linearizadas, que além do coeficiente de determinação ser analisado, deve-se investigar principalmente os parâmetros da constante de Langmuir (K_L) e a quantidade de adsorção máxima (S_M). Observa-se pelos gráficos da Figura 10 que para a isoterma de Langmuir utilizando o modelo 2 linearizado, as curvas aproximaram-se do modelo ajustado pela forma direta da equação de Langmuir, no entanto, tanto os valores de K_L e S_M , assim como os valores dos coeficientes de determinação, são diferentes (Tabela 6).

4.4.3 Parâmetros estimados pelos ajustes dos modelos das isotermas de Freundlich e Langmuir.

Os parâmetros das isotermas de Freundlich e Langmuir, estimados por ajustes diretos e nas formas linearizadas, conforme modelos da Tabela 2, bem como os respectivos valores do coeficiente de determinação relativos a cada ajuste encontram-se na Tabela 6.

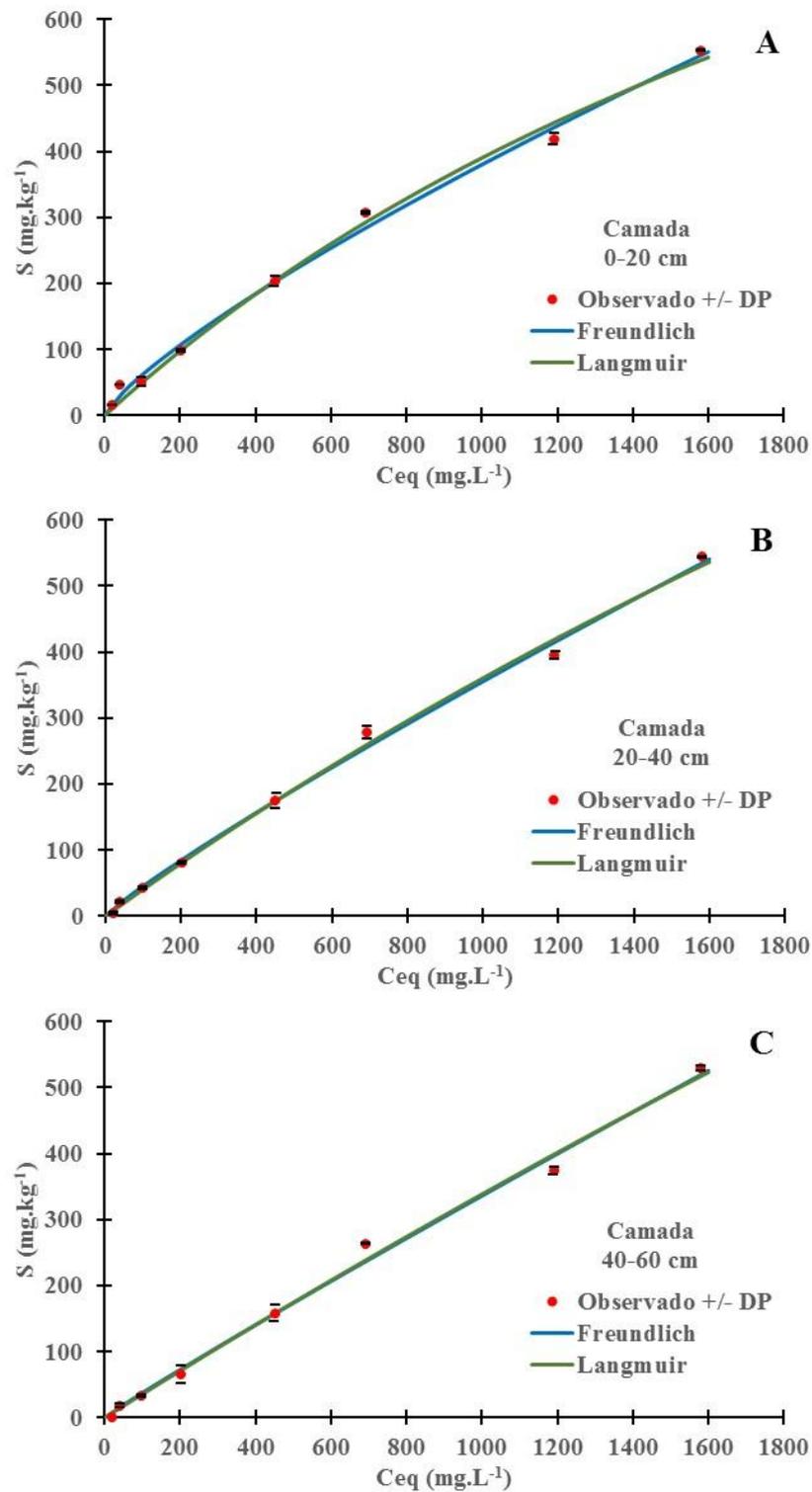
Tabela 6 - Valores dos parâmetros dos modelos de Freundlich e Langmuir estimados por ajuste direto e ajustes lineares (no caso do modelo de Langmuir, dois modelos lineares foram empregados).

Freundlich						
Camada	Linear			Ajuste direto		
	K_F	n	R^2	K_F	n	R^2
cm	$\text{mg.kg}^{-1} \cdot (\text{L.mg}^{-1})^n$	---	---	$\text{mg.kg}^{-1} \cdot (\text{L.mg}^{-1})^n$	---	---
0-20	1,562	0,795	0,974	1,622	0,790	0,994
20-40	0,703	0,901	0,998	0,747	0,893	0,996
40-60	0,428	0,963	0,995	0,470	0,952	0,994
Langmuir						
Camada	Linear Modelo 1			Linear Modelo 2		
	K_L	S_M	R^2	K_L	S_M	R^2
cm	L.mg^{-1}	mg.kg^{-1}	---	L.mg^{-1}	mg.kg^{-1}	---
0-20	0,00088	746,3	0,931	0,00046	1250,0	0,759
20-40	0,00088	591,7	0,991	0,00023	1960,1	0,711
40-60	0,00075	555,6	0,984	0,00006	6109,3	0,104
Ajuste Direto						
Camada	K_L			S_M	R^2	
cm	L.mg^{-1}			mg.kg^{-1}	---	
0-20	0,00034			1553,2	0,994	
20-40	0,00014			2876,8	0,996	
40-60	0,00006			5770,7	0,995	

K_F - Constante de Freundlich relacionada com a capacidade de adsorção ($\text{g.kg}^{-1})(\text{m}^3.\text{g}^{-1})$; n - Constante estabelecida com a intensidade de adsorção; K_L - Constante de Langmuir (m^3/g); S_M - Quantidade de adsorção correspondente à cobertura monocamada (g.kg^{-1}); R^2 - Coeficiente de determinação.

A figura 11 apresenta os gráficos das isotermas experimentais (média de três repetições e desvios padrões), ajustadas pelos modelos Freundlich e Langmuir para as camadas de solos de 0-20, 20-40 e 40-60 cm.

Figura 11. Isotermas experimentais (média de três repetições e desvios padrões), ajustadas pelos modelos Freundlich e Langmuir para as camadas de solos A) 0-20 cm, B) 20-40 cm e C) 40-60 cm.



No caso do modelo de isoterma de Langmuir (Equação 3), os melhores ajustes foram alcançados utilizando-se a forma direta. Resultados semelhantes foram obtidos no trabalho de

Gonçalves e Beijo (2011), no qual os modelos linearizados indicaram valores inferiores quanto a precisão e exatidão dos parâmetros quando confrontados ao modelo não-linear.

Da isoterma de Freundlich, os valores do coeficiente de determinação demonstraram que tanto o ajuste direto como na forma linearizada (Tabela AB) apresentaram-se bem próximos, a exceção no caso do ajuste linearizado da camada 0-20 cm, onde o valor do coeficiente de determinação R^2 foi de 0,974.

Partindo do pressuposto apresentado no trabalho de Gonçalves e Beijo (2011), de que o viés médio dos parâmetros dos modelos de isotermas são menores quando os dados experimentais são ajustados usando a forma direta dos modelos, assume-se aqui que os melhores ajustes foram obtidos usando-se a forma direta do modelo de Freundlich. Este resultado corrobora os obtidos com os trabalhos de Thakur et al. (2004), Sidhu et al. (2004) e Hannan et al. (2007), onde afirmaram que a isoterma de Freundlich descreve a adsorção dos dados melhor do que o modelo de Langmuir.

Segundo Wu et al. (2014), a equação de Freundlich melhor se ajusta para valores de concentrações baixas, enquanto que a equação de Langmuir é mais adequada para valores de concentrações mais altas.

Os valores obtidos para o parâmetro n do modelo de Freundlich, que define a intensidade de adsorção, foram de 0,790, 0,893 e 0,952, respectivamente para as camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, evidenciando que os sítios de ligação são mais homogêneos, pois segundo Sposito (1980), quanto mais próximo o valor do expoente n for da unidade, mais homogêneos serão os sítios de ligação. Ainda segundo Yamamura (2009), valor de n próximo a unidade indica grande capacidade adsorptiva (S) do solo em elevadas concentrações de equilíbrio (C_{eq}).

Os valores de ΔpH nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm foram todos negativos, indicando o caráter de acidez do solo. Portanto, há disputa entre os cátions da vinhaça e os H^+ pelos sítios de sorção (Tabela 4) corroborando os valores de pH de Nicochelli (2011). Consequentemente, as trocas catiônicas promovidas pela CTC do solo são deficientes, conforme demonstrado no somatório das bases para este solo (Tabela 3).

A fração argila representa um atributo do solo importante no processo de sorção. Ainda que presente em menor quantidade nas três camadas do solo, a adsorção do potássio foi diminuindo para cada camada de solo, conforme valores de coeficiente de adsorção de Freundlich pelo ajuste direto (Tabela 2). Este comportamento deve-se pela competição entre o Al^{3+} , o H^+ e o potássio pelos sítios de adsorção, uma vez que a acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$)

aumenta com a profundidade quando comparado com outros solos de mesma categoria (Mendes, 2012; Freitas et al., 2014).

Mitra e Prakash (1956), estudando a adsorção de potássio em argilas minerais de caulinita, montmorilonita, halloysita e natrolita, deduziram que o processo de adsorção do potássio ocorre mais em meio alcalino do que no meio ácido, mas as características que prevalecem no cátion do complexo mineral influenciam na adsorção dos elementos.

Ainda associando a mineralogia do solo, evidenciando a intensa presença de caulinita nos difratogramas da fração argila, revela aspecto positivo para a sorção de potássio nas camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, pois esse mineral auxilia no processo em razão da carga negativa que possui. Santos et al. (2006) efetuaram investigações sobre a adsorção de potássio em solos tropicais e laterita, chegando à conclusão que a caulinita adsorve grande teor de potássio, devido a elevada CTC que interage com cargas negativas existentes na superfície do mineral.

A interação de potássio acontece em competição com outros cátions presentes no sistema. A presença de cálcio e magnésio (Tabela 3) presente no solo originário da adubação, influencia a competição na adsorção do potássio pelos sítios de adsorção. Este resultado corrobora com o estudo de Mirta e Prakash (1956), que afirmaram que a capacidade de adsorção aumentou em razão do elevado teor de cálcio e magnésio no solo.

Observa-se que a maior adsorção do potássio ao solo se deu para a camada de 0-20 cm, decrescendo à medida que vai se aumentando a profundidade do solo, conforme observa-se pelos valores do coeficiente de adsorção K_F para cada camada (Tabela 6). Dentre os atributos físicos, químicos e mineralógicos que mais influenciou nesta interação, destaca-se a maior presença de matéria orgânica para a camada de 0-20 cm, que foi de $23,38 \text{ g.kg}^{-1}$. Segundo Sparks e Huang (1985), o constituinte do solo que influencia nas reações de potássio no solo por causa da CTC é a matéria orgânica. Wang e Huang (1990) mencionaram que a matéria orgânica é o elemento fundamental para a adsorção de potássio no solo. Ainda segundo o trabalho de Wang e Huang (2001), a matéria orgânica do solo favoreceu consideravelmente uma adsorção inicial muito rápida do potássio por apresentar sítios de sorção mais acessíveis do que os componentes minerais do solo. Ehlers et al. (1968) apud Hannan et al. (2007), compararam os sítios de adsorção da matéria orgânica similares as superfícies planas da argila proveniente da caulinita para o elemento potássio. Do mesmo modo, Stevenson (1994) apud Wang e Huang (2001), afirmaram que os íons negativos da matéria orgânica estão localizados na área externa do material, logo são relativamente mais acessíveis que as cargas dos constituintes minerais do solo.

5 CONCLUSÃO

O uso da vinhaça na fertirrigação da cana-de-açúcar é uma solução prática, pois teoricamente aumenta a produtividade e a qualidade desta cultura. Contudo, doses excessivas de vinhaça não são desejáveis, principalmente em solos arenosos, pois pode adicionar uma quantidade de potássio ao solo maior do que a sua capacidade de adsorção, ocasionando assim, perda de potássio em profundidade por lixiviação.

Os modelos de Langmuir e de Freundlich foram capazes de se ajustar aos dados de equilíbrio obtidos experimentalmente, obtendo-se por meio dos ajustes os parâmetros de adsorção. Entre os modelos, o de Freundlich, na sua forma direta, mostrou uma maior aproximação com os dados obtidos experimentalmente.

O potássio proveniente da vinhaça interagiu principalmente com a matéria orgânica e o mineral caulinita do solo, pois apresentam íons negativos na superfície externa que favoreceram maior adsorção.

A capacidade de adsorção do potássio foi maior na primeira camada do solo (0-20 cm), diminuindo em profundidade. Portanto, práticas agrícolas como calagem e adição de matéria orgânica são recomendadas para auxiliar na melhoria da qualidade física e química do solo, bem como na adsorção do potássio, sob essas condições edafoclimáticas.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: 2004: Resíduos sólidos: Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

_____a. **NBR 13805**: 1997: Água - Determinação de potássio: Método da espectrofotometria por emissão em chama. Rio de Janeiro, 1997.

_____b. **NBR 13806**: 1997: Água - Determinação de sódio: Método da espectrometria por emissão em chama. Rio de Janeiro, 1997.

_____c. **NBR 13809**: 1997: Água - Tratamento preliminar de amostras para determinação de metais: Método da espectrometria de absorção atômica/emissão em chama. Rio de Janeiro, 1997.

AGÊNCIA CÂMARA. Projeto de lei cria regras para armazenamento e utilização de vinhaça. **RuralBR Agricultura**. São Paulo, out. 2013. Notícias. Disponível em: <<http://agricultura.ruralbr.com.br/noticia/2013/10/projeto-de-lei-cria-regras-para-armazenamento-e-utilizacao-de-vinhaca-4311909.html>>. Acesso em: 28 out. 2013.

ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. 2008. 105 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, São Paulo: ESALQ/USP, SP. 2008.

AMARAL SOBRINHO, N.M.B. do; COSTA, L. M. da; OLIVEIRA, C. de e VELLOSO, A. C. X. Metais pesados em alguns fertilizantes e corretivos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 16, p. 271-276, 1992.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética**. Brasília: ANA, 2009.

ARAÚJO, M. S. B. & SALCEDO, I. H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região nordeste. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 643-650, 1997.

BEBÉ, F. V. **Avaliação de solos sob diferentes períodos de fertirrigação com vinhaça e alterações na qualidade do efluente drenado**. 2007. 39 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia Agrícola - Água e Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife: UFRPE. 2007.

BLAYA, S. N.; GARCIA, G. N. **Química Agrícola**: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. 2 ed. Madri: Mundi-prensa, p. 259 – 262, 2003.

BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R. Teores de potássio e sódio no lixiviado e em solos após a aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, (Suplemento), p.52-56, 2005.

_____. Concentração de cátions presentes no lixiviado de solos tratados com vinhaça. **Engenharia Agrícola**. [online], Jaboticabal, v.27, n.3, p. 773-781, 2007.

_____. Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.4, n.4, p.456-462, 2009.

BROWN, G.; BRINDLEY, G.W. **X-ray Diffraction Procedures for clay mineral Identification** In: BRINDLEY, G.W; BROWN, G. London: Mineralogical Society, 1980.

CARVALHO, J. M.; ANDREOTTI, M.; BUZETTI, S.; CARVALHO, M. P. Produtividade de cana soca sem queima em função do uso de gesso e vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 1, p. 1-9, jan./mar. 2013.

CAVALCANTI, F. J. A. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. 3.ed. (coord.) Recife, IPA, p. 212, 2008.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Vinhaça** – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. São Paulo: CETESB, 2007. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/P4_231.pdf>. Acesso em: 15 out. 2013.

_____. **Ficha de Informação Toxicológica: Potássio**. São Paulo/SP, 2012. Disponível em: <<http://biogas.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/47/2013/11/potassio.pdf>> Acesso em 01 de Julho de 2015.

CORREIA, F., MERCANTE, F., FABRÍCIO, A., CAMPOS, T., VARGAS JR. E., LANGENBACH, T. Adsorção de atrazina em solo tropical sob plantio direto e convencional. Pesticidas: **Revista Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 17, p. 37-46, 2007.

COSTA, P. **Avaliação em laboratório de parâmetros de transporte do chorume no Aterro Sanitário de Sauípe/BA**. 2002. 190 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. – Rio de Janeiro, RJ. 2002.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. **Diagnóstico do município de Igarassu**, estado de Pernambuco. MASCARENHAS, J. C. et al. (Org.). Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

CRUZ, L. F. L. S. Análise da viabilidade técnica/econômica/ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça: fertirrigação, concentração e biodigestão. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 29, p. 111-127, set. 2013.

DRAPE, N.R; SMITH, H., **Applied regression analysis**. 3.ed. New York: John Wiley e Sons, 706p.1998.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Mapa Exploratório-reconhecimento de solos do município de Itapissuma - PE**. Embrapa Solos, UEP Recife. 2000.

_____. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Análises laboratoriais. In: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**, 2 ed. rev. ampl., Brasília - DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 627, 2009.

_____. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. In: DONAGEMA, G. K. et al. (Org.). Manual de métodos de análise de solos, 2 ed., Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 230, 2011.

_____. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SPI, p. 353, 2013.

FLINT, A. L.; FLINT, L.E. Particle density. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, pt. 4, p. 229-240, 2002.

FREITAS, J. M. A. S. **Arquivo Pessoal**: fotos da visita de campo na Usina São José. Recife: 2013.

FREITAS, P. L.; POLIDORO, J. C.; SANTOS, H. G.; PRADO, R. B.; CALDERANO, S. B.; GREGORIS, G.; MANZATTO, C. V.; DOWICH, I.; BERNARDI, A. C. C. Identificação e caracterização físico-química de Latossolos de textura arenosa e média da região oeste da Bahia. **Cadernos de Geociências**, v. 11, n. 1-2, p. 82 - 92, nov., 2014.

GEE, G.W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J.H. & TOPP, G.C., eds. **Methods of soil analysis**. Physical methods. Madison, Soil Science Society of America Journal, Madison, Part4. 2002, p. 255-293.

GONÇALVES, B. O.; BEIJO, L. A. **Influência da linearização na estimação dos parâmetros da isoterma de Langmuir**. Jornada científica da Unifal-MG, 4., Mostra de extensão da UNIFAL-MG, 13., 2011, Alfenas. Anais eletrônicos... Alfenas: Unifal, 2011. Disponível em: <<https://www.unifal-mg.edu.br/caex/inscricoes/submissoes/S01402.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2015.

GOOGLE MAPS. **Área de estudo em Itapissuma**. [2014]. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/7%C2%B042'33.0%22S+34%C2%B054'22.0%22W/@-7.7094803,-34.9085251,1123m/data=!3m1!1e3!4m2!3m1!1s0x0:0x0>>. Acesso em: 13 out 2014.

GUO, X.; ZENG, L.(L.); LI, X.; PARK, H. S. Ammonium and potassium removal for anaerobically digested wastewater using natural clinoptilolite followed by membrane pretreatment. **Journal of Hazardous Materials**, v. 151, p. 125–133, 2008.

HANNAN, A.; RANJHA, A. M.; RAHMATULLAH; WAQAS, M. NIAZ, A. Potassium adsorption characteristics of four different textured alkaline calcareous soils. **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, v. 44, p. 242 - 247, n. 2, 2007.

JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis**: advance Course. 29. ed. Madison, 1975.

KYOTOKU, A.C.B.C. **Aplicação do vinhoto em processos de fertirrigação da cultura da cana-de-açúcar**: uma descrição de uso. 2011. 35 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB. 2011.

LINHARES, L. A.; EGREJA FILHO, F. B.; IANHEZ, R.; SANTOS, E. A. Aplicação dos modelos de Langmuir e Freundlich na adsorção de cádmio e chumbo em diferentes classes de solos brasileiros. **Revista Tecnológica**, Maringá, v. 17, p. 49-60, 2008.

- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Interpretação de análise de solo: conceitos e aplicações.** ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos, n. 2, p. 50, 2004.
- LYRA, M. R. C. C. **Avaliação do potencial poluidor da vinhaça utilizada sobre a qualidade das águas subterrâneas.** 92 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife: UFRPE.PE. 2002.
- LYRA, M. R. C. C.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A. Topossequência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n. 3, p.525-532, 2003.
- MADEJÓN, E. et al. Agriculture use of three (sugar-beet) vinasse composts: effect on crops and chemical properties of a Cambisol soil in the Guadalquivir river valley (SW Spain). **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 84, n. 1, p. 55-65, 2001.
- MARQUES, F.J.A. **Estudo de viabilidade econômica da implantação e operação de uma adutora de vinhaça.** 2010. 78 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL. 2010.
- MARTINS, E. de L. **Previsão da lixiviação de pesticidas usados na cultura de algodão no estado de Mato Grosso.** 2006. 83 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Universidade Federal Mato Grosso – Cuiabá, MT. 2006.
- MELLIS, E. V.; RODELLA, A. A. Influência do tempo de agitação na adsorção de Cd, Cu, Ni e Zn em Latossolo tratado com lodo de esgoto. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.4, p.977-982, 2008.
- MENDES, M. C. **Caracterização e gênese de uma topossequência Neossolo Quartzarênico - Latossolo Amarelo no parque nacional do Catimbau.** Recife, PE. 2012. 119 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE. 2012.
- MITRA, S. P.; PRAKASH, D. Adsorption of potassium as influenced by concentration and pH of the solution. **Clay Minerals**, v. 3, p. 151-153, 1956.
- MOORE, D. M.; REYNOLDS, R.C. **X-ray diffraction and identification and analysis of clay minerals.** Oxford: Oxford University Press, 1989.
- MOTA, F. O. B.; OLIVEIRA, J. B. Mineralogia de solos com excesso de sódio no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 799-806, 1999.
- NASCENTES, C. R. **Coeficiente de dispersão hidrodinâmica e fator de retardamento de metais pesados em solo residual compactado.** 2003. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2003.
- NASCENTES, R. **Estudo da mobilidade de metais pesados em um solo residual compactado.** 2006. 181 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa: Viçosa, MG. 2006.
- NASCIMENTO, H. R.; ABREU, Y. V. **Geotecnologias e o Planejamento da Agricultura de Energia.** Málaga: Eumed.Net, 2012.

NICOHELLI, L. M. **Sorção ao potássio de diferentes materiais submetidos à aplicação de vinhaça**. 2011. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT. 2011.

NORTHCOTT, K. A., BACUS, J., TAYA, N., KOMATSU, Y., PERERA, J. M., STEVENS, G. W. Synthesis and characterization of hydrophobic zeolite for the treatment of hydrocarbon contaminated ground water. **Journal of Hazardous Materials**, v. 183, p. 434-440, 2010.

PEIXOTO, A. M. et al. (coord.). **Enciclopédia Agrícola Brasileira: S - Z**. São Paulo: Edusp. 2007.

PELUCO, R. G. et al. Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.6, p.661-672, jun. 2013.

PEREIRA, V. H. C.; CESTARO, L. A. A unidade Geoambiental Tabuleiro Costeiro e o planejamento Municipal: O caso de Senador Georgino Avelino/RN. **Geonorte**, n. 4, v. 3, p. 390-401, 2012.

PERNAMBUCO - GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. SECTMA – Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. Atlas de Bacias Hidrográficas de Pernambuco. Coordenação Técnica de Simone Rosa da Silva. 104 p. Recife - PE. 2006.

PIGNATELLO, J. J. Sorption dynamics of organic compounds in soils and sediments; **SSSA Special Publication**, n. 22, New Haven, Connecticut, p. 45-80, 1989.

QUEIROZ, B. C. P. S.. **Elementos finitos para modelagem da sorção de contaminantes orgânicos na fração orgânica dos solos**. 2005. 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2005.

QUINTANA, K. A. **Irrigação e fertirrigação por gotejamento para cana-de-açúcar na presença e ausência de boro**. 2010. 70 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista: Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP. 2010.

REDDI, L. N. INYANG, H. I. **Geoenvironmental Engineering: Principles and Applications**. New York: Marcel Dekker, Inc., p. 119-132. 2000.

REIS JUNIOR, R. A. Probabilidade de resposta da cana-de-açúcar à adubação potássica em razão da relação $K^+ (Ca^{2+} + Mg^{2+})^{-0,5}$ do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 9, p. 1175-1183, set. 2001.

RITTER, E.; LEITE, A. E. B.; MACHADO, V. F. **Avaliação da capacidade de mitigação da argila orgânica presente na fundação e nas valas de contenção lateral para o chorume gerado no aterro metropolitano de Gramacho - Rio de Janeiro**. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, João Pessoa. Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Universidade Estadual Paulista, Botucatu. 1995. Disponível em <<http://canabrasil.com.br/cachaca-alcool-rapadura>>

biblioteca/doc_download/48-fisiologia-da-cana-de-acucar-instituto-de-biociencias-da-uep-botucatu-sp.>. Acesso em 01 de Julho de 2015.

ROLIM, M. M.; LYRA, M. R. C. C.; DUARTE, A. S.; MEDEIROS, P. R. F.; SILVA, E. F. F.; PEDROSA, E. M. R. Influência de uma lagoa de distribuição de vinhaça na qualidade da água freática. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 8, n. 1, p. 155-171, 2013.

ROLIM NETO, F. C. et al. Solo como parâmetro da qualidade ambiental. In: NEUMANN-LEITÃO, S.; EL-DEIR, S. (Org.). **Bioindicadores da Qualidade Ambiental.**, v. 1. Recife: Instituto Brasileiro Pró-Cidadania, p. 65 – 80, 2009.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Adubação:** resíduos alternativos. Brasília, DF: EMBRAPA, 2007. Disponível em:<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html#> Acesso em: 01 de Julho de 2015.

ROWE, R. K., QUIGLEY, R. M., BOOKER, J.R.. **Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilities.** E&FN Spon, London. p. 390, 1995.

SANTOS, H.G.; ZARONI, M.J.; ALMEIDA, E.P.C. **Árvore do conhecimento: Solos tropicais - Latossolos Amarelos.** In: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)/Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC). Solos Tropicais. Brasília: EMBRAPA/ageitec. [s.d.] Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000fzyjaywi02wx5ok0q43a0r58asu51.html>. Acesso em: 20 jul. 2015.

SANTOS, L. V.; POLIVANOV, H.; ALAMINO, R. C. J.; SILVA, V. H. G. Adsorção de Cloreto e Potássio em Solos Tropicais. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v.29, p.101-121, 2006.

SANTOS, R. L.; AZEVEDO, V. M.; FREIRE, F. J.; ROCHA, A. T.; TAVARES, J. A.; FREIRE, M. B. G. S. Extração e eficiência de uso de nutrientes em capim-elefante na presença de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 497-505, 2012.

SHACKELFORD, C. D. Contaminant Transport. In: DANIEL, D. E. (ed.) **Geotechnical practice for waste disposal.** 1 ed. United Kingdom: British Library, p. 33-65, 1993.

SIDHU, A. S.; NARWAL, R. P.; BRAR, J. S. Adsorption and desorption behavior of lead in soils amended with different organic material. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v. 52, p. 43 - 49, 2004.

SIGMA PLOT. Scientific Graphing Software. Versão 11.0. San Jose, California, USA, Jandel Corporation, 2008.

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.

SILVA, A. J. N.; RIBEIRO, M. R. Caracterização de latossolo amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de Alagoas: atributos morfológicos e físicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.684-688, 1997.

SILVA, M. L. S. TREVIZAM, A. R. Interações iônicas e seus efeitos na nutrição das plantas. International Plant Nutrition Institute. **Informações Agronômicas**, n. 149, p. 10-16, mar. 2015.

SOUSA, D. M.; G. LOBATO, E. **Latosolos**. [2005]. Disponível em: <www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_96_10112005101956.html>. Acesso em: 13 out 2013.

SPOSITO, G. **Soil Science Society America Journal**, n. 44, p. 652, 1980.

THAKUR S. K.; TOMAR, N. K., PANDEYA, S. B. Sorption of phosphate on pure and cadmium-enriched calcium carbonate and clay. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v. 52, p. 23-28, 2004.

UNICA (União da Industria de Cana-de-açúcar). **Maior produtor mundial de cana-de-açúcar**. 2013. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/>>. Acesso em: 04 de outubro de 2013.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Batch -type procedures for estimating soil adsorption of chemicals**. 1992, EPA/530/SW-87/006-F.

USINA SÃO JOSÉ. **Informações sobre a Usina São José**. [2013]. Disponível em: <<http://www.agenciaepronto.com.br/usinasaojose/index.php>>. Acesso em: 13 de outubro de 2013.

_____. **Institucional**. [2013]. Disponível em: <<http://www.usinasaojose.com.br/pt/>>. Acesso em: 13 de outubro de 2013.

UYEDA, C. A. **Influência da aplicação de vinhaça na condutividade hidráulica do solo saturado e no escoamento superficial**. 2009. 66 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP. 2009.

UYEDA, C. A. et al.. Influence of vinasse application in hydraulic conductivity of three soils. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.33, n.4, p.689-698, 2013.

VASCONCELOSA, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; SILVA, A. J. N.; OLIVEIRA, V. S.; SILVA, Y. J. A. B. Limites de consistência e propriedades químicas de um latossolo amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 639-648, 2010.

VASCONCELOSb, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; OLIVEIRA, V. S.; COSTA, Y. D. J. CAVALCANTE, D. M. Estabilidade de agregados de um latossolo amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 639-648, 2010.

VERDADE, F. C. Ação da água oxigenada sobre a matéria orgânica do solo. **Bragantia**. v. 13, n. único, p. 287-295, 1954.

VIEIRA, S. **Estatística para a qualidade**. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

VITTI, G. C.; QUEIROZ, F. E. C.; OTTO, R. QUINTINO, T. A. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ/USP - Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, [2005]. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Nutricao+cana+GVitti_000fh3r3vzp02wyiv80rn0etnmc6zamd.pdf>. Acesso em: 01 de julho de 2015.

WANG, F. L.; HUANG, P. M. Ion-selective electrode determination of solution potassium in soil suspension and its significance in kinetic studies. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 70 p. 411 - 424, 1990.

WANG, F. L.; HUANG, P. M. Effects of organic matter on the rate of potassium adsorption by soils. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 81, n. 3, p. 325 - 330, 2001.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2297-2305, 2008.

WU, F. C.; WU, P. H.; TSENG, R. L.; JUANG, R.S. Use of refuse-derived fuel waste for the adsorption of 4-chlorophenol and dyes from aqueous solution: Equilibrium and kinetics. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 45, n. 5, p. 2628-2639, 2014.

YAMAMURA, A. P. G. Aplicação de nanotecnologia no meio ambiente: biossorvente magnético na remoção de urânio. 2009. 124 p. **Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear)** – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, SP. 2010.

YANG, J. E.; SKOGLEY, E. O.; SCHAFF, B. E.; KIM, J. J. A simple spectrophotometric determination of nitrate in water, resin and soil extracts. **Soil Science Society of American Journal**, v.62, p.1108-1115, 1998.

ZUQUETTE, L. V.; SILVA JUNIOR, E. M.; GARCIA, A. Aspectos de sorção para os materiais inconsolidados da região de São Carlos (SP), Brasil. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 61, n. 2, p. 219-230, abr-jun. 2008.