

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO - UFRPE
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL - DTR
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - PPEAMB

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSPORTE DO
POTÁSSIO EM SOLOS FERTIRRIGADOS COM VINHAÇA**

MERCY ASTRID MORENO RODRÍGUEZ

Orientador: Prof. Dr. André Maciel Netto

Coorientador: Prof. Dr. João Paulo Siqueira da Silva

Recife, PE
Agosto, 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO - UFRPE
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL - DTR
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - PPEAMB

MERCY ASTRID MORENO RODRÍGUEZ

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSPORTE DO
POTÁSSIO EM SOLOS FERTIRRIGADOS COM 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

Coorientador: Prof. Dr. João Paulo Siqueira da Silva

Recife, PE
Agosto, 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R696d Rodríguez, Mercy Astrid Moreno
 Determinação dos parâmetros de transporte do potássio em solos fertirrigados com vinhaça / Mercy
 Astrid Moreno Rodríguez. - 2019.
 45 f. : il.

Orientador: André Maciel Netto.
Coorientador: João Paulo Siqueira da Silva.
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, Recife, 2019.

1. Vinhaça. 2. Potássio. 3. Parâmetros hidrodispersivos. 4. Cana-de-açúcar. I. Netto, André Maciel,
orient. II. Silva, João Paulo Siqueira da, coorient. III. Título

CDD 620.8

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSPORTE DO POTÁSSIO EM SOLOS FERTIRRIGADOS COM VINHAÇA

Mercy Astrid Moreno Rodríguez

APROVADA EM: 28.08.2019

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ MACIEL NETTO

COORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO PAULO SIQUEIRA DA SILVA

COMISSÃO EXAMINADORA:

PROF(A). DRA. LÍVIA PREVIADELLO DA SILVA- DEN/UFPE

PROF. DR. MARCUS METRI CORRÊA – TECNOLOGIA RURAL/UFRPE

PROF. DR. ANDRÉ MACIEL NETTO – DEN/UFPE

VISTO E PERMITIDA A IMPRESSÃO

COORDENADOR (A) DO PPEAMB/UFRPE

*Aos meus seres queridos que com sua luz, amor e força me acompanharam nesta
aventura maravilhosa de aprendizagem*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), por me aceitar no programa e pela oportunidade de concluir o curso; especialmente ao pessoal administrativo do DTR, Walquiria, Nanna, Dra. Vilma, e meus queridos professores Alex, Brivaldo, Romildo, Ramón e Vicente.

À FACEPE pela concessão de bolsa de estudo que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho e a minha moradia em Recife durante o mestrado.

Ao Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, por disponibilizar a infraestrutura necessária para a realização desse trabalho.

À Usina São José, por disponibilizar a área de estudo e vinhaça necessários para o desenvolvimento do trabalho.

Ao meu prezado orientador e amigo, o professor André Maciel por suas orientações, dicas, ajuda, apoio e extrema paciência neste processo de formação intelectual e de vida.

Ao meu coorientador João Paulo Siqueira, pelo aprendizado e conhecimentos compartilhados.

Dedico meu especial sentimento de gratidão a Deus e aos meus parentes que com sua bondade e amor preencheram um espaço na distância para me apoiar em todos os tipos de situações.

Agradeço sobretudo à minha mãe Maria del Carmen, por sua constante inspiração positiva em cada desafio que a vida trouxe para mim, ao meu pai Álvaro Moreno, por suas ideias e entusiasmo criador em cada jornada, ao meu irmãozinho Álvaro, por me escutar e me apoiar em cada momento da moradia no Brasil, e ao meu irmão Mauricio e à minha sobrinha Ana que com cada aventura que tinham para me contar tiravam um sorriso do meu rosto.

Às minhas amigas Ana Karinna, Andrea, Betty, Diana e Francy que com sua boa energia, me brindaram com seus conselhos, apoio, força e luz, de maneira constante para eu continuar brilhando de dentro para fora.

Ao meu primo Ronal que sem suas dicas e ajuda nos processos de seleção não teria conseguido chegar até este mestrado.

Aos amigos que a vida trouxe de presente para mim neste tempo, Daniele, Grazielle, Mikaela e Ricardo que me estenderam seu apoio e carinho em todo momento durante esta etapa, e aos meus prezados colegas Albeldson, Ana Paula, Bruno, Ítala, Lino, Thais, Uemeson e Zabele, que ao longo dos estudos estiveram e estão sempre presentes para me apoiar e me brindar com sua ajuda, especialmente Emanuelle Lorenas que foi um anjo caído do céu quando passei por problemas de saúde.

RESUMO

O acelerado crescimento da população tem incrementado a demanda do consumo de bioetanol e outros produtos derivados da cana-de-açúcar no Brasil, e este, por sua vez, desperta preocupação pelo cuidado com o meio ambiente, começando utilizar técnicas no processo que melhoram a destinação de subprodutos destas atividades. A vinhaça é um dos resíduos gerados da destilação do álcool e que pelas suas características físico-químicas, possui teores de nutrientes como o potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), fósforo (P), entre outros, que podem atuar no solo e na planta ao serem fertirrigados. Esse trabalho teve como objetivo avaliar a interação e o transporte do íon potássio (K^+), aplicado via vinhaça, em um Argissolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar, em colunas de solo, identificando assim as possíveis interações de adsorção, retenção e lixiviação deste elemento. Os ensaios foram realizados em colunas de solo, no laboratório de Avaliação da Contaminação do Solo LACS/UFPE. Para avaliar a interação, utilizou-se o modelo de convecção dispersão (CDE) e o modelo CDE – dois sítios (CDE-2S) de sorção através do programa CXTFIT, que permite o ajuste dos dados experimentais ao modelo. O modelo CDE-2S representou bem os dados experimentais das curvas de eluição do K^+ para ambas as colunas, indicando a existência do não-equilíbrio químico, ou seja, uma cinética de sorção. O modelo de avaliação permitiu determinar a capacidade de retenção e de dispersão do íon K^+ no solo, o qual demonstrou que a dosagem de vinhaça para uma camada de 0-20 cm, deve ser de maneira controlada, para evitar a lixiviação e consequente contaminação das águas subterrâneas.

Palavras-chave: Vinhaça, potássio, parâmetros hidrodispersivos, cana-de-açúcar.

ABSTRACT

The rapid growth of the population has increased the demand for bioethanol and other sugarcane products in Brazil, and this, in turn, raises concern for the care of the environment, starting to use techniques in the process that improve the environment, destination of by-products of these activities. Vinasse is one of the residues generated from alcohol distillation and due to its physicochemical characteristics, it has nutrient contents such as potassium (K^+), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), phosphorus (P), among others. Can act on the soil and plant when being fertigated. The objective of this work was to evaluate the interaction and transport of potassium ion (K^+), applied via vinasse, in a dystrophic yellow Ultisol cultivated with sugarcane, in soil columns, thus identifying the possible interactions of adsorption, retention and leaching of this element. The assays were performed in soil columns at the LACS / UFPE Soil Contamination Assessment laboratory. To evaluate the interaction, we used the convection dispersion model (CDE) and the CDE - two site (CDE-2S) sorption model using the CXTFIT program, which allows the experimental data to be adjusted to the model. The CDE-2S model represented well the experimental data of the K^+ elution curves for both columns, indicating the existence of chemical non-equilibrium, that is, sorption kinetics. The evaluation model allowed to determine the retention and dispersion capacity of the K^+ ion in the soil, which showed that the vinasse dosage for a 0-20 cm layer must be controlled, to avoid its leaching and consequent groundwater contamination.

Key Words: Vinasse, potassium, hydrodispersive parameters, sugarcane.

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADE
S	Solubilidade	$M L^{-3}$
S_w	Solubilidade em água	$M L^{-3}$
C	Concentração na solução	$M L^{-3}$
C_0	Concentração inicial	$M L^{-3}$
C_r	Concentração residente ou ambiente	$M L^{-3}$
CTC	Capacidade de troca de cátions	$cmol_c kg^{-1}$
CTA	Capacidade de troca de ânions	$cmol_c kg^{-1}$
K_d	Coefficiente de partição	$L^3 M^{-1}$
MO	Matéria Orgânica	LM^{-1}
λ	Dispersividade	L
D	Coefficiente de dispersão hidrodinâmica	$L^2 T^{-1}$
D_h	Coefficiente de dispersão mecânica	$L^2 T^{-1}$
J_m	Fluxo convectivo de solutos	$L T^{-1}$
J_s	Fluxo de massa convectivo	$L T^{-1}$
JD	Fluxo de solutos decorrente da difusão	$L T^{-1}$
M_s	Massa de solo seca	M
f	Parâmetro de interação	-
foc	Teor de carbono orgânico no solo	$M M^{-1}$
V_0	Volume Inicial de água na coluna	L^3
$V\ell$	Volume da parte líquida nos poros	L^3
v	Velocidade média de avanço	$L T^{-1}$
V_p	Volume de poros	L^3
K_d	Coefficiente de adsorção	$L M^{-1}$
R	Fator de retardo	-
x	Coordenada espacial	L
X	Distância	L
θ	Umidade volumétrica	$L^3 L^{-3}$
T	Fator de tortuosidade	-
t_{pulso}	Tempo de aplicação do pulso	T
ρ_s	Densidade do solo	$M L^{-3}$
ρ_p	Densidade da partícula	$M L^{-3}$
t_p	Tempo de permanência do soluto	T
ω	Coefficiente de Damkhöler	-

ε	Porosidade	%
β	Coeficiente de partição entre os dois sítios de sorção (CDE-2 sítios)	-
α	Coeficiente de transferência de massa	T ⁻¹
CDE	Modelo de convecção dispersão	
CDE-2	Modelo de convecção dispersão para dois sítios de sorção	
DRX	Difratômetro de raios-X	
RMR	Região Metropolitana de Recife	
CXTFIT	Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory	
FAO	Food and Agriculture Organization	
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento	
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	
MO	Matéria orgânica	
PROALCOOL	Programa Nacional do Álcool	
CESTEB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental	
CaCl₂	Cloreto de Calcio	
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar	
LACS	Laboratório de Avaliação da Contaminação do Solo	
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	

LISTA DE FIGURAS

Figure 1. Breakthrough curves (experimental and fitted) of CaCl_2 (as tracer) and Potassium (by vinasse) for dystrophic Yellow Ultisol (YUd).....	23
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características Químicas do mosto da Vinhaça	5
Table 1. Physical attributes of the dystrophic Yellow Ultisol under sugarcane crop. .	18
Table 2. Chemical attributes of the dystrophic Yellow Ultisol from the northern forest of Pernambuco.	19
Table 3. Chemical characteristics of vinasse.....	20
Table 4. Parameters used in the tracer and potassium miscible displacement assays	21
Table 5. Results of hydrodispersive parameters for the Calcium Chloride (CaCl_2 , tracer) assay in the three soil columns	21
Table 6. Results of the potassium hydrodispersive parameters estimated from the CD - two sorption sites model for dystrophic Yellow Ultisol (YUd).	23

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Fertilizantes na cultura da cana-de-açúcar.....	3
2.2. Vinhaça	4
2.3. Importância do Potássio na cultura da cana-de-açúcar	6
2.4. Transporte de solutos no solo	7
2.4.1. Modelo convecção dispersão (CDE).....	8
3. ARTIGO CIENTÍFICO	12
3.1. Introduction	12
3.2. Materials and methods	14
3.2.1. Soil.....	14
3.2.2. Vinasse	15
3.2.3. Assays in soil columns	15
3.2.3.1. Convection-Dispersion Model (CD).....	16
3.2.3.2. CD-2 sorption sites model (CD-2S).....	17
3.3. Results and discussions	18
3.3.1. Physical attributes of soil.....	18
3.3.2. Chemical attributes of soil	19
3.3.3. Vinasse	20
3.3.4. Trace and K miscible displacement assays	20
3.4. Conclusions	25
3.5. References	25
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

1. INTRODUÇÃO

Depois da maior crise de petróleo do mundo, o governo brasileiro junto com os empresários inaugurou o Programa Nacional do Álcool - PROÁLCOOL no ano de 1975, incentivando e propondo o álcool como um dos principais combustíveis (PROÁLCOOL, 1975). Depois da conferência das Nações Unidas no Rio de Janeiro no ano 1992 (ECO 92), o programa foi identificado como modelo de desenvolvimento sustentável por reduzir os padrões de consumo comuns especialmente com a diminuição das emissões de CO₂ (CORAZZA, 2006). A partir da ECO 92, como uma forma de salvaguardar os recursos naturais, o Brasil, começou a incentivar mais intensamente a cultura da cana-de-açúcar como meio para a produção de biocombustível.

No entanto, o processo de produção do álcool apresenta como um de seus subprodutos a vinhaça, que após a normativa do PROÁLCOOL começou a ser utilizada na fertirrigação da cultura da cana-de-açúcar. Logo percebeu-se que era um grande componente poluidor para os mananciais e fontes hídricas, e que em excesso poderia deteriorar as condições dos solos, devido ao conteúdo nutricional que possui. A vinhaça, como mencionado anteriormente, é um subproduto do processo da destilação do álcool e para cada litro produzido de álcool, se obtém em média aproximadamente 13 litros de vinhaça, o que antigamente era despejado ao meio ambiente a temperaturas elevadas e no leito dos rios impactando os corpos d'água, especialmente devido à sua caracterização, pois além de matéria orgânica, contém teores de potássio, nitrato, cálcio, fósforo e outros nutrientes (FREITAS 2015; VALÉRIO et al., 2015). A partir desse momento surgiram as primeiras pesquisas sobre fertirrigação dos cultivos com vinhaça (FAO, 2017).

Segundo a CETESB (2015), devido a presença do potássio (K) na vinhaça, quando a mesma é aplicada adequadamente no solo promove a melhoria da fertilidade, já que cerca de 150 m³ ha⁻¹ equivalem à adubação de 343 kg ha⁻¹ de potássio, 61 kg ha⁻¹ de nitrogênio, 40 kg ha⁻¹ de fósforo, 108 kg ha⁻¹ de cálcio e 80 kg ha⁻¹ de enxofre (MEDEIROS et al., 2003). Por tanto, as quantidades de aplicação não devem ultrapassar a capacidade de retenção de água do solo (VIEIRA, 1986), uma vez que pode ocorrer a lixiviação de vários desses elementos, principalmente

nitrato e potássio, presentes em grande quantidade na vinhaça e causar a contaminação do meio ambiente.

Por ter estas características, a vinhaça em algumas usinas é aplicada em 70% da sua área de cultivo (NETO, 2005), geralmente sem ter um estudo prévio do solo, o que pode gerar uma carga excessiva de nutrientes (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , P, entre outros), chegando até a comprometer a qualidade da cana-de-açúcar (FREITAS, 2015; MORENO, 2015). Como consequência da aplicação prolongada da vinhaça no solo, ocorre alteração do pH do solo, elevando a acidez e a salinização do solo e da água (GONÇALVES et al., 2008).

Devido a isso, é recomendável fazer análises dos resíduos para o descarte no solo, ou como neste caso, sua reutilização como fertilizante, com base em estudos detalhados que envolvam a precipitação, a adsorção e o transporte dos poluentes, pois cada solo tem uma capacidade de adsorção própria a qual se for ultrapassada, a vinhaça fica potencialmente disponível para ser lixiviada, e pode afetar as águas superficiais e subterrâneas. Esta contaminação vai depender também de uma série de fatores relacionados à quantidade de resíduos depositados no solo, a concentração desses resíduos, ao clima local (precipitação) e a capacidade de retenção do solo (AMARAL SOBRINHO et al., 1992; BRITO et al., 2007).

Os modelos de simulação ajudam a entender como os processos ocorrem no solo, relativos ao deslocamento de solutos, constituindo ferramentas aplicáveis a estudos de minimização de impactos ao meio ambiente. É importante que se obtenha sucesso da simulação e resolução das equações que predizem o deslocamento de solutos no solo para uma melhor determinação dos parâmetros de transporte que influenciam na relação solo-soluto. Os parâmetros de maior relevância que podem ser obtidos são a velocidade da água no poro, os coeficientes de difusão-dispersão e o fator de retardamento (SILVA et al., 2012).

Diante do exposto, este trabalho, objetivou avaliar a interação e o transporte do íon potássio (K^+), aplicado via vinhaça, em um solo representativo da zona canavieira (Argissolo Amarelo distrófico) do Estado de Pernambuco, em colunas de solo, identificando assim as possíveis interações de adsorção, retenção e lixiviação deste elemento através do programa CXTFIT.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Fertilizantes na cultura da cana-de-açúcar

Em meio à preocupação mundial para reduzir as emissões causadas pelo consumo de combustíveis fósseis, o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar está obtendo cada vez mais força, e sua produção no Brasil está aumentando de acordo com os dados da EMBRAPA (2016). O aumento da produção da cana-de-açúcar traz como consequência o aumento do uso de fertilizantes. Segundo o IBAMA (2014), o uso de fertilizantes e agrotóxicos é considerado ainda um grande problema de saúde pública, além de estar ligado com a contaminação dos solos e de corpos hídricos.

Porém, estudos têm sido feitos para avaliar a produtividade da cana-de-açúcar, onde segundo Silveira et al. (2015), estima-se que elementos como o potássio (K) ajudam no desenvolvimento da planta de cana-de-açúcar, principalmente contribuindo com sua fotossíntese e seu crescimento, sendo este um nutriente absorvido pela planta no estágio de crescimento. Dessa forma, surge a necessidade de incorporar adubos que melhoraram as qualidades produtivas de desenvolvimento da cultura.

Esta necessidade aumentou o uso de fertilizantes com um alto teor de K, que junto com a grande quantidade de água de irrigação que era utilizada na cultura, resultava muitas vezes em um prejuízo para o meio ambiente e a população, impactando especialmente aos corpos d'água. Assim, o setor sucroalcooleiro começou a utilizar técnicas para diminuir o consumo de água na fertirrigação e a aplicação de fertilizantes químicos. Surgiu, então, o aproveitamento dos resíduos da produção, como a vinhaça, que é reconhecida pelos benefícios que proporciona na aplicação ao solo (PAVINATO; ROSOLEM, 2008), resultando em um bom desenvolvimento vegetal, diminuindo os elementos tóxicos no solo e na planta, melhorando também a capacidade de troca de cátions (CTC). Além disso, a vinhaça é considerada uma grande fonte nutricional para a cultura em K, e segundo as regulações da norma técnica P4.231/2006 (Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola) da CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), pode ser reaproveitada como fertilizante biológico, melhorando o

desenvolvimento da planta, diminuindo a captação de água, aproveitando os resíduos da produção e reduzindo o impacto negativo no meio ambiente e na população (MORINI, 2017).

2.2. Vinhaça

A vinhaça é um subproduto da destilação da cana-de-açúcar especialmente da produção do álcool, que desde a década dos anos 40 e 50 já era um resíduo despejado nos corpos d'água e nos solos, que não tinha vigilância e que despertou a preocupação de órgãos de controle ambiental e da comunidade científica (CORAZZA, 2006). Tem sido identificada desde 1970, devido ao Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), como um resíduo gerador de biomassa, entretanto, apenas no ano de 2004, a vinhaça começou a ser considerada como uma substância poluidora, sendo classificada como resíduo de classe II A - 17 não inerte, segundo a Norma 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), pois tem características de ser solúvel em água, entrar em combustão e se biodegradar (FREITAS, 2015). A partir do ano 2005 foi criada a norma técnica P4.331 no estado de São Paulo, que estabelece os procedimentos de armazenamento, transporte e disposição da vinhaça no solo e assim conseguir uma melhoria nos processos de fertirrigação, especialmente pensando no controle de resíduos ao meio ambiente (CETESB, 2015).

Dentre as características que identificam a vinhaça, além das mencionadas na Tabela 1, está o grande volume deste resíduo gerado nas usinas canavieiras, pois, se obtém 13 litros de vinhaça para cada litro produzido do álcool. Sua acidez é baixa (pH), e tem alto teor de matéria orgânica, e de elementos como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ (BRITO et al., 2009), o que resulta em boas condições para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, especialmente nos solos que apresentam baixa fertilidade (FREITAS, 2015), uma vez que, aumenta a CTC. De acordo com as análises químicas (Tabela 1), pode-se identificar que a vinhaça é um meio de transporte destes componentes ao solo, o que gera um impacto econômico positivo, já que os custos utilizados em fertilizantes químicos são otimizados e gera, também, um impacto ambiental de duas formas diferentes, uma positiva onde a vinhaça ao ser utilizada como fertilizante no solo é dosificada em quantidades que promovem a

melhoria e a qualidade do solo, e outra negativa, já que por ser um líquido que tende a ser solúvel em água, pode chegar a se converter em poluente, causando prejuízos no equilíbrio ecológico das águas, causando eutrofização e desta maneira alterando os recursos pesqueiros, especialmente as águas subterrâneas (CETESB, 2015).

Segundo os dados da Tabela 1, a vinhaça tem pH ácido, portanto é um líquido corrosivo, e na maioria dos casos de poluição, identifica-se que a aplicação da vinhaça ao solo tem sido em excesso, o que ocasiona a chegada de elementos como o potássio, o nitrato e o fósforo aos efluentes, aos mananciais e as águas subterrâneas, representando uns dos maiores problemas ambientais para as usinas (SILVA, 2014), e só através de estudos da área de aplicação e da vinhaça, pode-se ter uma ideia sobre a quantidade e forma de aplicação da mesma para o tipo de solo e a plantação específica, com a finalidade de evitar a lixiviação, embora se tenha prejuízos na fauna e flora.

Tabela 1. Características Químicas do mosto da Vinhaça

ELEMENTO	VINHAÇA DE MOSTO		
	MELAÇO	MISTO	CALDO
N (Kg m ⁻³)	0,77	0,46	0,28
P ₂ O ₅ (Kg m ⁻³)	0,19	0,24	0,2
K ₂ O (Kg m ⁻³)	6,00	3,06	1,47
CaO (Kg m ⁻³)	2,45	1,18	0,46
MgO (Kg m ⁻³)	1,04	0,53	0,29
SO ₄ (Kg m ⁻³)	3,73	2,67	1,32
Mat. Orgânica (Kg m ⁻³)	52,04	32,63	23,44
Fe (ppm)	80	78	69
Cu (ppm)	5	21	7
Zn (ppm)	3	19	2
Mn (ppm)	8	6	7
pH	4,4	4,1	3,7

Fonte: BAFFA et al. (2008)

Apesar de ser uma substância de alto risco para o meio ambiente por causar poluição nos cursos de águas superficiais e ao lençol freático, a vinhaça ao ser utilizada de maneira adequada pode trazer grandes benefícios especialmente com a

fertirrigação, onde a adubação é feita junto com a irrigação em quantidades racionais para as culturas, reduzindo os custos agrícolas. Por ser compatível com as características físico-químicas do solo, pode-se incrementar a produção e contribuir com a conservação ambiental e a redução da compra de insumos agrícolas (ABRÃO, 2010). Também, ao ser reutilizada, reduz a emissão de gases do efeito estufa já que vai diretamente como nutriente ao solo, e as vezes é empregada em alguns processos de comercialização como alimento animal, em substituição do melaço, gerando benefícios econômicos e ambientais (EMBRAPA, 2009).

2.3. Importância do Potássio na cultura da cana-de-açúcar

O K encontra-se disponível de várias formas para atender as necessidades nutricionais da cultura (OLIVEIRA et al., 2013). Este elemento é um dos macronutrientes que as plantas precisam, devido ao seu regulamento hídrico especialmente em períodos de seca, que junto com o nitrogênio (N) e o fósforo (P) aportam o equilíbrio e o desenvolvimento proteico da planta. Sem o K, as plantas podem murchar permanentemente, não sendo possível a saída de vapor da água e gases residuais da planta (SILVEIRA, 2000).

Dentre as propriedades do K, está o melhoramento da tolerância da planta ao estresse hídrico através da osmorregulação, além da influência no crescimento e o desenvolvimento dos frutos, mas quando o K está em deficiência, as plantas começam a apresentar sintomas como necrose nas bordas das folhas, enfraquecimento no sistema radicular e outros, devido aos diferentes fatores edáficos do solo, os quais afetam a absorção do íon potássio (K^+) na planta (SANTOS, 2019).

Segundo Medeiros et al. (2014), o K apresenta-se disponível de diferentes formas no solo, tais como: forma mineral, que é insolúvel e requer muito tempo para chegar a uma forma que a planta possa assimilar; K^+ fixo, o qual requer processos lentos e ainda não está disponível para ser absorvido pela planta; e o K^+ trocável, que é aquele que pode ser absorvido pela planta. Estas formas estão disponíveis no solo formando um equilíbrio, de modo que este equilíbrio pode ser alterado devido a adubação, a absorção de K^+ pela planta ou sua perda por lixiviação. Tudo isto pode

causar mudanças nos teores das demais formas do K no solo, especialmente nas formas de K^+ trocável e não trocável, e o K^+ em solução, vai depender também das características do solo, especialmente com relação aos teores de argila, CTC e minerais presentes. Esses aspectos são os que contribuem na movimentação e dinâmica do K no perfil do solo.

No solo, o K pode apresentar-se na forma estrutural, que é aquele que está presente nas estruturas dos minerais primários e secundários e que pode chegar a compartilhar com a planta numa quantidade pequena, através de cargas negativas na solução do solo (ERNANI et al., 2007). Essa disposição com as plantas melhora o crescimento e desenvolvimento especialmente nos frutos e seu tamanho, devido às sínteses de proteínas, mas quando atinge os limites, gera excesso e pode prejudicar o desenvolvimento na solução do solo, o qual pode ser lixiviado chegando as fontes hídricas e causando possíveis contaminações ao meio ambiente (SILVA et al., 2007). Segundo Silva et al. (2007), menciona-se que num estudo realizado em 1981, foi observado que a retenção do K no solo não foi alta, pois ele ficava retido na camada entre 0 e 50 cm, tendo uma lixiviação pequena.

Segundo Silva (2005), nos solos arenosos a disponibilidade de K é menor, pois o mesmo encontra-se em forma mineral, e requer muito mais tempo no processo de intemperização. Sendo assim, a fertirrigação dos solos na cultura da cana-de-açúcar com vinhaça, é um complemento ideal para o solo e o desenvolvimento da planta. O importante é que a vinhaça esteja distribuída nos níveis adequados segundo a normatividade e as necessidades do solo e da planta, pois se no solo tiver aplicação de doses elevadas, pode ocorrer uma saturação das cargas de K^+ no solo, o que pode ocasionar excesso de potássio interferindo na absorção, retenção e perda de outros nutrientes por lixiviação (SOTO et al., 2017), alterando a fertilização do solo, qualidade do desenvolvimento da cultura e contaminação do meio ambiente, especialmente fontes hídricas.

2.4. Transporte de solutos no solo

Na região Nordeste, o solo apresenta tabularidades que proporcionam um formato fisiográfico que envolve entorno de 50 a 60 km de largura, e tem declives

tênuas que ficam próximos ao mar, foi daí que surgiu o nome de Tabuleiro Costeiro (FREITAS, 2015). Os Tabuleiros têm na sua composição sedimentos da formação barreiras, que resultam na formação dos Argissolos e Latossolos, os quais se encontram em grande profundidade (aproximadamente dois metros) e em fase avançada de intemperismo, facilitando a presença de quartzos, argilominerais e alguns óxidos. Promove a drenagem e permite que sejam utilizados para cultivos de duração anual, já que apresentam também uma estrutura granular em microescala (FREITAS, 2015).

O Tabuleiro Costeiro possui pouca capacidade de armazenamento de água, o que influencia a dinâmica do transporte de solutos, e dependendo das características pontuais de estudo, vai ser determinado o comportamento que cada elemento terá no solo e na planta. Assis (2016) relata que os solutos se movimentam no solo ocupando entre 15 e 35 % do volume total, onde podem ser absorvidos pela planta ou podem ser lixiviados.

Muitos fenômenos podem influenciar o transporte de solutos num meio poroso, transportando também contaminantes com algum fluido (solvente), aderindo-se as superfícies através de processos físico-químicos e bioquímicos (ASSIS, 2016).

Em relação à vinhaça, as propriedades físico-químicas do solo mudam, pois pode atuar como um dispersante ou floculante de partículas ocasionando mudanças na estrutura, geralmente em parâmetros como a permeabilidade, densidade, CTC e pH. Porém, estas variações podem influenciar os problemas de contaminação no solo e nas fontes hídricas (águas subterrâneas e superficiais), também interferir nas propriedades hidráulicas do solo (SOTO et al., 2017). Mudanças ou dinâmicas que podem ser avaliadas mediante o modelo de equação diferencial convecção-dispersão CDE, através do programa CXTFIT desenvolvido por Parker & Van Genuchten (1984).

2.4.1. Modelo convecção dispersão (CDE)

Segundo Freitas (2015), a relação entre a área superficial das partículas sólidas do solo e a fase líquido-gasosa (solutos) é baseada no transporte de íons que geram a troca de cátions ocorrente entre moléculas eletricamente compatíveis. As

substâncias orgânicas, as argilas do solo e compostos óxidos do ferro e alumínio, possuem cargas elétricas negativas (ânions), o que facilita a troca iônica com cargas positivas (cátions). Este transporte de solutos no solo ou meio poroso pode ser definido pelo modelo de convecção-dispersão (CDE).

A movimentação dos solutos no meio poroso através de um fluxo na equação do modelo de convecção-dispersão é dada por:

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = - \frac{\partial J_s}{\partial z} \quad (1)$$

Em que:

θ : unidade volumétrica ($L^3 L^{-3}$);

C : concentração do soluto ($M L^{-3}$);

t : tempo (T);

J_s : fluxo de massa convectivo-dispersivo ($L T^{-1}$);

z : profundidade (L).

Para um meio poroso indeformável com deslocamento de água permanente a Equação 1 se transforma na Equação 2.

$$\rho_d \frac{\partial S}{\partial t} + \theta \frac{\partial C}{\partial t} = \theta D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

(1) (2) (3) (4)

Cada número apresenta a descrição da passagem de soluto, o termo (1) descreve a fase líquida para a fase sólida, onde se incluem processos de adsorção-dessorção considerando o equilíbrio cinético; (2) descreve a variação da fase líquida ao longo do tempo, (3) transferência por dispersão, associada a difusão molecular provocada por variações de velocidade; (4) representa convecção (onde o soluto é transportado a velocidade média da água). Segundo Assis (2016), essas equações representam o fenômeno do transporte de soluto em meio poroso, já que o contaminante se move em diferentes direções preenchendo os espaços vazios dos poros e aderindo-se nas áreas influenciadas pela força de atração no meio, através de processos físicos (convecção, dispersão, difusão molecular, retenção fluida e transporte coloidal), químicos (sorção, decaimento radioativo, precipitação, co-

precipitação e oxirredução) e biológicos (biodegradação e biotransformação), estando num meio saturado ou não.

Estes processos respondem à movimentação ou transporte de solutos, no fluxo de água, que ao passar pelas colunas de solo do estudo, interagem com os íons na matriz do solo, com a finalidade de monitorar seu deslocamento. Para os processos físicos de transporte mencionados apresenta-se o transporte convectivo, o qual representa o deslocamento passivo do soluto-solução segundo a seguinte equação:

$$J_m = qC_r \quad (3)$$

Em que:

J_m: Fluxo convectivo de solutos (L T⁻¹);

q: Fluxo convectivo de solutos (L T⁻¹);

C_r: Concentração residente (M L⁻³).

Outro processo físico é o transporte difusivo no qual a energia cinética induz a movimentação dos íons na direção gradiente da concentração, o que ocorre pela analogia da lei de Fick:

$$J_D = -\theta D_m \frac{\partial C_r}{\partial x} \quad (4)$$

Em que:

J_D: Fluxo de solutos decorrentes da difusão (L T⁻¹);

θ: Teor de água no solo (L³ L⁻³);

D_m: Coeficiente de difusão iônica ou molecular no meio poroso (L² T⁻³);

x: Distância (L).

Já em função da heterogeneidade e irregularidade dos poros, o coeficiente de difusão do solo identificado como D_m é menor que o coeficiente de difusão na água D₀:

$$D_m = D_0 \tau \quad (5)$$

Em que:

τ: Fator de tortuosidade com valores entre 0,3 e 0,7

No processo do transporte dispersivo, levam-se em conta as diferenças das velocidades de escoamento dos fluidos dentro dos poros individuais e entre os poros de diferentes formas, tamanhos e direções, com a seguinte equação:

$$J_h = -\theta D_h \frac{\partial C_r}{\partial x} \quad (6)$$

Em que:

J_h : Fluxo de solutos decorrente da dispersão hidrodinâmica ($L T^{-1}$);

θ : Teor de água no solo ($L^3 L^{-3}$);

D_h : Coeficiente de dispersão mecânica ($L^2 T^{-3}$);

x : Distância (L).

O coeficiente de dispersão mecânica D_h resulta da velocidade do fluido assim:

$$D = D_h = \lambda v^n \quad (7)$$

Em que:

λ : Dispersividade (L);

v : velocidade média de água nos poros ($v=q/\theta$);

n : constante empírica com valor aproximado de 1,0.

Sob o ponto de vista macroscópico, D_m e D_h são similares, podendo ser considerados aditivos:

$$D = D_m + D_h \quad (8)$$

Em que: D é o Coeficiente dispersivo-Difusivo ou coeficiente de Dispersão (HILLEL, 1980; VAN GENUCHTEN; WIERENGA, 1986).

3. ARTIGO CIENTÍFICO

Fate and transport of potassium in fertilized soil with vinasse

ABSTRACT

Vinasse is one of the residues generated from alcohol distillation and due to its physicochemical characteristics, it has nutrient contents such as potassium (K^+), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), phosphorus (P), among others, which can act on the soil and plant when fertigated. The aim of this work was to assess the fate and transport of potassium ion (K^+), applied via vinasse, in a dystrophic yellow Ultisol cultivated with sugarcane, thus identifying the possible adsorption, retention and leaching processes of this element. The miscible displacement assays were performed on saturated soil columns. Convection-dispersion (CD) and CD two-site sorption (CD-2S) models were used to adjust the experimental data using the CXTFIT program. The CD-2S model represented well the experimental data of the K^+ breakthrough curves for both columns, indicating the existence of chemical non-equilibrium, that is, sorption kinetics. The CD-2S model allowed to properly determine the retention and leaching capacity of the K^+ ion in the soil, which showed that the vinasse dosage for a 0-20 cm layer must be controlled, to avoid its leaching and consequent groundwater contamination.

Keywords: Potassium, vinasse, hydrodispersive parameters, sugarcane

3.1. Introduction

The main source of raw material is sugarcane, which when processed generates some by-products that are reincorporated in the process, in this case vinasse, which is the result of the fermentation of sugarcane juice (CETESB, 2015). Due to its physicochemical characterization, vinasse generally contains, in addition to organic matter, high levels of potassium, nitrate, calcium, phosphorus and other

nutrients (VALÉRIO et al., 2015), which have a great impact on the environment especially on water bodies and groundwater. Thus, the vinasse began to be used to fertigate the sugarcane plantations, with the purpose of reducing the use of chemical fertilizers in the crops, the possible contamination of water sources, and thus contribute to the mitigation of impacts on the environment (FAO, 2017).

On average, for each liter of alcohol produced there are thirteen liters of vinasse that are used in fertigation, thanks to the presence of essential nutrients beneficial to the plant (CETESB, 2015). Properly applied vinasse promotes improved soil fertility, as about 150 m³ ha⁻¹ equals fertilization of 61 kg ha⁻¹ nitrogen, 40 kg ha⁻¹ phosphorus, 343 kg ha⁻¹ potassium, 108 kg ha⁻¹ of calcium and 80 kg ha⁻¹ of sulfur (MEDEIROS et al., 2003). However, when used for this purpose, the quantities should not exceed the soil water retention capacity (VIEIRA, 1986), since once the leaching of several of these elements, especially nitrate and potassium, present in large quantities in vinasse occurs, soil pH and salinization can be altered (MORENO; TEIXEIRA, 2015), and even cause salinization and groundwater contamination (SILVA et al., 2007; SILVA et al., 2014).

In addition to providing water and nutrients, fertigation with vinasse introduces nutrients into the subsurface soil such as exchangeable Ca²⁺, Mg²⁺ and K⁺, enriching the soil. The problem arises from the disproportion of K in relation to the other nutrients present in vinasse. Some sugar mills, understanding that by applying higher doses, an increase in profits can be expected, both for the fertilized economy and for increased agricultural yields. Potassium favors sugarcane vegetation and tillering, as it acts in several physiological aspects, but the excess of this nutrient can disrupt various structural and metabolic functions of the plant (FREITAS et al., 2018).

It is advisable to analyze the vinasse for reuse as fertilizer, based on detailed studies involving precipitation, adsorption and transport of pollutants, as each soil has its own adsorption capacity, which if surpassed, the vinasse is potentially available for leachate, and may affect surface and groundwater. This contamination will also depend on a number of factors related to the amount of residues deposited in the soil, the concentration of these residues, the local climate (precipitation) and the soil retention capacity (AMARAL SOBRINHO et al., 1992; BRITO et al., 2007).

Vinasse can cause various changes in soil chemical properties such as pH, organic matter (OM), nutrient availability such as Potassium (K), cation exchange capacity (CEC) and electrical conductivity (SILVA et al., 2006; BRITO et al., 2009; BARROS et al., 2010; ZOLIN et al., 2011).

Vinasse can also provide an improvement in soil aggregation, resulting in a higher water infiltration capacity into the soil (SILVA et al., 2007; GARIGLIO et al., 2014). According to Brito et al. (2005), increasing doses of vinasse increase the exchangeable K concentration, especially in the superficial layers of the soil.

The way the soil retains the K applied by the vinasse is very dependent on the soil CEC, consequently, the clay and organic matter contents in the soil have a great contribution in the degree of leaching (RIBEIRO et al., 2014). Thus, soils with low CEC will have difficulty in retaining the applied K; therefore, washing this element becomes a problem for sandy soils (LIBARDI, 2005).

Simulation models help to understand how processes occur in the soil, related to solute displacement, and are tools applicable to environmental impact minimization studies. It is important to successfully modeling and simulate the equations that predict the displacement of solutes in the soil to better determine the transport parameters that influence the soil-solute relationship. The most relevant parameters that can be obtained are pore water velocity, diffusion-dispersion coefficients and retardation factor (SILVA et al., 2012).

Given the above, this work aims to evaluate the fate and transport of Potassium ion (K^+), applied via vinasse, in a representative soil of the sugarcane zone (dystrophic Yellow Ultisol) of Pernambuco State, Brazil. Potassium transport will be determined by miscible displacement at fully saturated laboratory columns, and transport parameters will be estimated using the CXTFIT program.

3.2. Materials and methods

3.2.1. Soil

The soil of the study was collected in an area of a mill already fertigated with vinasse in different points ($7^{\circ}48'0,54''S$ and $35^{\circ}0'18,45''W$), being a dystrophic Yellow Ultisol - half slope (YUd), grown with sugarcane.

Ten soil samples were randomly collected in the study area to form a composite sample in the 0-20 cm surface layer. The soil samples were stored in plastic bags, identified and taken to the Soil Contamination Assessment Laboratory - LACS / UFPE. The soil was placed to dry in a covered and airy place, then it was break up and passed through a 2 mm mesh sieve. This material was stored in a plastic bag and used for chemical and physical characterization (EMBRAPA, 2011), and for column assays.

3.2.2. Vinasse

Vinasse was collected in a tank of vinasse diluted at the proportion of 1:3 (vinasse:water). In the laboratory, the vinasse was subjected to physicochemical characterization in pH meter, electrical conductivity (EC) meter, and flame photometer, with three replicates for each procedure. The characterization of Potassium was according to the Brazilian Norm 13805 (ABNT 1997).

3.2.3. Assays in soil columns

Potassium transport parameters were obtained from miscible displacement assays in three 20.5 cm high and 5 cm diameter glass columns, filled with an average of 554.76 g of disturbed soil for each column, a twelve-channel peristaltic pump, solute reservoirs for: deionized water, Calcium Chloride (CaCl_2) 0.05 mol L^{-1} , used as tracer, vinasse; a fraction collector, test tubes, precision electronic balance, conductivity meter and flame photometer.

The experiment consisted of displacing a certain volume of solute (V_0) of known concentration (C_0) in the three soil columns, previously saturated with deionized water, and with the help of a peristaltic pump the flow was injected with a constant average velocity.

As the solute infiltrates through the pores of the soil, it diffuses at varying velocities. The progression of the solute advance is followed by measuring the

effluent concentration (C) over time. The evolution of the C/C_0 ratio as a function of the number of pore volumes of the collected effluent (V/V_0) provides the breakthrough curve. Then, and under the same conditions used for the tracer, the assays were performed with the vinasse.

To determine the potassium content in the effluent solutions, it was necessary to analyze the samples by means of the flame photometer, according to the procedure of ABNT-NBR 13805 (ABNT, 1997).

Hydrodispersive parameters were estimated using the convection-dispersion (CD for tracer) and convection-dispersion at two sorption sites (CD-2S for vinasse) models using the CXTFIT 2.0 program (Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments) developed by Toride et al. (1995).

3.2.3.1. Convection-Dispersion Model (CD)

The convection-dispersion equation (CD) for the one-dimensional transport of porous solutes subjected to adsorption in a homogeneous and undisturbed soil in the dimensionless form is given by:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

where C is the concentration of the solute in the liquid phase [$M L^{-3}$], D is the hydrodynamic dispersion coefficient [$L^2 T^{-1}$], t is time [T], x is the spatial coordinate [L], v is the mean velocity of solution [$L T^{-1}$], and R is the retardation factor given by:

$$R = 1 + \frac{\rho_d K_d}{\theta} \quad (2)$$

where K_d is the distribution coefficient ($K_d = S/C$) representing the distributed concentrations between the liquid (C) and sorbed (S) phase [$M L^{-3}$], θ is the volumetric water content [$L^3 L^{-3}$], and ρ_d is the dry bulk density [$M L^{-3}$].

3.2.3.2. CD-2 sorption sites model (CD-2S)

When the solute interacts with the solid matrix of the soil, this interaction may occur instantaneously or not, represented by parameter (f), which corresponds to the fraction of sorption sites for which equilibrium is instantaneous with the liquid and mobile phase, and $(1-f)$ which corresponds to the fraction of sorption sites for which equilibrium only occurs over time (van Genuchten and Wierenga, 1986).

For the case of steady flow in homogeneous soil, the transport of a solute whose sorption is linear in the dimensionless form is given by:

$$\beta R \frac{\partial C_1}{\partial T} + (1-f)R \frac{\partial C_2}{\partial T} = \frac{1}{P} \frac{\partial^2 C_1}{\partial Z^2} - \frac{\partial C_1}{\partial Z} \quad (3)$$

$$(1-\beta)R \frac{\partial C_2}{\partial T} = \omega(C_1 - C_2) \quad (4)$$

where C_1 is the mobile concentration, C_2 is the immobile concentration, β is the partition coefficient between the two sites, P is the Péclet number, ω is the Damkholer's number, T is time, and $Z = x/L$ is the dimensionless spatial coordinate.

With:

$$\beta = \frac{\theta + \rho_d f K_d}{\theta + \rho_d K_d} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{\alpha(1-\beta)RL}{v} \quad (6)$$

The initial boundary condition for the non-equilibrium transport model is given by:

$$C_1(Z, 0) = C_2(Z, 0) = C_i(Z) \quad (7)$$

Input Condition:

$$C_1(0, T) = C_0(T) \quad (8)$$

The output condition given by:

$$\frac{\partial C_1}{\partial Z}(\infty, T) = 0 \quad (9)$$

3.3. Results and discussions

3.3.1. Physical attributes of soil

The sand, silt and clay fractions were 85.9, 4.7 and 9.4%, respectively, classifying the YUd as Loamy Sand (Table 1). The sand fraction is predominant, with 859.1 g kg⁻¹, and the coarse sand is higher than the fine sand content, which indicates the resistance of the source material to the physical and chemical weathering agents, despite the climatic conditions in the region favoring this phenomenon. The clay content of only 9.4% and the high sand content demonstrate the rudimentary development of the soil, which may be related to the mineralogical composition of the source material, where quartz is probably predominant, being a more resistant mineral. The low levels of silt (4.7%) and the silt/clay ratio (0.5%) are due to the high degree of weathering of the originating material (ARAUJO et al., 2015).

YUd had a high dry bulk density (1.67 g cm⁻³), as it is a sandy soil. According to Salviano et al. (2017), sandy-textured soils have a low moisture and nutrient retention capacity and are therefore considered very fragile environments. The total porosity is 36.76%, being considered low for agricultural purposes (less than 50%).

Table 1. Physical attributes of the dystrophic Yellow Ultisol under sugarcane crop.

Layer	Particle size composition					Textural Class	S/C	FS/TS	ρ_d	Dp	ϕ
	Sand			Silt	Clay						
	Coarse	Fine	Total								
--cm--	-----g kg ⁻¹ -----						-----%-		---g cm ⁻³ --		-%-
0 - 20	525.2	333.9	859.1	47	93.9	Loamy sand	0.5	0.39	1.67	2.64	36.76

S/C: Silt/Clay ratio; FS/TS: Fine sand/Total sand ratio; ρ_d : dry bulk density; Dp: Particle density; ϕ : Total porosity.

3.3.2. Chemical attributes of soil

The pH value in soil water was 6.7, with a slightly acidic pH. This pH is in the ideal range for sugarcane cultivation, which is at slightly acidic levels around 6.5, and is also close to the ideal pH range for most crops, which is 5.8 to 6.5, for presenting higher nutrient availability (FIGUEIREDO; GOMES; GALDINO, 2013). The almost neutral pH in the 0 to 20 cm layer is due to vinasse fertigation and liming during soil preparation for the next crop. The pH in KCl was 5.7, lower than the pH value in water, leading to a negative ΔpH , which demonstrates the predominance of negative charges in the soil. This is explained by the fact that as soil pH rises, by liming or fertigation, negative charges predominate on these surfaces, which are responsible for attracting cations (MAIA; LIMA, 2014).

Table 2. Chemical attributes of the dystrophic Yellow Ultisol from the northern forest of Pernambuco.

Layer ----cm----	pH			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺
	H ₂ O	KCl	ΔpH					
0-20	6.7	5.7	-1	3.3	0.8	0.07	0.06	0
Layer ----cm----	H+Al	SB	t	T	V	m	P	TOC
	-----cmol _c dm ⁻³ -----				-----%-----		mg dm ⁻³	g kg ⁻¹
0-20	0.6	4.23	4.23	4.83	87.6	0	100	8.2

SB: Sum of bases; t: Effective cation exchange capacity; T: Potential cation exchange capacity; V%: Base saturation; m: Aluminum saturation; P: Phosphorus; TOC: Total Organic Carbon

Among the exchangeable bases, Ca²⁺ presented the highest concentration in YUd with 3.3 cmol_c dm⁻³. This is due to the addition of this nutrient through liming, with the insertion of calcium carbonate (CaCO₃) and calcium oxide (CaO), and also available through chemical fertilization. The Mg²⁺ content was relatively low, as shown in Table 2, however, considered adequate for most annual perennial and forage crops, as it is greater than 0.5 cmol_c dm⁻³ of soil (SALVADOR; CARVALHO; LUCCHESI, 2017). Favarin et al. (2013) state that deficiency should not occur if the soil has a Mg²⁺ content close to 0.8 cmol_c dm⁻³, the same Mg²⁺ value found in YUd.

Potassium (K^+) and Na^+ contents were the lowest in YUd with 0.07 and 0.06 $cmol_c dm^{-3}$ soil, respectively. Sodium (Na^+) was the one with the lowest value, which may be related to the composition of the source material and the high precipitation that assists the washing of cations such as Na^+ and K^+ .

The sum of bases (SB) presented a value of 4.23 $cmol_c dm^{-3}$ in YUd, being considered good for an Ultisol (GONÇALVES; MARTINS, 2016). The effective cation exchange capacity (t) was equal to the sum of bases because there is no exchangeable Al^{3+} in the 0-20 cm soil layer. Thus, aluminum saturation (m) was also zero, with no aluminum toxicity problems for the crops. Potential cation exchange capacity (T) presented a value of 4.83 $cmol_c dm^{-3}$, which, as well as effective CEC, is considered a low value of CEC (MAFRA et al., 2014). Low cation exchange capacity (CEC) is related to low soil clay concentration (less than 10%). Phosphorus (P) value was very high in YUd, with P content of 100 $mg dm^{-3}$ of soil, three times higher than the ideal P level for soil in sugarcane 33 $mg dm^{-3}$ of soil. This value can be explained by the phosphate chemical fertilization and the sandy texture of the 0-20 cm layer, allowing higher phosphorus availability due to the lower clay concentration. The Total Organic Carbon (TOC) concentration of 8.2 $g kg^{-1}$ soil is considered low for good soil fertility (RIBEIRO FILHO, 2015).

3.3.3. Vinasse

Hydrogen potential (pH), electrical conductivity (EC) and K + content are shown in Table 3.

Table 3. Chemical characteristics of vinasse

SOLUTE	pH	EC ($\mu s/cm$)	K^+ ($mg L^{-1}$)
Vinasse	4.93	2220	688

3.3.4. Tracer and K miscible displacement assays

To perform the potassium miscible displacement tests on saturated soil columns, they followed the protocol defined in Table 4.

Table 4. Parameters used in the tracer and potassium miscible displacement assays

CONSTANT PARAMETERS			Column 1	Column 2	Column 3
r_{column}	2.5	cm	-	-	-
L_{column}	20.5	cm	-	-	-
A_{column}	19.635	cm ²	-	-	-
V_{column}	402.517	cm ³	-	-	-
ρ_d	1.416	g cm ⁻³	1.395	1.366	1.374
D_p	2.64	g cm ⁻³	-	-	-
M_{column}	554.757	g	561.343	549.673	553.253
time	7	min	82.67	83.78	82.87
Q	2.52	mL min ⁻¹	2.297	2.319	2.328
θ_s	0.463		0.472	0.483	0.479
PV	186.62	cm ³	189.89	194.31	192.95

r: Radius of the column; L: Column length; A: Area of the column; V: Volume; D: Density; M: Mass per column; t: collection time per test tube measured in minutes; Q: Flow for each column; θ_s : Saturated water content.

Parameter values obtained experimentally from the miscible displacement assays with the tracer are shown in table 5.

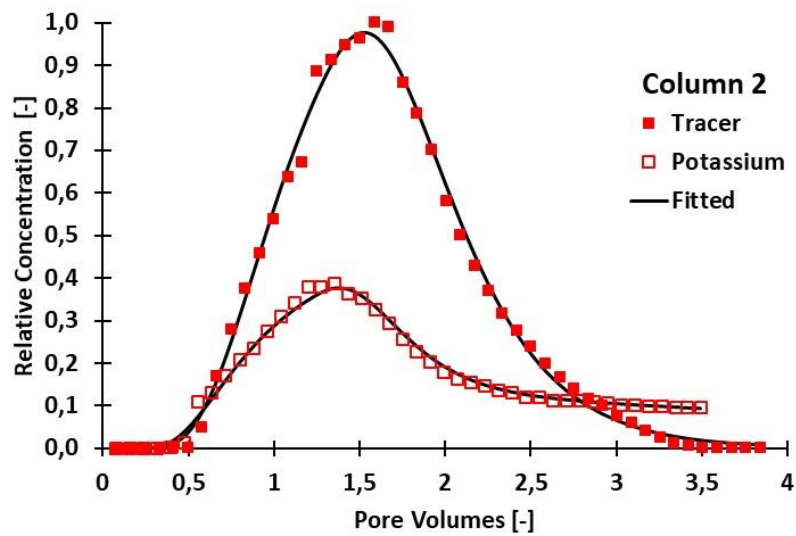
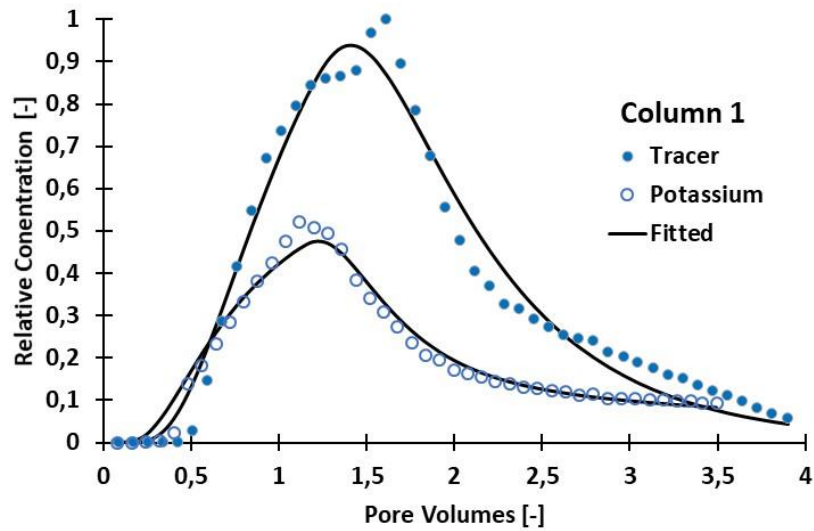
Table 5. Results of hydrodispersive parameters for the Calcium Chloride (CaCl₂, tracer) assay in the three soil columns

Parameters	Column 1	Column 2	Column 3
D (cm² h⁻¹)	55.62	25.17	26.32
R [-]	1.28	1.17	1.31
Pe [-]	5.48	11.96	11.56
λ (cm)	3.74	1.71	1.77
K_d (L kg⁻¹)	---	0.06	0.11

D: hydrodynamic dispersion coefficient; R: Retardation factor; Pe: Peclet number; K_d: Partition coefficient.

In the CaCl₂ tracer assays, it was observed that breakthrough curves are nearly symmetrical (Figure 1) and with retardation factor values (R) slightly higher to 1, indicating that Cl⁻ did not react with the soil matrix (Table 5) and, therefore, under

absence of transport-related physical nonequilibrium. Partition coefficients (K_d) for Cl^- presented values close to zero for columns 2 and 3 and null for column 1, indicating little interaction with the soil. This is exactly what is expected of an assay with the tracer.



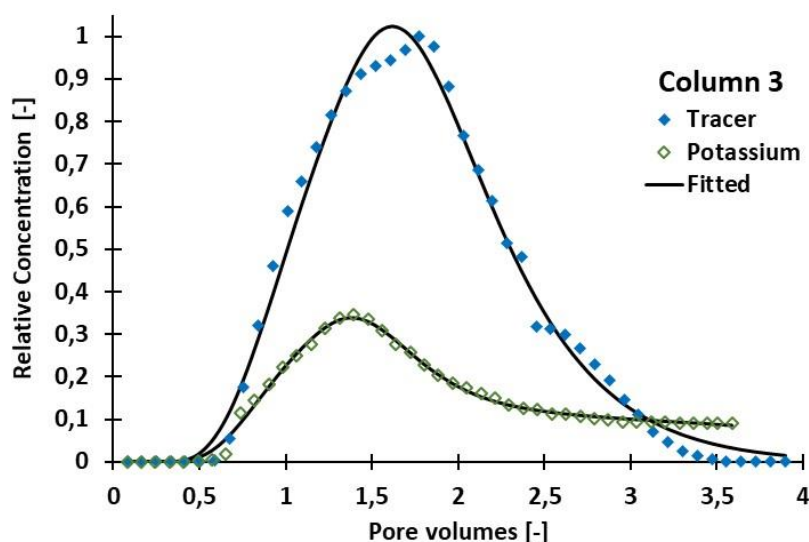


Figure 1. Breakthrough curves (experimental and fitted) of CaCl_2 (as tracer) and Potassium (by vinasse) for dystrophic Yellow Ultisol (YUd).

The breakthrough curves for potassium transport (Figure 1) were delayed, as well as asymmetry with prolongation from the posterior to the peak. This type of behavior can be explained by a series of processes that are grouped into two general classes related to transport (physical nonequilibrium) and sorption (chemical nonequilibrium) (BARIZON et al., 2006). As the absence of physical nonequilibrium was found in the CaCl_2 assays, the potassium transport parameters were only due to the chemical nonequilibrium behavior due to sorption.

The results of the potassium hydrodispersive parameters estimated with the CD - two sorption sites model from the vinasse assays are presented in Table 6.

Table 6. Results of the potassium hydrodispersive parameters estimated from the CD - two sorption sites model for dystrophic Yellow Ultisol (YUd).

PARAMETERS	COLUMN 1	COLUMN 2	COLUMN 3
D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)	64.2	27.0	17.3
R [-]	2.71	3.75	3.38
β [-]	0.370	0.267	0.326
ω [-]	0.0399	0.0582	0.05881
Pe [-]	4.44	10.58	16.92
K_d (L kg^{-1})	0.58	0.97	0.83
f [-]	2.26×10^{-5}	6.03×10^{-6}	4.19×10^{-2}
α (h^{-1})	0.016	0.014	0.018
λ (cm)	4.62	1.94	1.21

D: Dispersion coefficient; R: Retardation factor; β : Dimensionless variable for partitioning nonequilibrium transport models; ω : Dimensionless mass transfer coefficient; Pe: Péclet number; K_d : Partition coefficient; f : Fraction of exchange sites assumed to be at equilibrium for the two-site model; α : First-order kinetic rate coefficient; λ : Dispersivity.

The values of dispersion coefficient (D) and dispersivity (λ) were higher for column 1, indicating that it is a column more ready to solute dispersion in the soil matrix. The values found for Pe were like those of the tracer assays. In column 1, Pe presented a value of 4.44 being the lowest among the other columns, which means that in column 1 the dispersive process ($Pe < 10$) prevailed in the potassium ion transport behavior (K^+). For columns 2 and 3, the convective behavior prevailed with Pe values of 10.58 and 16.92, respectively.

The retardation factor (R) values for the potassium assays were higher than the tracer assays, increasing by 112, 220 and 158%, respectively, for columns 1, 2 and 3, showing that there was an interaction between the porous soil matrix and the ions potassium (K^+) from vinasse. In addition to R, the asymmetric curve shapes for both show chemical nonequilibrium due to two sorption sites, one at instantaneous equilibrium and the other following a desorption kinetics. The chemical interaction processes between potassium and the soil in column 1 were inferior to the other columns, probably due to a higher compaction during column assembly, favoring the formation of preferential pathways, and the percolation velocity that could influence the retention process (SILVA et al., 2012).

The values obtained for the b parameter were low, indicating that the chemical nonequilibrium due to the interaction of potassium with the soil matrix occurred (Table 6). From the Damkholer number the first order kinetic rate coefficient was calculated. The highest resistance to mass transfer and slow chemical kinetics of reaction of potassium with the soil matrix was observed for column 2. For columns 1 and 3, the mass transfer resistance and slow chemical kinetics of the reaction of potassium with the soil matrix were slightly lower than in column 2.

According to Freitas (2018), qualities such as organic matter present in vinasse promotes improvement in soils, enabling nutrients such as K, especially in the 0 - 20 cm layer, where the soil has a higher adsorption. However, the physicochemical

properties of the soil are altered in the presence of vinasse, especially the soil structure (Soto, 2017). These alterations can act as a flocculant in the particles, compromising the particle size distribution, soil permeability, density, plasticity, among others, which can produce imbalance in soil properties causing interference in water dynamics (runoff, evapotranspiration, and infiltration), in addition to some contamination problems in soils, surface and groundwater.

Therefore, while applying vinasse to sandy soil may contribute to increased soil fertility and reduced use of chemical fertilizers, soil characteristics should be respected when applying vinasse.

3.4. Conclusions

The transport and adsorption process by applying vinasse to the columns identified that the sandy soil has the capacity to retain potassium in a percentage proportional to the application time, which in times of rain could not happen, since potassium will be easily transported to deeper layers which may or may not have the same interaction.

The CD - 2 sorption site model represented well the experimental data of potassium breakthrough curves for both columns, indicating the existence of chemical nonequilibrium, represented by first-order sorption kinetics.

The evaluation model allowed to determine the sorption capacity and mobility of potassium ion in the soil, which showed that the vinasse dosage for a 0-20 cm layer should be performed in a controlled manner, to avoid its leaching and consequent groundwater contamination.

3.5. References

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13805: 1997: Água - Determinação de potássio: Método da espectrofotometria por emissão em chama. Rio de Janeiro, 1997.

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

BARIZON, R. R. M.; LAVORENTI, A.; REGITANO, J. B.; PRATA, F.; TORNISIELO, V.L. Simulação do transporte e da sorção de imazaquim em colunas de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.615-623, 2006.

BARROS, R.P.; VIÉGAS, P.R.A.; SILVA, T.L.; SOUZA, R.M.; BARBOSA, L.; VIÉGAS, R.A.; BARRETTO, M.C.V.; MELO, A.S. Alterações em atributos químicos do solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de Vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v.40, n.3, p. 341-346, 2010.

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*, v.9, p.52-56, 2005.

BRITO, F.L.; ROLIM, M.M.; PEDROSA, E.M.R. Concentração de cátions presentes no lixiviado de solos tratados com vinhaça. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.27, n.3, p.773- 781, 2007.

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*, Pernambuco, v.04, n.04, p.456-462, 2009.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, Norma P4.231; Vinhaça – Critérios e Procedimentos; São Paulo, 2015.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2ª ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2011.

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura; Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias; Brasília, 2017.

FREITAS, J.M.A.S., NETTO, A.M., CORRÊA, M.M., XAVIER, B.T.L., ASSIS, F.X. Potassium adsorption in soil cultivated with sugarcane. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(1), 541-555. 2018. <https://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720160910>.

GONÇALVES, A.F.L.; MARTINS, I.L. Níveis de atributos químicos de solo do parque General Iberê de Mattos. *Caderno PAIC*, v. 1, n. 17, p. 145-156, 2016.

GARIGLIO, H.A.A.; MATOS, A.T.; MONACO, P.A.V. Alterações físicas e químicas em três solos que receberam doses crescentes de vinhaça. *Irriga, Botucatu*, v. 19, n. 1, p. 14-24, janeiro-março, 2014.

LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Edusp, 2005. 335 p.

MEDEIROS, S.C.L.; RIBEIRO, S.R.; CONEGLIAN, C.M.R.; BARROS, R.M.; BRITO, N.N.; SOBRINHO, G.D.; TONSO, S.; PELEGRINI, R. Impactos da Agroindústria canieira sob o meio ambiente. III Fórum de Estudos Contábeis. Faculdades Integradas Claretianas. Rio Claro-São Paulo, 2003.

MORENO M.R.P; TEIXEIRA S.C. Impactos Ambientais do Processamento da Vinhaça com Aproveitamento Energético. 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural; São Paulo, novembro de 2015.

RIBEIRO FILHO, A.A. Impactos do sistema agrícola itinerante sobre os solos de remanescente de Mata Atlântica com uso e ocupação por comunidades quilombolas no Vale do Ribeira (São Paulo, Brasil). Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2015.

RIBEIRO, P.H.P.; NETO, J.A.L.; TEIXEIRA, M.B.; GUERRA, U.O.C.; SILVA, N.F.; CUNHA, F.N. Distribuição de potássio aplicado via vinhaça em Latossolo Vermelho Amarelo e Nitossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v.8, nº. 5, p.403-410, 2014.

SILVA, A.J.N.; CABEDA, M.S.V.; CARVALHO, F.G.; LIMA, J.F.W.F. Alterações físicas e químicas de um argissolo amarelo sob diferentes sistemas de uso e

manejo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 10, n.01, p. 76-83, 2006.

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, 2007.

SILVA, N.F.; LELIS NETO, J.A.; TEIXEIRA, M.B.; CUNHA, F.N.; MIRANDA, J.H.; COELHO, R.D. Distribuição de solutos em colunas de solo com vinhaça. Irriga, Edição especial, p.340-350, 2012.

SILVA, W.P.; CERES, ALMEIDA, C.D.G.C.; ROLIM, M.M.; SILVA, E.F.F.; PEDROSA, E.M.R.; SILVA, V.G.F. Monitoramento da salinidade de águas subterrâneas em várzea cultivada com cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. V. 18(4), 394-401, 2014.

VALÉRIO, N.P.; SEVILHA, K.A.A; MATANA, T.B.; VITTI; A.C. Caracterização da vinhaça in natura e concentrada para viabilização da mistura de fontes nitrogenadas. Revista Ciência & Inovação - FAM - V.2, N.1; dez 2015.

VIEIRA, D.B. Fertirrigação sistemática da cana-de-açúcar com vinhaça. Álcool e Açúcar, São Paulo, mai/jun., 1986.

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

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A existência de vinhaça residual no solo deve ser levada em conta ao aplicá-la novamente via fertirrigação, e determinar seu teor de dosagem com a finalidade de não causar variações na salinização e alterações aos microrganismos do solo e a contaminação de águas subterrâneas.

Uma dosagem inadequada de vinhaça ao solo aumenta a incorporação dos íons do potássio o que afeta as características dos solos e a cultura principalmente, já que estes ficam sobrecarregados do soluto, desequilibrando as condições nutricionais e impactando também as fontes hídricas através da lixiviação. Porém, deve-se levar em consideração um estudo que avalie a dosagem adequada em diferentes intervalos de tempo, em que se verifique por camadas a retenção dos nutrientes, especialmente o potássio.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13805: 1997: Água - Determinação de potássio: Método da espectrofotometria por emissão em chama. Rio de Janeiro, 1997.

ABRÃO, Laurence Penhabel. Vinhaça: Bio-Fertirrigação e Impacto Ambiental, 2010.

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

ASSIS, F. X. Transporte e sorção do Imazapic em solos cultivados com cana-de-açúcar; Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE; Recife, 2016.

BAFFA, C. F; FREITAS, D; CAMPONEZ, R. P. O uso da vinhaça na cultura da cana-de-açúcar. Nucleus. Especial. 2008.

BRITO, F; ROLIM, M. M; PEDROSA, E. M. R.; Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco, 2009.

BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. R. Concentração de cátions presentes no lixiviado de solos tratados com vinhaça. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.27, n.3, p.773- 781, 2007.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; NORMA TÉCNICA P4. 231, 3ª Edição, Fevereiro de 2015, 15 páginas, 2ª versão Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola.

CORAZZA, R. Impactos ambientais da vinhaça: controvérsias científicas na fertirrigação, 2006.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Mitigação das Emissões de Gases Efeito Estufa pelo uso de Etanol da cana-de-açúcar Produzido no Brasil, Circular Técnica 27, Seropédica RJ, 2009.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Agência Embrapa de Informação Tecnológica: árvore do conhecimento, cana-de-açúcar, 2016. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/Abertura.html>>. Acesso: jun. 2019.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A; SANTOS, F. C.; Fertilidade do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Capítulo IX - Potássio, 2007.

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura; Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias; Brasília, 2017.

FREITAS, J. M. A. S. Interação do potássio em solo da zona canavieira via vinhaça – UFRPE, 2015.

GONÇALVES, A. D. M. A., MIRANDA, J. H., ROSSI, P., SABADIN, J. F. G., KAMOGAWA, M. Y. Temperature effect in potassium and nitrate ions in soil transport. Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.28, n.3, p.438-447. 2008.

HILLEL, D. Fundamentals of soil physics. Orlando, Academic press, 1980. 413p.

IBAMA- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente dos Recursos Naturais Renováveis. Boletins, 2009-2014: Vendas de ingredientes ativos por UF. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/areas-tematicas-qa/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos/pagina-3>>. Acesso: ago. 2016.

MEDEIROS, S. C. L.; RIBEIRO, S. R.; CONEGLIAN, C. M. R.; BARROS, R. M.; BRITO, N. N.; SOBRINHO, G. D.; TONSO, S. PELEGRINI, R. Impactos da Agroindústria canavieira sob o meio ambiente. III Fórum de Estudos Contábeis. Faculdades Integradas Claretianas. Rio Claro-São Paulo, 2003.

MEDEIROS, S; COSTA, F. S; MONTESQUIEU, H. A; Formas de potássio em solos representativos do Estado da Paraíba. Revista Ciência Agronômica, 2014.

MORENO M. R. P; TEIXEIRA S. C. Impactos Ambientais do Processamento da Vinhaça com Aproveitamento Energético. 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural; São Paulo, novembro de 2015.

NETO, A. E. Estado da Arte da Vinhaça, 2016.

OLIVEIRA, A; LINHARES, A. J.; VITAL, R. Simulação do comportamento do potássio no solo aplicando a dinâmica de sistemas, 2013.

PARKER, J. C. VAN GENUCHTEN, M. T. Determining transport parameters from laboratory and field tracer experiments. Virginia Agricultural Experiment Station. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University. Bulletin 87-31, 1984. 89p.

PAVINATO, P. S; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade De Nutrientes No Solo - Decomposição E Liberação De Compostos Orgânicos De Resíduos Vegetais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, n. 32, p.911-920; 2008.

POLÍTICA NACIONAL - DECRETO Nº 76.593, de 14 de novembro de 1975 - Programa Nacional do Alcool

POLÍTICA NACIONAL - DECRETO-LEI Nº 1.413, de 14 de agosto de 1975 Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente provocada por atividades industriais.

POLÍTICA NACIONAL - PORTARIA/GM Nº 323 - de 29 de novembro de 1978

SANTOS, M. M. Extração De Potássio Da Amazonita Para Produção De Fertilizantes, SENAI CETIQT, 2019.

SILVA, A. P. M; BONO, J. A. M; PEREIRA, F. A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental - vol.18, 2014.

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, 2007.

SILVA, N. F.; LELIS NETO, J. A.; TEIXEIRA, M. B.; CUNHA, F. N.; MIRANDA, J. H.; COELHO, R. D. Distribuição de solutos em colunas de solo com vinhaça. Irriga, Edição especial, p.340-350, 2012.

SILVA, R. Apresentação de Macronutriente - Potássio, Universidade Federal Do Acre - Química E Fertilidade Do Solo, 2005. Disponível em: <http://www.ufac.br/site/ufac/prograd/educacao-tutorial/grupos-pet/pet-agronomia-1/apoio-didatico/quimica-e-ferlidade-do-solo/unidade-6-3-potassio>. Acesso: ago. 2018.

SILVEIRA R. L. V. A. Efeito do Potássio no Crescimento, nas Concentrações dos Nutrientes e nas Características da Madeira Juvenil de Progenies de Eucalyptus Grandis w. Hill ex Maiden Cultivadas em Solução Nutritiva; Piracicaba -SP, 2000.

SOTO, M. A.; BASSO, J. B.; KLANG, C. H. Impacto da fertirrigação da cana-de-açúcar por vinhaça nas propriedades físicas, químicas e hidráulicas do solo. In: FONTANETTI, C.S.; BUENO, O.C. (Org.). Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica. 1ed. Bauru, SP: Canal 6, v. 1, p. 103-124, 2017.

VALÉRIO, N. P.; SEVILHA, K. A. A; MATANA, T. B.; VITTI; A. C. Caracterização da vinhaça in natura e concentrada para viabilização da mistura de fontes nitrogenadas. Revista Ciência & Inovação - FAM - v.2, n.1, 2015.

VAN GENUTCHEN, M. TH.; WIERENGA, P.J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. In methods of soil analysis. I. Physical and Mineralogical methods. 2ª Ed., Agronomy monography, Soil Science Society of America, Madison, Wi, p.1025-1054, 1986.

VIEIRA, D. B. Fertirrigação sistemática da cana-de-açúcar com vinhaça. Álcool e Açúcar, São Paulo, mai/jun., 1986.