

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

MONALISA SOARES COSTA

**APLICAÇÃO DE DOSES ELEVADAS DE VINHAÇA EM UM ARGISSOLO
CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR**

RECIFE – PE

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

MONALISA SOARES COSTA

**APLICAÇÃO DE DOSES ELEVADAS DE VINHAÇA EM UM ARGISSOLO
CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Mário Monteiro
Rolim

RECIFE – PE

2020

Dados internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

C837a Costa, Monalisa Soares
Aplicação de doses elevadas de vinhaça em um argissolo cultivado com
cana-de-açúcar / Monalisa Soares Costa. 2020.
98 f. : il.

Orientador: Mario Monteiro Rolim.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, 2020.

Inclui referências.

1. Saccharum officinarum . 2. Resíduo. 3. Fertirrigação. 4. Salinidade. I.
Rolim, Mario Monteiro, orient. II. Título

CDD 630

**APLICAÇÃO DE DOSES ELEVADAS DE VINHAÇA EM UM ARGISSOLO
CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR**

MONALISA SOARES COSTA

Tese defendida e aprovada em 19 de fevereiro de 2020.

Prof. Dr. Mário Monteiro Rolim (UFRPE)
Orientador

Profa. Dra. Elvira Maria Regis Pedrosa (UFRPE)
Examinadora

Prof. Dr. José Amilton Santos Júnior (UFRPE)
Examinador

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto (EECAC – UFRPE)
Examinador

Prof. Dr. Nildo da Silva Dias (UFERSA)
Examinador

“The most valuable thing you can make is a mistake – you can’t learn anything from
being perfect”

(Adam Osborne)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela obtenção de mais um título em minha formação acadêmica, pela sua presença em minha vida e pelo conforto nas horas mais difíceis.

Aos meus pais Messias Augusto e Izabel Soares, à minha irmã Marina Clara e minha avó Maria Antônia pelo suporte e apoio familiar ao longo da minha jornada. À Valdir Ribeiro por todo amor, compreensão, suporte, apoio e convivência desde que começou a fazer parte da minha vida. Á Conan que com seu olhar inocente, seu focinho comprido e seu rabinho abanando me trouxe calma e me ajudou a suportar os momentos difíceis.

Ao meu orientador Mário Rolim pela oportunidade, confiança, orientação, paciência e pelos ensinamentos ao longo do curso, que foram fundamentais para meu amadurecimento profissional. À Djalma Euzébio por me ensinar e transmitir um pouco do seu vasto conhecimento. Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da UFRPE pela atenção, paciência em ensinar e atender os alunos, e por disponibilizar laboratórios, ferramentas e equipamentos de trabalho.

Ao professor Amilton por ceder espaço no ambiente protegido para realização de experimento. Á professora Elvira pela ajuda nos procedimentos estatísticos. Á Usina Petribu pelo fornecimento de vinhaça. Á Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina (EECAC) pelo fornecimento do solo para realização do estudo.

Aos colegas do Programa que fiz durante a realização do curso de doutorado. Ás inusitadas amizades que fiz dentro e fora dos portões da universidade.

Á banca examinadora pelas atribuições e aceite ao convite. Á Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade. Á Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

Resumo	1
Abstract	2
Introdução Geral	3
Capítulo 1: Revisão Bibliográfica.....	6
Capítulo 2: Teor e acúmulo de nutrientes em cana-de-açúcar sob doses elevadas de vinhaça	24
Capítulo 3: Aplicação de elevadas doses de vinhaça nos atributos químicos de um argissolo	43
Capítulo 4: Biometria da cana-de-açúcar adubada com doses elevadas de vinhaça	57
Capítulo 5: Salinização e disposição de minerais em argissolo cultivado com cana-de-açúcar e fertirrigado com vinhaça.....	74

APLICAÇÃO DE DOSES ELEVADAS DE VINHAÇA EM UM ARGISSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

A vinhaça, subproduto da indústria sucroalcooleira, tem elevada importância no aproveitamento dos nutrientes minerais e de matéria orgânica no cultivo da cana-de-açúcar, entretanto, a falta de um manejo adequado da sua dose pode refletir em problemas para o solo e o desempenho da cultura. Objetivou-se avaliar o efeito de elevadas doses de vinhaça no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar e nas alterações dos atributos químicos e salinização do solo. O experimento foi realizado em ambiente protegido, com cultivo da cana-de-açúcar em vasos preenchidos com Argissolo durante 210 dias. Os tratamentos variaram em: adubação mineral (AM), 0 (D0), 150 (D150), 300 (D300), 600 (D600) e 1200 (D1200) m³ ha⁻¹ de vinhaça; sendo a adubação mineral recebendo formulação NPK 14-24-18; e D0 recebeu somente água de abastecimento. O delineamento estatístico adotado foi o inteiramente casualizado, com 6 tratamentos e um total de 30 repetições. O efeito da vinhaça foi avaliado em relação às doses aplicadas e ao tempo de cultivo da cana-de-açúcar. Foram avaliados parâmetros biométricos, de nutrição de planta e atributos solo, salinização e distribuição dos nutrientes em duas camadas. A aplicação de D600 e D1200 incrementou no índice de área foliar, na biomassa fresca e seca do colmo, da raiz e do ponteiro mais as folhas da cana-de-açúcar. Foi possível observar que o teor de potássio (K) encontrado nos tecidos da parte aérea da cana-de-açúcar estava acima do recomendado para o estágio de desenvolvimento avaliado, ao mesmo tempo em que o cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na) estavam a baixos; podendo com isso inferir que a planta apresentou preferência por absorver íons K em relação aos íons Ca, Mg e Na. No solo, foi possível observar aumento no teor de matéria orgânica, pH, Ca, K e Na, principalmente nas doses D600 e D1200. O K e Na apresentaram variação no seu teor em relação aos períodos de tempo em que foram avaliados, observando que os cátions apresentaram maior disponibilidade na solução do solo em torno dos 120 dias de plantio. A aplicação de vinhaça contribuiu no aumento da condutividade elétrica do extrato saturado e na porcentagem de sódio trocável. A aplicação de doses de 600 e 1200 m³ ha⁻¹ de vinhaça altera o crescimento da cana-de-açúcar e na fertilidade do solo.

Palavras-chave: *Saccharum*, aproveitamento de resíduo, fertirrigação, salinidade

APPLICATION OF HIGH STILLAGE DOSES IN A ULTISOL CULTIVATED WITH SUGARCANE

ABSTRACT

The stillage is a sub product of sugar and alcohol industry, has high importance to plant mineral nutrition mostly because of organic matter and minerals that are present, however, the lack of appropriate management of the dose can reflect problems to soil sugarcane development. The goal of this study is evaluate the effect of high stillage doses on sugarcane initial development, change in chemical attributes and soil salinization. The experiment occurred in a greenhouse, the sugarcane was cultivated in vase filled with Ultisol during 210 days of cultivation. The treatments were: mineral nutrition (MN), 0 (D0), 150 (D150), 300 (D300), 600 (D600) and 1200 (D1200) m³ ha⁻¹ of stillage. The mineral nutrition treatment received the formula NPK 14-24-18 and D0 received only water. The plots were organized randomly in the greenhouse containing 6 treatments and 30 repetitions. The stillage's effect was studied relating the dosages and the time of cultivating. Were analyzed biometric parameters, plant nutrition, chemical soil attributes and salinization. It was noted that the highest doses, D600 e D1200, were responsible for the increase in leaf area index, fresh biomass and dry biomass of the stem, the root and the top plus leaves. In the mineral nutrition of sugarcane, the potassium (K) contents was higher than recommended to the growing stage analyzed, the calcium (Ca), magnesium (Mg) and sodium (Na) were lower, thus inferring that the plant presented preference for absorbing K instead Ca, Mg and Na. On the soil, was observed increase the amount of organic matter, pH, Ca, K and Na, mostly at the doses D600 and D1200. The K and Na change their concentration on soil according to the time measured, the cations has presented more availability on soil solution around 120 days. The stillage application increased the electrical conductivity and percentage of exchangeable sodium. The application of 600 e 1200 m³ ha⁻¹ stillage doses modify the sugarcane growing and soil fertility.

Keywords: *Saccharum officinarum*, waste, fertigation, salinity

INTRODUÇÃO GERAL

INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar é cultivada em larga escala no Brasil devido às condições edafoclimáticas favoráveis e sua importância econômica, alimentar e industrial. Dentre os principais produtos fabricados através da cana estão o açúcar e o etanol. O etanol assumiu significativa importância nos últimos anos devido à procura por biocombustíveis com menor degradação e poluição ambiental.

O aumento da área cultivada com cana-de-açúcar para produção de etanol foi estimulado a partir de 1975, quando foi lançado o programa Proálcool (Programa Nacional do Álcool). Com o incentivo governamental, o setor foi aquecido e assim a produção de etanol aumentou, porém, a produção de resíduos também, dentre eles a vinhaça o principal resíduo/subproduto da indústria que chega a 13 vezes a quantidade de etanol produzido.

A vinhaça, quando não destinada adequadamente, pode contaminar os cursos hídricos e o solo devido ao elevado teor de matéria orgânica. Quando descartado em corpos hídricos pode causar eutrofização.

Com a finalidade de estudar um descarte adequado da vinhaça, vários trabalhos foram desenvolvidos com a sua aplicação no cultivo da cana-de-açúcar, com isso, a cultura poderia absorver a matéria orgânica e minerais presentes no resíduo e ainda assim apresentar segurança ambiental.

Os estudos iniciais com vinhaça em 1950 foram fundamentais para conhecer como o resíduo alterava as propriedades físico-químicas do solo e o crescimento da cana-de-açúcar até encontrar uma dose que fosse considerada adequada e economicamente viável para aplicação. Com isso, alguns benefícios como economia na utilização de fertilizante mineral foram reportados, principalmente na nutrição do potássio, nutriente altamente requerido pela cana-de-açúcar, além do alto teor da matéria orgânica incorporado ao solo. Sob esse aspecto a vinhaça pode deixar de ser classificada como resíduo e passar a ser considerada como subproduto para a agricultura.

Apesar dos estudos identificando doses de vinhaça ideais para a cana-de-açúcar que substituíssem a necessidade de adubação mineral potássica, pouco foi explorado sobre doses elevadas, ou seja, com quantidade muito acima do usualmente aceito e o que ocasionam no solo e na planta, remetendo a casos de área de sacrifício, quando aplicado uma super dosagem, falta de manejo adequado, ou até mesmo para fins de conhecimento sobre o efeito sobre os extremos e suas consequências.

A vinhaça possui duas principais características, uma delas é a carga de nutrientes minerais elevada, que é capaz de substituir parcialmente a adubação mineral, e a outra é o desequilíbrio na proporção de potássio, sódio, cálcio e magnésio. Uma super dosagem do resíduo pode ocasionar efeitos adversos no solo ao ponto de alterar o desempenho da cana-de-açúcar e os atributos físico-químicos do solo.

De acordo com as propriedades químicas da vinhaça, doses além do necessário podem ocasionar distúrbios no crescimento da cana-de-açúcar devido ao elevado teor de potássio, sódio e a baixa concentração de nitrogênio e fósforo, além de poder ocasionar a salinização do solo nas camadas superficiais e alterar outras propriedades químicas, interferindo na sua fertilidade.

Deste modo, objetivou-se avaliar o efeito de doses elevadas de vinhaça sobre o crescimento, composição mineral dos tecidos da cana-de-açúcar, especificamente nos parâmetros biométricos, teor na folha +1 e extração de nutrientes através da planta; e aumento da salinidade e alteração nas demais propriedades químicas do solo ao longo do período inicial de crescimento da cultura.

CAPÍTULO 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. Importância econômica e características da cana-de-açúcar

A introdução da cultura da cana-de-açúcar no Brasil se deu em 1502, por Martin Afonso de Souza, através de mudas oriundas da Ilha da Madeira, em Portugal (Cesnik, 2007). O cultivo das mudas em território brasileiro permitiu a sua consequente adaptação ao solo e clima predominantes, resultando em produtividades suficientemente lucrativas, resultando no aumento da área cultivada ao longo dos anos.

O cultivo da cana-de-açúcar em grande escala no Brasil teve início na região nordeste, mas atualmente, se concentra na região centro-sul, pois as condições edafoclimáticas são mais favoráveis, por isso é onde a cultura tem possuído maior rendimento ultimamente (Cesconetto et al., 2018).

Atualmente, na região nordeste, o cultivo da cana-de-açúcar se concentra na zona da mata, que compreende a área mais próxima do litoral, devido as melhores condições pluviométricas (Vidal, 2018).

Apesar de ter produtividade menor do que na região sudeste, o cultivo de cana-de-açúcar na região nordeste vem apresentando expansão gradativa desde a safra dos anos 2005/2006: a previsão para o Estado de Pernambuco, por exemplo, na safra 2019/2020 é de uma área cultivada de aproximadamente 256 mil hectares, podendo ir além caso o clima no período de safra seja favorável (CONAB, 2019).

Atualmente a cana-de-açúcar se mantém como uma cultura importante para o setor de biocombustíveis, aumentando anualmente a área cultivada e a produtividade obtida (CONAB, 2019).

A cana-de-açúcar é composta de 13% de sacarose e 2% de hexoses e outras impurezas, sendo a sacarose o principal interesse comercial da planta, pois dela se origina o açúcar (Singels, 2012) e sobre a qual ocorre fermentação para produção do etanol, em que se origina o resíduo vinhaça, objeto de estudo deste trabalho.

2. Vinhaça como subproduto da indústria do açúcar e do álcool

A vinhaça é o resíduo oriundo do processo de destilação da cana-de-açúcar para fabricação do etanol, sendo a cada litro do combustível se produz de 12 a 14 L de vinhaça, dependendo do teor alcóolico obtido após o processo de fermentação (Dias et al., 2015).

No início da fabricação do etanol no Brasil, gerava-se pouco volume de vinhaça e esta não era reutilizada em plantios, pois não se conhecia seus efeitos acerca do desenvolvimento das plantas, sendo descartada no ambiente (Ribeiro e Sengik, 1983).

Entretanto, com o lançamento do Proálcool (Programa Nacional do Álcool) em 1975, a quantidade de etanol produzida passou a aumentar e, conseqüentemente, o volume de vinhaça, que ainda era descartado no meio ambiente (Andrade et al., 2009). Como uma das características da vinhaça é a elevada carga orgânica, ao ser lançada em curso hídrico, pode haver eutrofização, prejudicando o ambiente e a vida de animais.

Os estudos inicialmente realizados por Almeida et al. (1950) e Ranzini (1955) permitiram desmistificar alguns fatos, como o de que a vinhaça acidificava o solo e com isso interferia no desenvolvimento da cana-de-açúcar, resultando em uma gradativa aceitação da aplicação do resíduo nos plantios, reduzindo os problemas gerados pelo seu descarte no ambiente.

Desde 1978 a vinhaça passou a ser usada nos campos como forma de reaproveitamento do resíduo, inicialmente utilizando-o em áreas de sacrifício ou canais, vindo posteriormente e gradativamente, a diminuir as doses aplicadas e aumentar as áreas fertirrigadas, melhorando a eficiência e aproveitamento por parte das plantas e reduzindo as possibilidades de contaminação dos cursos hídricos (Macedo, 2007).

Com isso, a vinhaça passou a ser mais utilizada nas áreas de cultivo com intuito de que o solo e a planta fossem nutridos principalmente com potássio, cálcio e nitrogênio, e que poderiam vir a substituir parte da adubação mineral, além de trazer outros benefícios ao solo e à planta. A partir daí outros pesquisadores se encorajaram a realizar mais estudos com a vinhaça (Camargo et al., 1988 e Ferreira e Monteiro, 1987).

Atualmente a aplicação da vinhaça na área de cultivo é uma prática amplamente adotada, o que permite reduzir as chances de trazer problemas ao meio ambiente, contribuir para que haja economia na necessidade de fertilizantes, aumento de produtividade e outros benefícios possíveis de serem alcançados (Macedo, 2007).

Apesar dos benefícios ao solo e à planta, a vinhaça pode prejudicar seriamente a fauna e flora se descartado no ambiente, pois, dentre os efluentes usualmente conhecidos, a vinhaça é um dos que possui maior carga poluidora (Soto et al., 2017; Silva et al., 2007). Além disso, para um determinado solo, uma dose de vinhaça relativamente elevada pode alterar o rendimento da cana-de-açúcar, ocasionar lixiviação de potássio, cálcio, sulfato e cloro no perfil, podendo contaminar o lençol freático, ou ainda, salinizar o solo (Centurion et al., 1989; Macedo, 2007).

A vinhaça é constituída por 93% de água e 7% de sólidos totais, em que, dessa fração sólida, 75% corresponde à matéria orgânica e os outros 25% são compostos dos minerais: potássio, cálcio, magnésio, nitrogênio, fósforo, sulfato e outros (Pazuch et al., 2017). A Tabela 1 mostra alguns exemplos de constituição de vinhaça de acordo com cada localidade e se a vinhaça é *in natura* ou concentrada. A vinhaça concentrada pode ser distinguida da *in natura* devido aos valores mais elevados da concentração dos elementos.

Tabela 1. Composição e caracterização da vinhaça por diversos autores.

Parâmetros	Bebé et al. (2009)	Alves et al. (2015)	Brito et al. (2009)	Christofolletti et al. (2013)	Garcia et al. (2017)	Silva et al. (2014)	Nogueira et al. (2015)	Ortegón et al. (2016)
pH	4,47	4,9	4,4	3,9	4,6	3,98	3,64	3,98
CE*	13	20,2	11,50		8,294	9,32		14,35
K**	5.006,3	8.300	1.123	2.056	3.276	18.894	1.247	4.698
Na**	19,73		113		13,57	759		90,7
Ca**	613	1270	352	719	828			879
Mg**	776,5	480	16	237	321,25			2,81
DBO***			5.000	5.046	13.394		13.033	
DQO***	35.000		26.771	13.380	31.723,2		20.970	

* mS cm⁻¹; ** mg dm⁻³; *** Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) em mg L⁻¹; Demanda Química de Oxigênio (DQO), em mg L⁻¹

Devido à elevada quantidade de água presente, a vinhaça pode ser considerada uma fonte hídrica, entretanto a aplicação recorrente ao longo do ciclo de uma cultura pode ser limitada ao estágio de crescimento devido potencial que esse resíduo tem de queimar as folhas das plantas ao entrar em contato. Com isso, um momento propício para aplicação da vinhaça seria antes da germinação da cultura.

A vinhaça normalmente possui coloração verde castanho, turbidez e concentração de sólidos solúveis elevada, e composição que varia de acordo com a qualidade do caldo da cana-de-açúcar extraído para o processo de fermentação, aparelhos e produtos utilizados no processo destilatório (Casarini, 1989).

3. Composição mineral da vinhaça e nutrição da cana-de-açúcar

A composição mineral da vinhaça pode variar de acordo com diversos fatores. De acordo com Longo (1994), a espécie e cultivar da cana-de-açúcar, aditivos e equipamentos utilizados ao longo do processo produtivo do etanol, o método e o modo de conduzir a fermentação, o tipo de levedura utilizada, assim como também as condições climáticas são fatores a serem considerados na composição final da vinhaça.

A vinhaça pode ser obtida a partir do mosto de melaço, mosto misto e mosto de caldo. No mosto de melaço possui concentração de nutrientes superior à obtida a partir do mosto misto, que por sua vez é superior em nutrientes à vinhaça obtida em mosto de caldo (Abreu Junior et al., 2005).

Da fração de sólidos solutos presente na vinhaça, 75% corresponde à matéria orgânica e 25% à fração mineral (Pazuch et al., 2017). Na fração mineral, há diversos nutrientes, alguns que se pode destacar como: nitrogênio (N), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na). A proporção com que eles se encontram no resíduo pode ser suficiente ou não para suprir a necessidade nutricional de um ciclo da cana-de-açúcar, de acordo com a dose.

A cultura da cana-de-açúcar demanda em torno de 180 kg ha⁻¹ de nitrogênio para uma produtividade estimada acima de 120 t ha⁻¹, de acordo com Oliveira et al. (2007). Para as condições do Estado de Pernambuco, se recomenda até 80 kg ha⁻¹ de N, sem considerar a quantidade remanescente no solo (Cavalcanti, 2008). Entretanto, em casos de adubação nitrogenada excessiva, o rendimento da cana-de-açúcar é diminuído devido ao excesso da oferta de N ocasionar demasiado desenvolvimento vegetativo e consequente redução do teor de sacarose no colmo (Malavolta, 1994).

Quando a cana-de-açúcar é adubada com vinhaça, dificilmente há problemas por excesso de nitrogênio para a cultura, pois a constituição do resíduo não traz elevadas cargas do nutriente, o mineral predominante normalmente é potássio (Tabela 1).

Para a cana-de-açúcar, o potássio é o elemento mais absorvido em relação aos demais (Malavolta, 1994). A absorção de potássio segue uma proporção média de que para cada tonelada de cana colhida por hectare, há uma remoção de 1,5 kg de potássio do solo (Oliveira et al., 2007). Em solos com concentração elevada de K, a exportação pelos colmos pode chegar a 285 kg ha⁻¹ de K₂O (Franco et al., 2008). Oliveira et al. (2011) relataram que a variedade de cana-de-açúcar SP813250 extraem até 404 kg ha⁻¹ de potássio e 240 kg ha⁻¹ de nitrogênio.

Entretanto, a cana-de-açúcar consegue consumir mais potássio do que a sua necessidade metabólica, desde que haja abundância no nutriente no solo. As raízes absorvem o K⁺ de maneira passiva, ou seja, sem gasto energético, e armazenam no vacúolo das células e no espaço livre aparente (Malavolta, 2006). Além disso, o excesso de potássio no solo pode ocasionar antagonismo na absorção de outros nutrientes, como cálcio e magnésio (Epstein e Bloom, 2006).

Otto et al. (2010) mostraram que aplicando doses de até 150 kg ha⁻¹ de K₂O, há um acúmulo crescente de K no colmo da cana-de-açúcar, entretanto, a aplicação de 200 kg ha⁻¹ de K₂O implicou a redução do acúmulo do nutriente.

A vinhaça é considerada uma fonte de potássio para nutrição da cana-de-açúcar, pois é o mineral presente em quantidade predominante, por isso é o elemento utilizado como base para o cálculo da dose do subproduto a ser aplicada.

Resende et al. (2006) avaliaram o efeito da aplicação de 80 m³ ha⁻¹ de vinhaça ao longo do tempo e concluíram que o resíduo favoreceu a produção de açúcar em 13%. Silva et al. (2014) observaram a aplicação de doses de até 800 m³ ha⁻¹ contribuiu no rendimento dos colmos, com um potencial de aumento de produtividade em torno de 10,5 t ha⁻¹. Paulino et al. (2002) observaram uma diminuição na produtividade da cana-de-açúcar quando aplicou 450 e 600 m³ ha⁻¹. Os autores encontraram uma dose satisfatória para o desempenho da cultura de 300 m³ ha⁻¹.

Entretanto, ao utilizar vinhaça, alguns fatores podem interferir na disponibilidade de potássio na solução do solo, como a mobilidade do nutriente, que permite que haja lixiviação de K para outras regiões mais profundas do solo, a sua fixação às partículas do solo, interação com os íons que competem por absorção, que nesse caso são Mg²⁺, Ca²⁺ e Na⁺, e o pH do solo (Zörb et al., 2014).

O cálcio está presente na vinhaça em concentrações elevadas, porém, menor do que o potássio, como mostra a Tabela 1. E o magnésio está presente na vinhaça em concentração menor do que o cálcio. A desproporção das porções de cálcio, magnésio e potássio contribui para que haja antagonismo entre si, interferindo na absorção pelas raízes da cana-de-açúcar, que pode apresentar baixos teores de cálcio e/ou magnésio no tecido devido as elevadas concentrações de potássio, como observado por Rhodes et al. (2018) e Vitti et al. (2005). Entretanto, frente ao antagonismo com K, os autores afirmam que o cálcio tende a ser mais dominante do que o magnésio, implicando que a planta consegue absorver mais cálcio do que magnésio. Orlando Filho et al. (1996) indicam que para elevada produtividade da cana a relação $Ca/K < 6$ e $K/(Ca+Mg)^{1/2} > 0,9$.

Bebé et al. (2009) também mostraram que a aplicação de vinhaça ao longo dos anos contribuiu com o aumento do nível de cálcio e magnésio no solo aplicando uma dose de 300 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Bonini et al. (2014) observaram que a vinhaça não alterou a concentração de cálcio no solo como ocorreu com o potássio. Entretanto, Paulino et al. (2011) mostra que a aplicação de vinhaça por até 20 anos alterou mais na concentração

de cálcio no solo do que de potássio e magnésio. Os autores mostraram que até 2 anos de aplicação houve um aumento linear na concentração de cálcio, tendendo a diminuir após. Gariglio et al. (2014) também mostraram que o uso de vinhaça em doses de até 320 m³ ha⁻¹ contribuem para o aumento de cálcio e magnésio trocáveis no solo.

Com a composição da vinhaça e a proporção de cada nutriente presente, o uso de doses elevadas pode ocasionar desequilíbrio nutricional no solo, como ocorre com o cálcio e magnésio (Malavolta, 2006), disponibilizar alto teor de sódio para a cana-de-açúcar, que também pode competir com a absorção de K, Ca e Mg (Casagrande, 1991).

A cana-de-açúcar é classificada como uma cultura semi-tolerante ao sódio, podendo substituir o potássio em algumas funções não específicas ao K na planta (Malavolta, 2006). Entretanto, o elevado teor de sódio contribui no aumento da porcentagem de sódio trocável (PST) no solo. A cana-de-açúcar consegue se desenvolver em um solo com PST variando de 15 até 40 (Ayers e Westcot, 1985), acima disso, os efeitos do sódio sobre as propriedades físicas do solo impedem um crescimento satisfatório da cana-de-açúcar.

Assim como o potássio, a absorção do sódio pelas plantas se dá através de canais catiônicos não seletivos, utilizando as vias de absorção do potássio, por isso que quanto maior a concentração de Na⁺ na solução do solo, mais a planta o absorve, podendo atingir um processo de intoxicação (Britto e Kronzucker, 2015; Pilon-Smits et al., 2009).

O sódio em excesso no solo pode, dentre outros, proporcionar condições desfavoráveis ao desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar e restringir a taxa de mineralização do nitrogênio orgânico (Dias e Blanco, 2010). Entretanto, a cana-de-açúcar é uma glicófita com moderada sensibilidade ao estresse salino (Melo et al., 2014), ou seja, até determinadas condições, a cultura consegue se desenvolver em ambiente com elevada concentração de sais. Uma estratégia que confere resistência da cana-de-açúcar aos níveis de sódio no solo é manter altos níveis de potássio e cálcio nos tecidos e baixos níveis de sódio, ou ainda, manter alta a relação K/Na (Dias et al., 2016).

Bonini et al. (2014) observaram que a vinhaça contribuiu com um aumento significativo de sódio no solo, o que é um fator a ser levado em consideração sobre a falta de controle da aplicação de vinhaça no solo, pode vir a desencadear um processo de salinização por excesso de minerais.

De acordo com Pedrotti et al. (2015), dos processos que contribuem para o desenvolvimento da salinidade, o acúmulo excessivo de minerais no solo é uma delas, incluindo, além do sódio, cátions de cálcio, magnésio e potássio, isto é, os que estão presentes na fração mineral da vinhaça.

Não somente o sódio, mas o aumento da concentração de nutrientes de uma forma geral no solo contribui para o aumento da salinidade, com isso, efeitos adversos passam a surgir nas propriedades físico-químicas do solo, refletindo no desenvolvimento das culturas, como por exemplo, nas trocas gasosas (Plaut et al., 2000), redução da alongação e expansão das folhas (Kumar et al., 1994), na redução do crescimento e produtividade e na alongação dos internódios e o acúmulo de sacarose nos colmos da cana-de-açúcar (Akhtar et al., 2001).

Gandonou et al. (2012) observaram que nas cultivares avaliadas, o estresse salino ocasionou nos primeiros meses de desenvolvimento da cana-de-açúcar clorose e necrose nas folhas, comprometendo a sobrevivência das plantas, entretanto, as raízes da planta se mostraram mais resistentes do que a parte aérea. Pagariya et al. (2012) afirmam que a salinidade é um dos problemas mais sérios na agricultura, sendo responsável por redução de cerca de 50% na produtividade da cana-de-açúcar.

A tolerância da cana-de-açúcar à salinidade permite que a cultura se desenvolva em uma CE, de um solo argiloso de até $1,4 \text{ dS m}^{-1}$, quando o solo é arenoso a cultura suporta uma CE de até $4,3 \text{ dS m}^{-1}$ (Dehayr et al., 1997). Porém, com a CE acima dos limites tolerado pela cana, Toledo et al. (2017) observaram que a salinidade contribuiu com a redução da evapotranspiração da cana-de-açúcar na proporção de $48,5 \text{ g planta}^{-1} \text{ CE}^{-1}$.

Silva et al. (2014), estudaram os riscos da vinhaça causar salinização em um solo de várzea, afirmando que doses de até $65 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ não afeta esse tipo de solo e nem altera a qualidade da água do lençol freático, de acordo com as características do resíduo utilizado (Tabela 1).

De acordo com Bebé et al. (2009), a aplicação de vinhaça no solo contribuiu com o incremento de potássio, principalmente na camada até 20 cm de profundidade. Corroborando, Brito et al. (2009) não somente observou aumento do potássio no solo como também o acréscimo no pH, além de alteração nas concentrações de cálcio, magnésio e sódio. Glória e Orlando Filho (1983) também observaram que a vinhaça foi capaz de alterar o pH do solo, a disponibilidade de íons e a CTC (Capacidade de Troca Catiônica).

Yin et al. (2018) verificaram que o uso da vinhaça contribuiu com o aumento do pH do solo ao longo dos anos em que o resíduo foi aplicado no campo, a matéria orgânica, o nitrogênio total e o potássio também aumentaram sua disponibilidade no solo para as plantas, permitindo que os autores concluíssem que o resíduo é uma alternativa aos adubos químicos usualmente utilizados. Entretanto, ao mesmo tempo, notaram que a vinhaça foi responsável pela redução da diversidade microbiana do solo ao longo dos anos, o que pode ser decorrente da redução do pH, o que torna um ambiente desfavorável para o desenvolvimento de microrganismos, assim como o acréscimo da concentração de sais no solo.

Su et al. (2012) observaram que a aplicação de vinhaça aumentou o conteúdo de matéria orgânica na camada superficial do solo, em contrapartida, também houve acréscimo das concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio.

Com a aplicação da vinhaça, a retenção dos nutrientes nas camadas superficiais do solo é importante para evitar o problema da lixiviação dos minerais para o lençol freático ou para cursos d'água superficiais mais próximos, entretanto, a retenção desses nutrientes pode permitir que a concentração ocasione um ambiente com estresse salino para as raízes das plantas.

Observou-se, de modo geral, que doses iguais ou abaixo de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça não trazem problemas no desenvolvimento da cana-de-açúcar e nem prejuízos à fertilidade do solo, entretanto, outros aspectos como a granulometria do solo e a distância de corpos hídricos da área em que ao resíduo está sendo utilizado também são importantes na decisão da dose a ser aplicada.

3.1 Relação da vinhaça com a respiração basal microbiana

Microrganismos como as bactérias, fungos, algas e protozoários, que possuam metabolismo aeróbio ou anaeróbio, decompõem a matéria orgânica e mineralizam o húmus no solo, liberando determinada quantidade de CO_2 como resultado da atividade (Dionísio et al., 2016). A soma dessas funções metabólicas que ocorrem no solo em que se gera CO_2 é denominada de respiração basal microbiana, e é utilizada como parâmetro para avaliar a atividade dos microrganismos no solo (Silva et al., 2007).

Com a aplicação da vinhaça no solo, devido as suas características físico-químicas peculiares, os microrganismos, antes de entrar em plena atividade, passam por um período de adaptação, e por causa disso a produção líquida de CO_2 é negativa nos

primeiros dias, mas, passada essa fase inicial, o carbono orgânico é mineralizado de forma completa e hábil (Reis e Rodella, 2002).

A adição de vinhaça no solo eleva o aporte salino, que, dependendo da concentração, tende a diminuir a atividade e a biomassa microbiana, alterando a estrutura da comunidade devido à adaptação ao novo tipo de ambiente; existem grupos de microrganismos que para sobreviver são tolerantes à salinidade, e outros que respondem rápido às mudanças na condutividade elétrica do solo utilizando de fontes de carbono facilmente disponíveis (Yan e Marschner, 2013).

Wong et al. (2009) acreditam que os microrganismos produzem mais C/CO₂ por unidade de biomassa microbiana por unidade de tempo quando o estresse no meio aumenta. Yang et al. (2018) também mostraram que o aumento no carbono orgânico solúvel permite um aumento linear na respiração microbiana. Porém, Rath e Rousk (2015) mostram que a respiração diminui com o aumento da condutividade elétrica.

Alguns trabalhos, como Reis e Rodella (2002), mostram que, dentre outros compostos orgânicos, a vinhaça foi responsável pela maior taxa de emissão de CO₂. Camargo et al. (2009) mostram que após aplicação de vinhaça, durante 34 dias, a emissão de CO₂ teve crescimento exponencial.

4. Fatores legais sobre a aplicação de vinhaça

Com a evolução da indústria e do aumento da demanda por alimentos, a geração de resíduos passou a ser algo inerente à evolução e à produção de suprimentos que atendam às necessidades do homem da atualidade. Com isso, para que esses resíduos que são gerados não afetem o ambiente, houve a necessidade de serem estabelecidos regulamentos e leis que controlem a produção e o seu aproveitamento.

Fernandes Filho e Araújo (2016) afirmam que inexistente lei que trate especificamente da destinação da vinhaça, o que se tem são normativas do uso do resíduo da indústria sucroalcooleira.

Algumas leis e regulamentos resguardam a aplicação de resíduos no campo, como o código das águas do Decreto 24.643 de 1934; o código florestal da Lei 4.771 de 1965; a lei de crimes ambientais da Lei 9.605 de 1998; a Portaria do Ministério do Interior n. 323 de 1978 em que proíbe a partir de 1980 o lançamento da vinhaça em cursos hídricos; a Portaria do Ministério do Interior n. 158 de 1980; a resolução do CNRH n. 15 de 2001; a Portaria do Ministério da Saúde n. 518 de 2004; a Lei 9.605 de 1998; Lei

7.960 de 1989; o Decreto-Lei n. 1.413 de 1975; a Portaria do Ministério do Interior n. 124 de 1980; e, a resolução do CONAMA n. 357 de 2005 (Silva et al., 2007).

A Resolução n. 430 de 2011 complementa e altera a Resolução n. 357 de 2005, com diretrizes sobre o lançamento de efluentes em corpos receptores, estabelecendo que o pH que deve estar entre 5 e 9, a temperatura deve ser inferior a 40°C ou que não exceda 3°C no limite da zona de mistura, e o efluente deve estar com uma remoção mínima de 60% da DBO (Demanda Biológica de Oxigênio).

No Estado de Pernambuco a CPRH (Agência estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos) estabelece um Plano de Controle Ambiental nas Unidades Sucroalcooleiras através da Instrução Normativa N° 006/2006 em que exige um Relatório Ambiental de Avaliação de Safra – TR CPRH/004/2006 – na disposição e aproveitamento da vinhaça.

5. Considerações Finais

Um grande volume de vinhaça é gerado na fabricação de etanol no Brasil, e o maior problema está no descarte. Atualmente, a forma mais adequada de dispor a vinhaça é no cultivo de cana-de-açúcar, podendo, através disso, ser tratada como um subproduto, tendo como consequência uma redução da utilização de adubos minerais, principalmente o potássio.

Entretanto, a administração de doses de vinhaça deve ser rigorosamente controlada para evitar prejuízos à fertilidade do solo e ao desenvolvimento da cana-de-açúcar devido a elevada concentração de minerais, principalmente o potássio.

Com o uso da vinhaça na agricultura, o manejo e acompanhamento da fertilidade do solo são necessários, pois com o desequilíbrio da proporção de minerais presentes, pode haver problemas na elevação da concentração de um determinado mineral no solo, podendo interferir na absorção de outros elementos pelas raízes da cana-de-açúcar, além de afetar o desenvolvimento da população microbiana do solo, reduzindo o desempenho da cultura ao longo do ciclo.

6. Referências Bibliográficas

Abreu Junior, C. H.; Boaretto, A. E.; Muraoka, T.; Kiehl, J. C. (2005). Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal. *Tópicos de Ciência do Solo*, 4, 391-470.

- Akhtar, S.; Wahid, A.; Akram, M.; Rasul, E. (2001). Effect of NaCl salinity on yield parameters of some sugarcane genotypes. *International Journal of Agriculture and Biology*, 3, 507-509.
- Almeida, J. R.; Ranzani, G.; Valsecchi, O. La vinasse dans l'agriculture. (1950). Contribuição da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" ao Congresso Internacional de Industrias Agrícolas realizado em Bruxelas. *Boletim da ESALQ*, 12, 27-36.
- Alves, P. R. L.; Natal-da-Luz, T.; Sousa, J. P.; Cardoso, E. J. B. N. (2015). Ecotoxicological characterization of sugarcane vinasses when applied to tropical soils. *Science of the Total Environment*, 526, 222-232.
- Andrade, E. T.; Carvalho, S. R. G.; Souza, L. F. (2009). Programa do Proetanol e o etanol no Brasil. *Engevista*, 11, 127-136.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. (1985). *Water quality agriculture*. Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 174p.
- Bebé, F. V.; Rolim, M. M.; Pedrosa, E. M. R.; Silva, G. B.; Oliveira, V. S. (2009). Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13, 781-787.
- Bonini, M. A.; Sato, L. M.; Bastos, R. G.; Souza, C. F. (2014). Alterações nos atributos químico e físicos de um Latossolo Vermelho irrigado com água residuária e vinhaça. *Revista Biociências*, 20, 78-85.
- Brito, F. L.; Rolim, M. M.; Pedrosa, E. M. R. (2009). Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 4, 456-462.
- Britto, D. T.; Kronzucker, H. J. (2015). Sodium efflux in plant roots: what do we really know? *Journal of Plant Physiology*, 186-187, 1-12.
- Camargo, J. A.; Pereira, N.; Cabello, P. R.; Teran, F. J. C. (2009). Viabilidade da aplicação do método respirométrico de Bartha para análise da atividade microbiana de solos sob aplicação de vinhaça. *Engenharia Ambiental*, 6, 264-271.
- Camargo, O. A.; Valadares, J. M. A. S.; Berton, R. S.; Teófilo Sobrinho, J. (1988). Características físicas do solo que recebeu vinhaça. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas. (Boletim Científico, 14)
- Casagrande, A. A. (1991). *Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar*. Jaboticabal: FUNEP.

- Casarini, D. C. P. Efeito da fertirrigação com vinhaça nas propriedades químicas e microbiológicas do solo em um sistema de disposição de efluente industrial. 1989. 180p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
- Cavalcanti, J. F. A. (Coord.). (2008). Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação. Recife: IPA.
- Centurion, R. E. B.; Moraes, V. A. M.; Ruiz, R. T. Destilação final da vinhaça produzida por destilarias autônomas e anexas, enquadradas no programa nacional do álcool. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 11, 1989, Fortaleza: ABES, 1989.
- Cesnik, R. Melhoria da cana-de-açúcar: marco sucro-alcooleiro no Brasil. Embrapa Meio Ambiente. 2007. Disponível em: http://www.cnpma.embrapa.br/down_hp/344.pdf. Acesso em 25 de maio de 2018
- Cesconetto, L. B.; Pruski, F. F.; Rodriguez, R. G.; Marcatti, G. E. (2018). Potentiality of sugarcane expansion under irrigation conditions considering natural and potential water availability. *Agricultural Water Management*, 203, 162-171.
- Christofoletti, C. A.; Escher, J. P.; Correia, J. E.; Marinho, J. F. U.; Fontanetti, C. S. (2013). Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. *Waste Management*, 33, 2752-2761.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar, v. 6, safra 2019/2020, 2019. Brasília: CONAB, 2019. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acessado em: 06 de maio de 2019.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n. 430 de 13 de maio de 2011.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução n. 357 de 17 de março de 2005.
- Dehayr, R.; Diatloff, N.; Gordon, I. (1997). Irrigation water quality. Salinity & soil structure stability. Resource Sciences Centre, 5p.
- Dias, M. O. S.; Maciel Filho, R.; Mantelatto, P. E.; Cavalett, O.; Rossell, C. E. V.; Bonomi, A.; Leal, M. R. L. V. (2015). Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. *Environmental Development*, 15, 35-51.
- Dias, N. S.; Blanco, F. F. (2010). Efeito dos sais no solo e na planta. In: Gheyi, H. R.; Dias, N. S.; Lacerda, C. F. (ed). Manejo de salinidade na agricultura: estudos básicos

- e aplicados. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade. 129-140.
- Dias, N. S.; Blanco, F. F.; Souza, E. R.; Ferreira, J. F. S.; Sousa Neto, O. N.; Queiroz, I. S. R. (2016). Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade. In: Gheyi, H. R.; Dias, N. S.; Lacerda, C. F. (ed). Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade. 151-162.
- Dionísio, J. A.; Pimentel, I. C.; Signor, D. (2016). Respiração microbiana. In: Dionísio, J. A.; Pimentel, I. C.; Signor, D.; Paula, A. M.; Maceda, A.; Matanna, A. L. Guia prático de biologia do solo. Curitiba: SBCS: NEPAR. 72-77.
- Epstein, E.; Bloom, A. J. (2006) Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas. 2 ed. Londrina: Editora Planta.
- Fernandes Filho, F. E.; Araújo, G. J. F. (2016). Normativos federais e estaduais reguladores da destinação da vinhaça no Brasil: uma proposta de nova abordagem. Revista de Administração, Contabilidade e Economia da FUNDACE, 7, 146-160.
- Ferreira, E. S.; Monteiro, A. O. (1987). Efeitos da aplicação da vinhaça nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Piracicaba, COPERSUCAR. (Boletim Técnico, 37)
- Franco, H. C. J.; Cantarella, H.; Trivelin, P. C. O.; Vitti, A. C.; Otto, R.; Faroni, C. E.; Sartori, R. H.; Trivelin, M. O. (2008). Acúmulo de nutrientes pela cana-planta. STAB Açúcar, Álcool Subproduto, 26, 41-51.
- Gandonou, C. B.; Gnancadja, L. S.; Abrini, J.; Skali-Senhaji, N. (2012). Salinity tolerance of some sugarcane (*Saccharum* sp.) cultivars in hydroponic medium. International Sugar Journal, 114, 190-196.
- Garcia, C. F. H.; Souza, R. B.; Souza, C. P.; Christofolletti, C. A.; Fontanetti, C. S. (2017). Toxicity of two effluents from agricultural activity: comparing the genotoxicity of sugar cane and orange vinasse. Ecotoxicology and Environmental Safety, 142, 216-221.
- Gariglio, H. A. A.; Matos, A. T.; Monaco, P. A. V. (2014). Alterações físicas e químicas em três solos que receberam doses crescentes de vinhaça. Irriga, 19, 14-24.
- Glória, N. A.; Orlando Filho, J. (1983). Aplicação de vinhaça como fertilizante. São Paulo: Coopercucar. 38p.

- Kumar, S.; Naidu, K.M.; Sehtia, H. J. (1994). Causes of growth reduction in elongating and expanding leaf tissue of sugarcane under saline conditions. *Australian Journal Plant Physiology*, 21, 79-83.
- Longo, R. M. Efeito da vinhaça in natura e biodigerida em propriedades de um solo cultivado com cana-de-açúcar. 1994. Dissertação – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas – SP. 98p.
- Macedo, I. C (Org.). (2007). A energia da cana-de-açúcar. Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade. São Paulo: Berlendis & Vertecchia: Unica – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo.
- Malavolta, E. (1994). Importância da adubação na qualidade dos produtos: função dos nutrientes na planta. In: Sá, M. E.; Buzzeti, S. Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas. São Paulo: Ícone. p. 19-44.
- Malavolta, E. (2006). Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres. 638p.
- Melo, G. M.; Barbosa, M. R.; Dias, A. L. F.; Willadino, L.; Camara, T. R. (2014). Pré-condicionamento in vitro de plantas de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) para tolerância ao estresse salino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, (suplemento), S27-S33.
- Nogueira, C. E. C.; Souza, S. N. M.; Micuanski, V. C.; Azevedo, R. L. (2015). Exploring Possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná state, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 300-305.
- Nogueira, F. S.; Ferreira, K. S.; Carneiro Junior, J. B.; Passoni, L. C. (2009). Minerais em melados e em caldos de cana. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 29, 727-731.
- Oliveira, E. C. A.; Freire, F. J.; Oliveira, R. I.; Oliveira, A. C.; Freire, M. B. G. S. (2011). Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. *Revista Ciência Agronômica*, 42, 579-588.
- Oliveira, M. W.; Freire, F. M.; Macêdo, G. A. R.; Ferreira, J. J. (2007). Nutrição mineral e adubação da cana-de-açúcar. *Informe Agropecuário*, 28, 30-43.
- Ortegón, G. P.; Arboleda, F. M.; Candela, L.; Tamoh, K.; Valdes-Abellan, J. (2016). Vinasse application to sugar cane fields. Effect of the unsaturated zone and groundwater at Valle del Cauca (Colombia). *Science of the Total Environment*, 539, 410-419.

- Orlando Filho, J.; Bittencourt, V. C.; Carmello, Q. A. C.; Beauclair, E. G. F. (1996). Relações K, Ca e Mg de solo areia quartzosa e produtividade da cana-de-açúcar. STAB, Açúcar Álcool e Subprodutos, 14, 13-17.
- Otto, R.; Vitti, G. C.; Luz, P. H. C. (2010). Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 34, 1137-1145.
- Pagariya, M. C.; Devarumath, R. M.; Kwar, P. G. (2012). Biochemical characterization and identification of differentially expressed candidate genes in salt stressed sugarcane. Plant Science, 184, 1-13.
- Paulino, A. F.; Medina, C. C.; Robaina, C. R. P.; Laurani, R. A. (2002). Produções agrícola e industrial de cana-de-açúcar submetida a doses de vinhaça. Semina: Ciências Agrárias, 23, 145-150.
- Paulino, J.; Zolin, C. A.; Bertonha, A.; Freitas, P. S. L.; Folegatti, M. V. (2011). Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. II. Características da cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 15, 244-249.
- Pazuch, F. A.; Nogueira, C. E. C.; Souza, S. N. M.; Micuanski, V. C.; Friedrich, L.; Lenz, A. M. (2017). Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of Paraná, Brazil. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76, 34-42.
- Pedrotti, A.; Chagas, R. M.; Ramos, V. C.; Prata, A. P. N.; Lucas, A. A. T.; Santos, P. B. (2015). Causas e consequências do processo de salinização dos solos. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, 19, 1308-1324.
- Pilon-Smits, E. A. H.; Quinn, C. F.; Tapken, W.; Malagoli, M.; Schiavon, M. (2009). Physiological functions of beneficial elements. Current Opinion in Plant Biology, 12, 267-274.
- Plaut, Z.; Meinzer, F. C.; Federman, E. (2000). Leaf development, transpiration and ion uptake and distribution in sugarcane cultivars grown under salinity. Plant Soil, 218, 59-69.
- Ranzini, G. (1955). Consequências da aplicação do restilo ao solo (I). Anais da Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz", v. XII - XIII, p. 57-68.
- Rath, K. M.; Rousk, J. (2015). Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: A review. Soil Biology & Biochemistry, 81, 108-123.

- Reis, T. C.; Rodella, A. A. (2002). Cinética de degradação da matéria orgânica e variação do pH do solo sob diferentes temperaturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 26, 619-626.
- Resende, A. S.; Santos, A.; Xavier, R. P.; Coelho, C. H.; Gondim, A.; Oliveira, O. C.; Alves, B. J. R.; Boddey, R. M.; Urquiaga, S. (2006). Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30, 937-941.
- Rhodes, R.; Miles, N.; Hughes, J. C. (2018). Interactions between potassium, calcium and magnesium in sugarcane grown on two contrasting soil in South Africa. *Field Crops Research*, 223, 1-11.
- Ribeiro, A. C.; Sengik, E. (1983). Efeitos da aplicação de vinhaça nas propriedades físicas e químicas de duas amostras de Latossolos. *Revista Ceres*, 30, 25-31.
- Silva, A. P. M.; Bono, J. A. M.; Pereira, F. A. R. (2014). Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: efeito no solo e na produtividade de colmos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 38-43.
- Silva, M. A. S.; Griebeler, N. P.; Borges, L. C. (2007). Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e do lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11, 108-114.
- Singels, A. (2012). Sugarcane. In: Steduto, P.; Hsiao, T. C.; Fereres, E.; Raes, D. FAO Irrigation and Drainage Paper N. 66. *Crop Yields Response to Water*. p. 174-180.
- Soto, M. A.; Basso, J. B.; Kiang, C. H. (2017). Impacto da fertirrigação da cana-de-açúcar por vinhaça nas propriedades físicas, químicas e hidráulicas do solo. In: Fontanetti, C. S.; Bueno, O. C. *Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica*. Bauru, SP: Canal 6. p. 103-124.
- Su, T.; Li, Y.; Wei, G.; Jiang, Z.; Liao, Q.; Zhu, S. (2012). Macronutrients absorption and surface runoff losses under different fertilizer treatments in sugarcane field. *Sugar Tech*, 14, 255.
- Toledo, J. V.; Zolnier, S.; Silva, T. G. F.; Boehringer, D.; Steidle Neto, A. J. (2017). Alterations on the evapotranspiration of sugarcane cultivars under distinct salinity levels applied in the fertigation. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, 37, 940-952.
- Wong, V. N. L.; Dalal, R. C.; Greene, R.S. B. (2009). Carbon dynamics of sodic and saline soils following gypsum and organic material additions: A laboratory incubation. *Applied Soil Ecology*, 41, 29-40.

- Vidal, M. F. (2018). Setor sucroenergético nordestino. Caderno Setorial Etene, 25.
- Vitti, G. C.; Queiroz, F. E. C.; Otto, R.; Quintino, T. A. (2005). Nutrição e adubação da cana-de-açúcar. Bebedouro, SP, p. 15-18.
- Yan, N.; Marschner, P. (2013). Response of soil respiration and microbial biomass to changing EC in saline soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 65, 322-328.
- Yang, J.; Zhan, C.; Li, Y.; Zhou, D.; Yu, Y.; Yu, J. (2018). Effect of salinity on soil respiration in relation to dissolved organic carbon and microbial characteristics of a wetland in the Liaohe River estuary, Northeast China. *Science of the Total Environment*, 642, 946-953.
- Yin, J.; Deng, C.; Wang, X.; Chen, G.; Mihuez, V. G.; Xu, G.; Deng, Q. (2018). Effects of long-term application of vinasse on physicochemical properties, heavy metals content and microbial diversity in sugarcane field soil. *Sugar Tech*, 21, 62.
- Zörb, C.; Senbayram, M.; Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture – status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171, 656-669.

**CAPÍTULO 2: TEOR E ACÚMULO DE NUTRIENTES EM CANA-DE-
AÇÚCAR SOB DOSES ELEVADAS DE VINHAÇA**

TEOR E ACÚMULO DE NUTRIENTES DA CANA-DE-AÇÚCAR SOB DOSES ELEVADAS DE VINHAÇA

RESUMO: A vinhaça, resíduo da produção do etanol, vem sendo amplamente utilizada como meio de fertirrigação da cana-de-açúcar, entretanto, não se conhece os limites da aplicação em altas doses e seus efeitos na absorção e acúmulo de nutrientes minerais pela cultura. Objetivou-se avaliar o efeito de elevadas doses de vinhaça sobre o teor de macronutrientes e o sódio e seu acúmulo na parte aérea da cana-de-açúcar durante seu desenvolvimento inicial. O experimento foi conduzido em vasos de 100 L preenchidos com um Argissolo. As plantas foram adubadas com as doses de 0, 150, 300, 600 e 1200 m³ ha⁻¹ de vinhaça e, mais uma dose de adubação mineral equivalente a 500 kg ha⁻¹ da formulação NPK 14-24-18. Os teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e sódio foram avaliados na folha diagnóstica da cultura (folha +1) aos 120 dias após o plantio e seu acúmulo na parte aérea da planta aos 210 dias. Os dados foram submetidos à análise de variância e comparados mediante análise de regressão e contrastes ortogonais. As doses de vinhaça aplicadas aumentaram o teor de potássio e proporcionaram interações antagônicas do nutriente com o cálcio e com o magnésio. O aumento das doses de vinhaça incrementou os acúmulos de nitrogênio, potássio, magnésio e sódio e reduziu o acúmulo de cálcio. O cálcio, nas doses de 600 e de 1200 m³ ha⁻¹, foi menos absorvido em relação ao potássio. O fósforo, apesar da sua baixa concentração na vinhaça, foi o nutriente mais absorvido pela cultura. A adubação com doses de vinhaça acima de 600 m³ ha⁻¹ afeta negativamente o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum*, nutrição mineral, aproveitamento de resíduo

CONTENT AND ACCUMULATION OF NUTRIENTS IN SUGARCANE'S UNDER HIGH DOSES OF STILLAGE

ABSTRACT: The stillage, waste of ethanol production, is commonly used as sugarcane's fertigation method, although, it is not known the limits of that use and they respective effects on mineral absorption and accumulation on the crop. This work aimed evaluate the effect of high stillage doses on macronutrient content and sodium and their respective accumulation on sugarcane aerial part during its initial growing. The study was realized in 100 L vase filled with Ultisoil. The sugarcane was fertilized with the

stillage doses 0, 150, 300, 600 and 1200 m³ ha⁻¹ and one dose of mineral nutrition NPK 14-24-18 equivalent to 500 kg ha⁻¹. The nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium and sodium content were analyzed at sugarcane diagnose leaf (leaf +1) at 120 days of cultivating and their respective accumulation in aerial part at 210 days of cultivating. Data were subjected to analysis of variance and compared by regression analysis and orthogonal contrasts. The stillage doses increased the potassium content and provided antagonistic interaction with calcium and magnesium. The increase in stillage dose incremented the nitrogen, potassium, magnesium and sodium accumulation and decreased the calcium. The calcium was the nutrient less absorbed than potassium at the doses 600 and 1200 m³ ha⁻¹. Phosphorus, despite its low concentration in stillage, was the nutrient most absorbed by the crop. The sugarcane nutrition with stillage with doses above 600 m³ ha⁻¹ affected negatively the initial development.

Keywords: *Saccharum officinarum*, mineral nutrition, residue use.

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura importante para a economia e o desenvolvimento do Brasil, pois, dentre outros fatores, é matéria-prima para o processamento do etanol, biocombustível que tem sido amplamente utilizado no país e no mundo. Entretanto, a indústria do etanol gera a vinhaça, um resíduo composto por cerca de 93% de água e 7% de sólidos totais. Sabe-se que da fração sólida 75% é matéria orgânica e os outros 25% são minerais, cujo potássio está presente em quantidade predominante (Pazuch et al., 2017).

A vinhaça é comumente utilizada como meio de fornecimento de parte dos nutrientes da demanda nutricional da cana-de-açúcar. O composto apresenta pH de caráter ácido, condutividade elétrica elevada e desproporção na distribuição dos demais minerais (Christofoletti et al., 2013), esse último reflete diretamente na capacidade das plantas se nutrirem adequadamente, pois uma desproporção na distribuição dos nutrientes demandados pela cultura, refletirá em um baixo desempenho no campo, em decorrência do excesso ou deficiência ocasionado pelo desequilíbrio na distribuição.

A cana-de-açúcar demanda potássio predominantemente ao cálcio, nitrogênio, magnésio e fósforo (Oliveira et al., 2010). Neste sentido, uma recomendação de adubação para a cultura com doses de vinhaça de até 300 m³ ha⁻¹ pode atender à demanda nutricional da mesma, principalmente em potássio, promover a produção de

colmos, evitar problemas ambientais com a quantidade de resíduo aplicada e diminuir a aplicação de adubo mineral (Barbosa et al., 2012).

Entretanto, em situações em que não há controle ou manejo adequado da quantidade de vinhaça aplicada, pode haver no solo alterações químicas desfavoráveis ao desenvolvimento da cana-de-açúcar em decorrência das elevadas concentrações de potássio, cálcio e sódio do composto (Christofolletti et al., 2013; Ortegón et al., 2016; Garcia et al., 2017). Esse desequilíbrio nutricional causa saturação do solo com esses minerais e, conseqüentemente, relações antagônicas, principalmente do potássio com o cálcio e com o sódio (Rhodes, Miles, & Hughes, 2018), comprometendo o balanço nutricional da cultura.

Dentre os métodos utilizados para se avaliar os efeitos causados pela aplicação de doses de vinhaça sobre o desenvolvimento da cana-de-açúcar, há o estado nutricional da cultura, através da folha diagnóstico, e a quantidade de nutrientes acumulados na parte aérea, que são informações importantes que podem auxiliar em programas de adubação eficientes (Grangeiro et al., 2011), principalmente quando aliado à análise nutricional das plantas em um dado momento do seu ciclo.

Segundo Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), a análise foliar é bastante utilizada, pois as folhas têm atividades metabólicas elevadas e apresentam, em sua composição de nutrientes, as mudanças que ocorreram naquela planta. Ainda de acordo com os autores, o monitoramento da fertilidade do solo e a diagnose foliar são as principais ferramentas utilizadas para manejo nutricional da cultura.

Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito de elevadas doses de vinhaça sobre o teor de macronutrientes e do sódio na folha diagnóstico e seus respectivos acúmulos na parte aérea da cana-de-açúcar durante sua fase de desenvolvimento inicial.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em vasos com capacidade volumétrica de 100 L e em ambiente protegido, localizado no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife – PE, Brasil (8° 01' 05" S e 34° 56' 48", com altitude de 6,49 m). O solo utilizado para o preenchimento dos vasos foi um Argissolo, de textura franco arenosa, coletado na Estação Experimental de Cana-de-Açúcar do Carpina (EECAC), no município de Carpina, PE, situado em uma região de solos de tabuleiros costeiros. Sua caracterização química realizada antes da implantação do experimento encontra-se apresentada na Tabela 1.

A vinhaça foi coletada na Usina Petribu, localizada na zona rural de Lagoa de Itaenga, Mata Norte de Pernambuco, na tubulação de saída da destilaria para a lagoa de distribuição. Sua caracterização química realizada logo após a sua coleta encontra-se apresentada na Tabela 2.

Tabela 1. Atributos químicos do Argissolo antes da aplicação de vinhaça.

Parâmetros	Resultado	
	0 – 20 cm	20 – 40 cm
pH	5,80	5,60
Fósforo (mg dm^{-3})	8,00	5,00
Potássio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	0,09	0,06
Cálcio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	1,75	1,25
Magnésio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	0,75	0,75
Sódio ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	0,08	0,07
CTC ¹ ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	5,80	5,60
Acidez potencial ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	3,13	3,46
S ² ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)	2,70	2,10
V ³ (%)	46,00	38,00
PST ⁴	1,37	1,25

¹Capacidade de Troca Catiônica; ²Soma de bases trocáveis; ³Saturação por base; ⁴porcentagem de sódio trocável

Tabela 2. Atributos químicos da vinhaça.

Parâmetro	Vinhaça
pH	4,2
Condutividade Elétrica (mS cm^{-1})	15,06
Cálcio (mg L^{-1})	888,3
Magnésio (mg L^{-1})	395,3
Sódio (mg L^{-1})	729,1
Potássio (mg L^{-1})	1053
Nitrogênio total (mg L^{-1})	51,8
Fosfato total (mg L^{-1})	6,78
Carbono (mg L^{-1})	1.032,5
Sólidos totais (mg L^{-1})	22.368
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO _{5,20}) (mg L^{-1})	12.300
Demanda Química de Oxigênio (mg L^{-1})	27.250

Para o preenchimento de cada vaso adicionou-se uma camada de brita n° 0 na base, em seguida inseriu-se uma manta geotêxtil. Cada vaso foi preenchido com 77 L de solo em uma camada de 55 cm de profundidade, com porosidade de 46,15%, de forma a se manter uma densidade aparente próxima de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com seis tratamentos e seis repetições. Os tratamentos foram constituídos por cinco doses de vinhaça: 0 (D0), 150 (D150), 300 (D300), 600 (D600) e 1200 (D1200) $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e uma adubação mineral (AM).

A vinhaça foi aplicada manualmente, sendo as quantidades calculadas proporcionalmente à área superficial dos vasos, vinte dias antes do plantio da cana-de-açúcar. As parcelas fertilizadas com adubação mineral consistiram de uma dose de NPK 14-24-18, correspondente a 500 kg ha⁻¹, utilizando-se como fonte de N o sulfato de amônio, como fonte de P₂O₅ o superfosfato simples e como fonte de K₂O o cloreto de potássio, aplicados com base na análise de solo realizada previamente ao início do experimento e na recomendação de adubação para o Estado de Pernambuco sugerida por Cavalcanti et al. (2008). Toda a adubação mineral foi aplicada em fundação sem a necessidade de adubação de cobertura.

As quantidades de macronutrientes e de sódio presente em cada dose de vinhaça foram estimadas para o equivalente em kg ha⁻¹ e estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Quantidade de nitrogênio (N), fósforo (P₂O₅), potássio (K₂O), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na) estimadas para cada uma das doses de vinhaça aplicadas nas parcelas experimentais..

Dose m ³ ha ⁻¹	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	Na
	-----kg ha ⁻¹ -----					
150	7,77	1,01	189,00	133,24	59,29	109,36
300	15,54	2,03	378,00	266,49	118,59	218,73
600	31,08	4,07	756,00	532,98	237,18	437,46
1200	62,16	8,14	1512,00	1065,96	474,36	874,92

A cultivar de cana-de-açúcar avaliada foi a RB867515, onde foram plantados em cada vaso quatro rebolos contendo uma gema cada. Após a germinação foi realizado o desbaste, deixando-se apenas três rebolos.

A irrigação da cultura foi realizada de forma manual e em quantidade igual para todas as parcelas, seguindo um turno de rega de 2 dias. O manejo da irrigação foi realizado por meio da lixiviação coletada no fundo do vaso. Ao longo de todo o período experimental (210 dias) foram aplicados cerca de 160 L de água em cada vaso, ou seja, 851 mm.

Os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na) foram analisados na folha +1 aos 120 dias após o plantio. A folha +1 foi considerada como sendo a primeira folha com lígula visível. A retirada dessa folha para análise constou do descarte das extremidades, enviando para análise laboratorial

somente o terço médio. A nervura central também foi descartada (Martinez, Carvalho, & Souza, 1999).

Aos 210 dias, foram quantificados os acúmulos de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) e de Na na parte aérea das plantas (colmo, ponteiro e folhas), sendo este acúmulo obtido por meio da multiplicação de cada um dos teores dos nutrientes encontrados pela quantidade de biomassa seca acumulada na respectiva parte aérea das plantas.

Tanto na determinação do teor (120 dias) quanto na determinação do acúmulo (210 dias) de macronutrientes e sódio pela cultura, todo o material vegetal foi levado para o laboratório e lavado com água deionizada. Posteriormente, o material foi acondicionado em sacos de papel devidamente identificados com os respectivos tratamentos e colocado para secar em estufa com circulação forçada de ar (65 °C) até obtenção da biomassa seca constante. Em seguida, o material seco foi processado em moinho do tipo Willey com peneira de 2 mm e acondicionado em recipientes fechados para posterior quantificação dos macronutrientes e do sódio.

A extração dos macronutrientes (P, K, Ca e Mg) e do sódio (Na) do tecido vegetal foi realizada em sistema fechado usando forno micro-ondas como fonte de calor e ácido nítrico (HNO₃) concentrado para digerir a matéria seca; e, para o N, foi realizada digestão sulfúrica em bloco digestor conforme metodologia proposta por Silva (2009). A quantificação de N total foi realizada pelo método de arraste de vapor Kjeldahl; potássio e sódio pelo método de fotometria de chama; fósforo pelo método colorimétrico molibdo-vanadato; e, cálcio e magnésio foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica.

Para comparar o efeito de cada variável em função dos tratamentos avaliados foi realizada análise de variância. Os parâmetros significativos foram submetidos à análise de comparação por contrastes ortogonais e análise de regressão. O tratamento que incluiu adubação mineral não foi utilizado para ajuste das equações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estado nutricional da cultura

Os teores dos macronutrientes avaliados na folha diagnóstico da cultura (folha +1) foram significativamente alterados pelos tratamentos aplicados, com exceção para o Na (Tabela 4).

Tabela 4 – Efeito da adubação mineral (AM) e doses de vinhaça sobre os teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na) na folha +1 da cana-de-açúcar.

Elementos ¹	Tratamentos						F	P-valor ²
	AM	D0	D150	D300	D600	D1200		
N	15,90±1,14	14,88±1,14	10,64±0,81	11,84±0,81	12,45±0,81	12,75±0,81	3,83	0,0108
P	1,36±0,09	1,47±0,09	1,28±0,07	0,96±0,07	1,05±0,07	1,08±0,07	6,20	0,0008
K	16,18±1,15	13,54±1,15	21,39±0,81	15,50±0,81	16,13±0,81	16,87±0,81	8,57	<0,0001
Ca	0,84±0,21	1,36±0,21	1,06±0,15	0,59±0,15	1,25±0,15	2,00±0,15	10,00	<0,0001
Mg	0,73±0,05	0,84±0,05	0,75±0,03	0,65±0,05	0,86±0,05	0,99±0,05	11,78	<0,0001
Na	1,67±0,42	1,70±0,42	2,63±0,30	1,75±0,30	1,53±0,30	1,52±0,30	1,94	12,47

¹Expresso em g kg⁻¹; ²Para significância estatística se considera p < 0,05.

A aplicação de doses de vinhaça alterou o teor de N em relação à AM apenas em D300 (Tabela 5). Verifica-se, Figura 1a, que a quantidade de N disponibilizado pela vinhaça não foi suficiente para proporcionar teor do nutriente na folha +1 superior àquele obtido com a aplicação da AM.

Tabela 5 - Contrastes ortogonais comparando o efeito da adubação mineral (AM) e das doses de vinhaça aplicadas (D0 a D1200) sobre os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na folha diagnóstico da cultura da cana-de-açúcar.

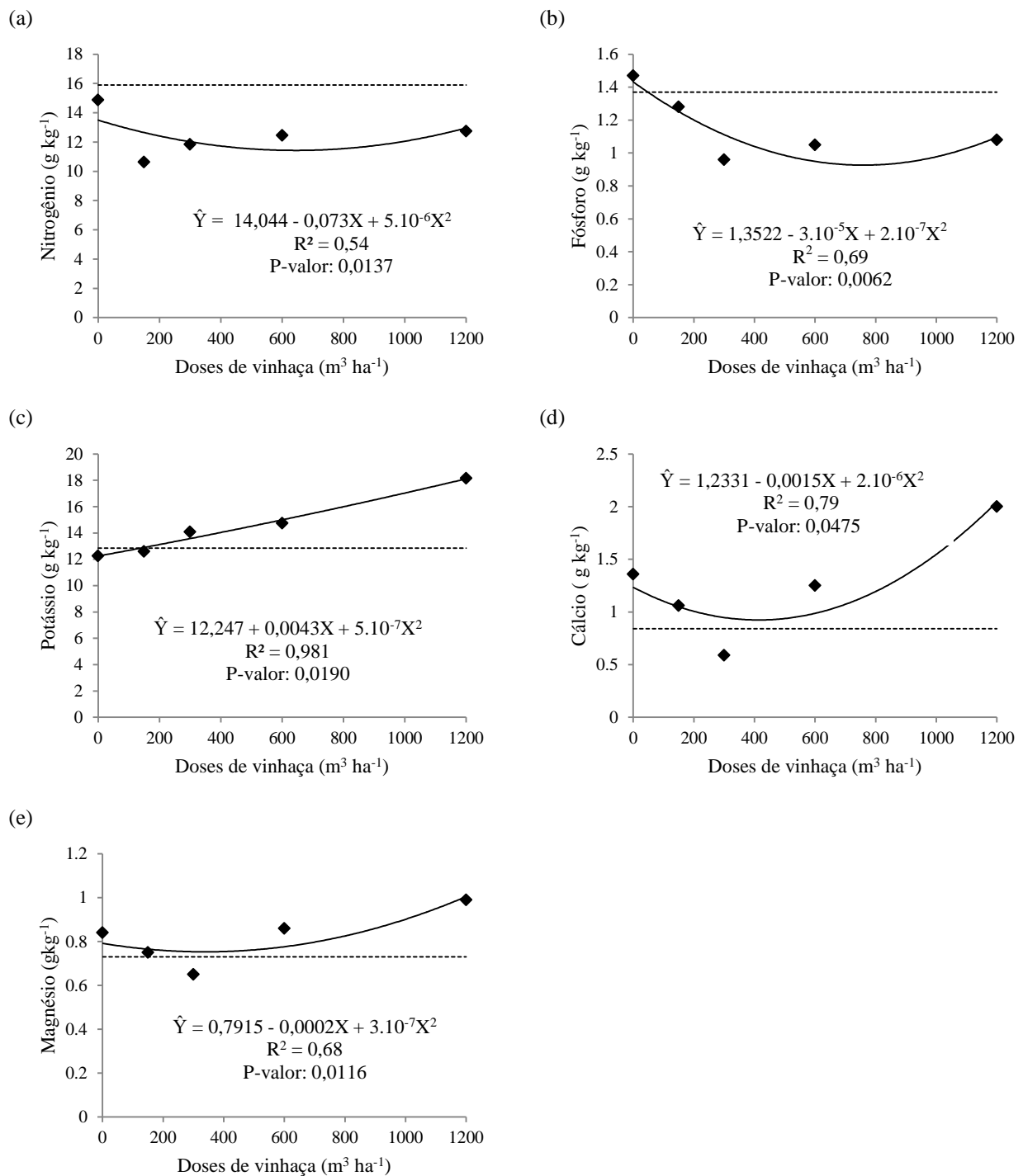
Contrastes	Valores de F				
	N	P	K	Ca	Mg
AM × Vinhaça (D150 a D1200)	3,11 ^{NS}	9,00*	3,15 ^{NS}	3,44 ^{NS}	3,27 ^{NS}
AM × D0	2,30 ^{NS}	11,42*	48,91*	6,29*	6,76*
AM × D300	4,70*	18,85*	4,72*	8,68*	10,17*
AM × D1200	0,40 ^{NS}	0,60 ^{NS}	0,37 ^{NS}	3,03 ^{NS}	2,63 ^{NS}
D0 × Vinhaça (D150 a D1200)	0,00 ^{NS}	1,27 ^{NS}	67,52*	39,08*	40,08*

*Significativo (p < 0,05); ^{NS}Não significativo (p > 0,05).

A baixa concentração de N no início do experimento pode ter se refletido em uma deficiência nutricional do nutriente e, conseqüentemente, ter se tornado uma fonte de estresse a qual interferiu no desenvolvimento da cana-de-açúcar. De acordo com Meyer (2013), o N juntamente com o K são os nutrientes que a cana-de-açúcar mais absorve. Para Franco et al. (2011), na fase inicial de crescimento, o N é responsável por 40% da biomassa seca da planta.

O baixo teor de N constatado, Figura 1a, pode ser justificado pela baixa quantidade de N fornecida por cada dose de vinhaça aplicada e ao suprimento inadequado de P (Figura 1b) fornecido pelo resíduo às plantas. A concentração de P encontrada na vinhaça é menor do que a concentração N, e como o P e o N atuam

sinérgicamente (Malavolta, 2006), possivelmente uma maior concentração de P no solo teria contribuído para um melhor aproveitamento do N disponível na vinhaça.



----- Adubação Mineral

◆ Médias das doses de vinhaça

Figura 1. Concentração de nitrogênio (a), fósforo (b), potássio (c), cálcio (d) e magnésio (e) na folha diagnóstica (folha +1) da cana-de-açúcar aos 120 dias após o plantio.

Pode-se observar na Tabela 5 que a AM proporcionou teores de P na folha diagnóstica significativamente diferentes daqueles encontrados em D0 e D300. Constata-se, Figura 1b, que as plantas adubadas com AM apresentaram maiores teores de P na folha diagnóstica, evidenciando que a adubação da cultura realizada apenas com uso de vinhaça não supriu adequadamente a mesma em N e P.

Apesar do baixo suprimento de P fornecido às plantas por meio da aplicação das doses de vinhaça, a cultivar RB867515 conseguiu acumular consideráveis concentrações do nutriente, até mais do que o K na maioria dos tratamentos (Tabela 4). Calheiros et al. (2012) afirmam que a Cultivar RB867515 não apresenta elevada exigência em P para a obtenção de produtividade satisfatória.

Silva, Cazetta e Togoro (2015) ao avaliarem os efeitos da aplicação de vinhaça ao solo sobre a nutrição mineral da cana-de-açúcar não constataram aumentos significativos na concentração de N e de P na folha diagnóstica da cultura. Do mesmo modo, Carvalho et al. (2013) avaliando a produtividade de cana soca em função do uso de gesso e vinhaça observaram que a aplicação até $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça não causou alteração significativa na concentração de N e P na folha.

Pela análise dos contrastes realizados para o potássio (Tabela 5), percebe-se que a comparação entre a aplicação e não aplicação de vinhaça ao solo foi significativa, indicando que o teor de K na folha diagnóstica da cultura aumentou em detrimento do incremento das doses de vinhaça aplicadas (Figura 1c). Em relação a AM, a D300 proporcionou um teor de K ligeiramente superior. Borges et al. (2015), ao avaliarem a aplicação de vinhaça em sistema de cultivo orgânico sobre o estado nutricional e a produtividade da cana-de-açúcar, verificaram que o K oriundo da vinhaça aplicada na dose de $600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ aumentou o teor do nutriente na folha diagnóstica da cultura em 44,5% em relação a adubação mineral.

De acordo com Silveira, Vitusso e Medina (2015), a planta de cana-de-açúcar acumula a maior parte do K presente nos tecidos durante os primeiros meses de desenvolvimento. Ligando isso ao fato de que a vinhaça adiciona grandes quantidades de K no solo, a planta consegue absorver a maior parte deste nutriente disponível mesmo que não tenha necessidade (consumo de luxo), podendo a partir desse período apresentar desordens fisiológicas ocasionadas pelo excesso do próprio nutriente.

Os resultados para Ca e Mg foram semelhantes (Tabela 5), isto é, a aplicação de vinhaça proporcionou aumento do teor de Ca e Mg a partir de D375 e D333, respectivamente (Figura 1d, 1e). As médias de D150 e D300, na Figura 1d e 1e, indicam

que o baixo suprimento de vinhaça ocasiona concentração de Ca e Mg semelhante a AM, concordando assim com Carvalho et al. (2013), que observaram baixa concentração de Mg na folha diagnóstico da cana-de-açúcar com a aplicação de 200 m³ ha⁻¹ de vinhaça.

Os teores de Ca e Mg obtidos nesta pesquisa ficaram abaixo da faixa de teores adequados para a cultura da cana-de-açúcar indicada por Silva (2009), que recomenda teores de Ca de 2 a 8 g kg⁻¹ e de Mg de 1 a 3g kg⁻¹.

Avaliando a aplicação de vinhaça, em sistema de cultivo orgânico, sobre o estado nutricional e a produtividade da cana-de-açúcar, Borges et al. (2015) constataram que a aplicação da dose de 600 m³ ha⁻¹ não contribuiu para uma nutrição adequada da cultura e que os teores de Ca e de Mg na folha diagnóstico mantiveram-se abaixo do recomendado.

Quando as plantas apresentaram teores de K na folha diagnóstico acima do limite considerado como adequado para a cultura (Figura 1c), a absorção de Ca (Figura 1d) e de Mg (Figura 1e) foi reduzida proporcionalmente.

Rhodes, Miles e Hughes (2018) avaliaram a interação do K com o Ca na cultura da cana-de-açúcar e concluíram que o teor de Ca na folha diagnóstico foi suprimido pela presença de K proporcionalmente à sua disponibilidade no solo. Ainda de acordo como os autores, tal fato se deve à relação que os íons de K têm com os íons de H, pois compartilham a mesma proteína de transporte transmembrana, o que facilita sua absorção pela planta em detrimento do Ca. Entre os tratamentos aplicados, a partir de D300 o suprimento de K foi suficiente para permitir que a planta absorva menos Ca.

Silva et al. (2017) avaliando o estado nutricional de variedades de cana-de-açúcar também verificaram teores médios de K na folha diagnóstico da cultura superiores aos teores médios obtidos para o Ca e para o Mg. De acordo com Nascimento et al. (2017), doses de vinhaça aplicadas ao solo aumentam o teor de K nas plantas, mas ao mesmo tempo podem diminuir os teores de Ca e de Mg.

Acúmulo de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) e de sódio (Na) na parte aérea

Verifica-se, Tabela 6, que os tratamentos avaliados exerceram influência significativa sobre os acúmulos de N, K, Ca, Mg e Na, aos 210 dias de cultivo, porém apesar da constatação de médias elevadas para o acúmulo de P, não houve diferença entre os tratamentos sobre o acúmulo do nutriente.

Tabela 6 - Efeito da adubação mineral (AM) e doses de vinhaça sobre os acúmulos de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na) na parte aérea da cultura da cana-de-açúcar aos 210 dias de cultivo.

Elementos ¹	Tratamentos						F	P-valor ²
	AM	D0	D150	D300	D600	D1200		
N	7,87±1,10	5,27±1,10	6,23±0,78	6,23±0,78	7,25±0,78	10,87±0,78	5,62	0,0014
P	14,43±2,59	14,16±2,59	14,90±1,83	14,26±1,83	15,41±1,83	15,45±1,83	0,08	0,9947
K	7,03±2,54	9,84±2,54	11,08±1,80	11,76±1,80	10,87±1,80	27,58±1,80	14,86	<0,0001
Ca	9,62±4,15	12,81±4,15	11,88±2,94	28,45±2,94	7,64±2,94	3,50±2,94	8,28	0,0001
Mg	0,83±0,15	0,78±0,15	0,59±0,10	0,61±0,10	0,67±0,10	1,16±0,10	4,06	0,0082
Na	0,61±0,14	0,61±0,14	0,64±0,10	0,58±0,10	0,66±0,10	1,40±0,10	9,13	<0,0001

¹Expresso em g kg⁻¹; ²Para significância estatística se considera p < 0,05.

O contraste entre a aplicação de AM versus D0 na cana-de-açúcar sobre o acúmulo de N pela parte aérea da cultura apresentou diferença significativa (Tabela 7). Ainda de acordo com a Tabela 7 e com o acúmulo de N pela cultura, constatou-se diferença significativa para o contraste entre a D0 versus as demais doses (0 ×D150 a D1200 m³ ha⁻¹) do resíduo.

Tabela 7 - Contrastes ortogonais comparando o efeito da adubação mineral (AM) e das doses de vinhaça aplicadas (D0 a D1200) sobre o acúmulo de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na) na parte aérea da cultura da cana-de-açúcar aos 210 dias após o plantio.

Contrastes	Valores de F				
	N	K	Ca	Mg	Na
AM × Vinhaça (D150 a D120)	1,87 ^{NS}	0,02 ^{NS}	0,12 ^{NS}	0,41 ^{NS}	0,00 ^{NS}
AM × D0	17,11*	32,38*	3,35 ^{NS}	4,43*	19,37*
AM × D300	0,50 ^{NS}	0,38 ^{NS}	9,21*	0,86 ^{NS}	0,04 ^{NS}
AM × D1200	2,77 ^{NS}	0,61 ^{NS}	0,29 ^{NS}	0,07 ^{NS}	0,00 ^{NS}
D0 × Vinhaça (D150 a D1200)	19,70*	71,17*	10,39*	16,29*	43,16*

*Significante (p < 0.05); ^{NS}Não significante (p > 0.05).

Na Figura 2a observa-se que o teor de N aumentou proporcionalmente com o acréscimo da quantidade de vinhaça aplicada, tendo-se constatado aumento de 0,0045 g kg⁻¹ para cada unidade acrescida nas doses de vinhaça aplicadas. O maior acúmulo desse macronutriente foi de 10,54 g kg⁻¹ estimado com a aplicação da dose de vinhaça correspondente a 1200 m³ ha⁻¹, revelando incremento percentual de 51,2% em relação a D0.

Com base na análise dos dados fica evidente a necessidade de adubação nitrogenada em complemento a aplicação de vinhaça independentemente das doses aplicadas. A esse respeito, Schultz et al. (2010) recomendam uma dose de até 80 kg ha⁻¹

de nitrogênio de modo a otimizar a produtividade da cana-de-açúcar quando fertirrigada com vinhaça.

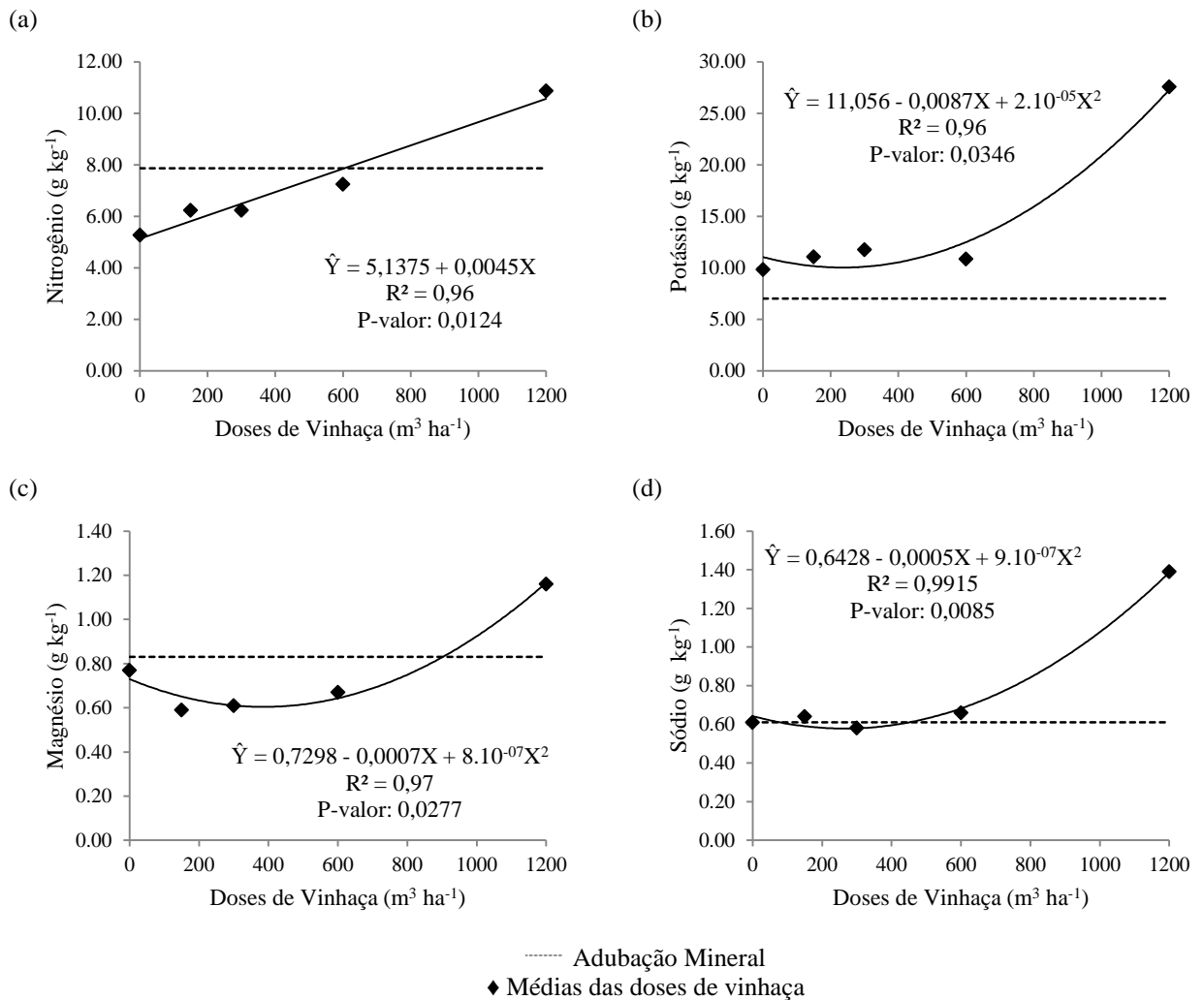


Figura 2. Acúmulo de nitrogênio (a), potássio (b), magnésio (c) e sódio (d) na parte aérea da cultura da cana-de-açúcar.

O acúmulo de P pela cultura não foi significativamente influenciado por nenhum dos tratamentos aplicados (Tabela 6) devendo-se o fato à baixa concentração deste nutriente encontrada na vinhaça. A cana-de-açúcar, no entanto, não apresentou desenvolvimento comprometido com a baixa concentração de P fornecido pela vinhaça tendo em vista que dentre os macronutrientes que a cultura necessita, o P é o nutriente menos demandado (Oliveira et al., 2010).

Por meio dos contrastes analisados para o acúmulo de K na parte aérea da cultura, pode-se verificar que AM diferiu significativamente do tratamento com ausência de

aplicação de vinhaça (D0), e este, por sua vez, diferiu das demais doses de vinhaça aplicadas (Tabela 7).

Na Figura 2b, observam-se médias bem próximas entre as doses de vinhaça aplicadas D0, D150, D300 e D600 e um incremento crescente a partir da dose de 275,5 m³ ha⁻¹ chegando-se a se obter um acúmulo máximo de K em D1200. Isso indica que na D1200, possivelmente, a presença de altas concentrações de vinhaça no solo pode ter proporcionado, na planta, uma absorção de K acima das suas reais necessidades para a produção de rendimentos máximos (consumo de luxo). De acordo com Zörb, Senbayram e Peiter (2014), isso ocorre quando há elevadas concentrações de K nos tecidos. A absorção de K além da necessidade fisiológica da planta pode ocorrer através dos mecanismos eficientes de absorção e da sua distribuição ao longo das células e da planta, sendo o citoplasma e o vacúolo compartimentos utilizados na planta para estocar o K absorvido (Ahmad & Maathuis, 2014).

Na curva de acúmulo de K verifica-se, através da Figura 2b, que cana-de-açúcar extraiu tanto K quanto esteve disponível no solo em D1200. O resultado concorda com Oliveira et al. (2010) e Flores et al. (2012), pois K é o nutriente mais extraído dentre os macronutrientes, seguido do Ca, N e Mg.

A concentração de K na folha diagnóstico e no acúmulo deste nutriente na parte aérea da cultura justificam a afinidade da Cultivar RB867515 pelo K, tal como afirmam Oliveira et al. (2016).

Para o Ca (Tabela 7), verificou-se significância do contraste da D0 com as demais doses de vinhaça e da AM com D300. O Ca extraído pelas plantas tendeu a reduzir com o aumento da dose aplicada, e D300 apresentou média superior à AM. Ao mesmo tempo, o K apresentou comportamento inverso, ou seja, houve aumento no acúmulo do nutriente em função do aumento das doses de vinhaça aplicadas.

Observou-se interação antagônica entre o K e o Ca. Sabe-se que esses cátions podem competir pelos mesmos sítios de absorção, entretanto a cana-de-açúcar possui preferência por absorção de K. Malavolta (2006) afirma que o antagonismo entre K e Ca ocorre porque o K possui vantagem por ser monovalente e de ter menor grau de hidratação, além da sua maior mobilidade no solo. Com isso, sob elevadas quantidades de K, a planta absorve menos Ca, como pode ser observado em D600 e D1200.

Para o acúmulo de Mg, o contraste da D0 com as demais doses indica tendência de aumento da concentração de Mg nos tecidos da parte aérea a medida que se aumenta

o quantitativo de vinhaça aplicado (Tabela 7), porém, somente a D1200 proporcionou maior média de acúmulo do nutriente em relação à AM (Figura 2c).

Paulino et al. (2011) constataram que ao longo dos anos a cultura da cana-de-açúcar apresentou preferência na absorção do K e Mg em relação ao Ca.

Em relação ao teor de Na na parte aérea, o contraste da dose D0 com a AM evidenciou médias praticamente semelhantes (Tabela 7), assim como também ocorreu com as médias das doses D150, D300 e D600 (Figura 2d).

A semelhança constatada no comportamento dos dados relacionados aos acúmulos de Na e de K (Figuras 2d e 2b, respectivamente) deve-se ao fato destes íons serem quimicamente semelhantes e, daí exercerem competição entre si no momento de absorção, principalmente se um deles estiver em concentrações mais elevadas no meio. Diante disso, pode-se afirmar, para as condições desta pesquisa, que a considerável concentração de Na na vinhaça aplicada proporcionou uma competição do íon com o K no momento da absorção pela cultura. Benito et al. (2014), no entanto, afirmam que a planta possui preferência pela absorção de K em relação ao Na, sendo que tal preferência vai depender da concentração do Na no meio em relação a concentração do K.

O comportamento do teor e do acúmulo de Ca nas plantas de cana-de-açúcar constatados na presente pesquisa deveu-se, possivelmente, às elevações das concentrações de K, e provavelmente também do Na, provenientes da aplicação da vinhaça (Rhodes et al., 2018).

Na Tabela 8 encontra-se a ordem de acúmulo de nutrientes conforme cada tratamento. Percebe-se que o fósforo foi o nutriente mais acumulado, apesar da baixa concentração encontrada na vinhaça. A cana-de-açúcar passou a acumular mais K do que Ca a partir de D600, enquanto que o N, o Mg e o Na foram os nutrientes menos absorvidos. Oliveira et al. (2011) afirmam que o acúmulo máximo de P e K ocorre nas fases iniciais de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Tabela 8. Ordem de acúmulo de nutrientes na cana-de-açúcar de acordo com as doses de vinhaça e adubação mineral (AM).

Tratamento	Ordem de acúmulo
Adubação Mineral	P > Ca > N > K > Mg > Na
D0	P > Ca > K > N > Mg > Na
D150	P > Ca > K > N > Na > Mg
D300	Ca > P > K > N > Na > Mg

D600	P > K > Ca > N > Mg = Na
D1200	K > P > N > Ca > Na > Mg

CONCLUSÕES

A utilização de doses 600 e 1200 m³ ha⁻¹ de vinhaça proporciona interação antagonica com o potássio e o cálcio na folha diagnóstico da cana-de-açúcar.

Aplicar doses de até 300 m³ ha⁻¹ permite um acúmulo do cálcio superior ao potássio.

A cultivar RB867515 é capaz de acumular consideráveis concentrações de fósforo diante baixa disponibilidade no nutriente.

Utilizar doses de vinhaça acima de 600 m³ ha⁻¹ afeta negativamente o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida, e a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pelas condições de ensino e desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, I., & Maathuis, J. M. (2014). Cellular and tissue distribution of potassium: physiological relevance, mechanisms and regulation. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 708-714.
- Barbosa, E. A. A., Arruda, F. B., Pires, R. C. M., Silva, T. J. A., & Sakai, E. (2012). Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça e adubos minerais via irrigação por gotejamento subsuperficial: ciclo da cana-planta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(9), 952-958.
- Benito, B., Haro, R., Amtmann, A., Cuin, T. A., & Dreyer, I. (2014). The twins K⁺ and Na⁺ in plants. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 723-731.
- Borges, L. de A. B., Madari, B. E., Leandro, W. M., Fernandes, P. M., Silva, E. A., Silva, M. R., & Silva, M. A. S. (2015). Nutritional state and productivity of organic sugarcane in Goiás, Brazil. *Journal of Agronomy*, 14(1), 6-14.
- Calheiros, A. S., Oliveira, M. W., Ferreira, V. M., Barbosa, G. V. S., Santiago, A. D., & Aristides, E. V. S. (2012). Produção de biomassa, de açúcar e de proteína em função

- de variedades de cana e de adubação fosfatada. *Semina: Ciências Agrárias*, 33(2), 809-818.
- Carvalho, J. M., Andreotti, M., Buzetti, S., & Carvalho, M. P. (2013). Produtividade de cana soca sem queima em função do uso de gesso e vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 43(1), 1-9.
- Cavalcanti, F. L. A. et al. (2008). *Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação*. 3. ed. Recife: Instituto Agrônomo de Pernambuco – IPA.
- Christofoletti, C. A., Escher, J. P., Correia, J. E., Marinho, J. F. U., & Fontanetti, C. S. (2013). Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. *Waste Management*, 33(12), 2752-2761.
- Flores, R. A., Prado, R. M., Politi, L. S., & Almeida, T. B. F. (2012). Potássio no desenvolvimento inicial da soqueira de cana crua. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 42(1), 106-111.
- Franco, H. C. J., Otto, R., Faroni, C. E., Vitti, A. C., Oliveira, E. C. A., & Trivelin, P. C. O. (2011). Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. *Field Crops Research*, 121(1), 29-41.
- Garcia, C. F. H., Souza, R. B., Souza, C. P., Christofoletti, C. A., & Fontanetti, C. S. (2017). Toxicity of two effluents from agricultural activity: comparing the genotoxicity of sugar cane and orange vinasse. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 142, 216-221.
- Grangeiro, L. C., Oliveira, F. C. L., Negreiros, M. Z., Marrocos, S. T. P., Lucena, R. R. M., & Oliveira, R. A. (2011). Crescimento e acúmulo de nutrientes em coentro e rúcula. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 6(1), 11-16.
- Malavolta, E. (2006). *Manual de nutrição mineral de plantas*. 1. ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres.
- Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. (1997). *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2.ed. Piracicaba: Potafos.
- Martinez, H. E. P., Carvalho, J. G., & Souza, R. B. (1999). Diagnose foliar. In: *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação*. (pp. 126-151). 1. ed. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais.
- Meyer, J. H. (2013). Sugarcane nutrition and fertilization. In: *Good Management Practices for the Cane Industry*. (pp. 133-180). 1. ed. Bartens Germany.

- Nascimento, R., Souza, J. A., Moreira, A., & Moraes, L. A. C. (2017). Phosphogypsum and vinasse application: soil chemical properties and alfafa productivity and nutritional characteristics. *Revista Caatinga*, 30(1), 213-219.
- Oliveira, E. C. A., Freire, J. F., Oliveira, R. I., Freire, M. B. G. S., Simões Neto, D. E., & Silva, S. A. M. (2010). Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas por irrigação plena. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(4), 1343-1352.
- Oliveira, E. C. A., Freire, J. F., Oliveira, R. I., Oliveira, A. C., & Freire, M. B. G. S. (2011) Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. *Revista Ciência Agronômica*, 42(3), 579-588.
- Oliveira, R. I., Medeiros, M. R. F. A., Freire, C. S., Simões Neto, D. E., & Oliveira, E. C. A. (2016). Nutrient partitioning and nutritional requirement in sugarcane. *Australian Journal of Crop Science*, 10(1), 69-75.
- Ortegón, G. P., Arboleda, F. M., Candela, L., Tamoh, K., & Valdes-Abellan, J. (2016). Vinasse application to sugar cane fields. Effect of the unsaturated zone and groundwater at Valle del Cauca (Colombia). *Science of the Total Environment*, 539, 410-419.
- Paulino, J., Zolin, C. A., Bertonha, A., Freitas, P. S. L., & Folegatti, M. V. (2011). Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. II. Características da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(3), 244-249.
- Pazuch, F. A., Nogueira, C. E. C., Souza, S. N. M., Micuanski, V. C., Friedrich, L., & Lenz, A. M. (2017) Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of Paraná, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 34-42.
- Rhodes, R., Miles, N., & Hughes, J. C. (2018). Interactions between potassium, calcium, and magnesium in sugarcane grown on two contrasting soils in South Africa. *Field Crops Research*, 223, 1-11.
- Schultz, N., Lima, E., Pereira, M. G., & Zonta, E. (2010). Efeito residual da adubação na cana-planta e da adubação nitrogenada e potássica na cana-soca colhidas com e sem a queima da palhada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(3), 811-820.
- Silva, F. C. (ed.). (2009). *Manual de análises química de solos, plantas e fertilizantes*. 2. ed. Brasília – DF: Embrapa Informação Tecnológica.

- Silva, J., Cazetta, J., & Togoro, A. (2015). Soil change induced by the application of biodigested vinasse concentrate, and its effects on growth of sugarcane. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 75(2), 249-254.
- Silva, V. S. G., Oliveira, M. W., Oliveira, D. C., Oliveira, T. B. A., Pereira, M. G., & Nogueira, C. H. C. (2017). Nutritional diagnosis of sugarcane varieties in a Yellow Oxisoil during three agricultural seasons. *African Journal of Agricultural Research*, 12(1), 50-57.
- Silveira, M. A. G., Vitusso, L., & Medina, N. H. (2015). Distribuição de potássio em cana-de-açúcar. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, 3(1A), 1-8.
- Zörb, C., Senbayram, M., & Peiter, E. (2014). Potassium in agriculture – Status and perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 171(9), 656-669.

**CAPÍTULO 3: APLICAÇÃO DE ELEVADAS DOSES DE VINHAÇA NOS
ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM ARGISSOLO**

APLICAÇÃO DE ELEVADAS DOSES DE VINHAÇA NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DE UM ARGISSOLO

RESUMO: A vinhaça é um resíduo da indústria sucroalcooleira gerada em grandes quantidades e que possui elevada carga poluidora, porém, quando bem utilizada como fonte mineral e de matéria orgânica na cultura da cana-de-açúcar traz efeitos benéficos. Entretanto, o uso de altas doses pode acarretar efeitos adversos para o solo. Objetivou-se estudar as alterações nos atributos químicos do solo sob o efeito de doses elevadas de vinhaça durante o cultivo da cana-de-açúcar. O experimento constou de doses equivalentes a 0, 150, 300, 600 e 1200 m³ ha⁻¹ de vinhaça e adubação mineral. Avaliou-se a concentração de potássio, cálcio, magnésio, sódio, matéria orgânica e CTC aos 90, 120, 150 e 210 dias após o plantio, além da respiração basal microbiana aos 210 dias. Os dados foram avaliados por análise de contrastes ortogonais e de regressão. O teor de matéria orgânica no solo aumentou proporcionalmente às doses de vinhaça aplicada. Na concentração de cálcio houve pouca variação ao longo das épocas avaliadas, enquanto que o magnésio, a disponibilidade foi comprometida com o aumento das doses. O potássio e sódio apresentaram maior disponibilidade no solo aos 120 e 150 dias. A respiração microbiana reduziu na emissão de C-CO₂ a partir da dose 600 m³ ha⁻¹. Elevadas doses de vinhaça pode aumentar o teor de matéria orgânica do solo, mas também pode prejudicar a respiração microbiana, a concentração de cálcio e magnésio, além de saturar os sítios de troca com potássio e sódio.

Palavras-chave: fertirrigação, excesso de nutrientes, antagonismo, meio ambiente

APPLICATION OF HIGH STILLAGE DOSES IN CHEMICAL ATTRIBUTES IN ULTISOIL

ABSTRACT: the stillage is an alcohol industry waste generated in large quantities with high polluting cargo, however, when strictly planned can be used as mineral and organic source in sugarcane crop and can bring benefits. However, the use of high stillage doses can have adverse effects on the soil. Aimed study the alterations in chemical soil attributes under effect of increasing stillage doses during sugarcane cultivation. The stillage doses used were: 0, 150, 300, 600 and 1200 m³ ha⁻¹ and mineral nutrition. Were analyzed the potassium, calcium, magnesium, sodium concentrations, organic matter and cation exchange capacity at 90, 120, 150 and 210 days after planting, and microbial

basal breathing at 210 days. The data were analyzed in orthogonal contrast and regression analysis. The organic matter increased according to stillage doses. The calcium concentration occurred low variation through the time period, while the magnesium availability was compromised according to the dose increasing. The potassium and sodium presented higher availability at 120 and 150 days of cultivation. The microbial respiration reduced the C-CO₂ conversion at D600 and D1200. The higher stillage doses can increase the organic matter, but can also damage the microbial population, the calcium and magnesium concentration besides saturate the exchange sites with potassium and sodium.

Keywords: fertirrigation, nutrient excess, antagonism, environment

INTRODUÇÃO

A vinhaça, resíduo obtido do processamento do etanol, é gerada a uma proporção de 10 a 15 vezes superior à produção do combustível (Christofolletti et al., 2013). Segundo dados da CONAB (2019), a estimativa de produção nacional de etanol no terceiro levantamento da safra 2019/2020 é de 33,8 bilhões de litros. Com base nisso, estima-se que serão gerados cerca de 440 bilhões de litros de resíduo que podem ser aproveitados como fonte nutricional para a agricultura no próprio cultivo da cana-de-açúcar.

Na constituição mineral da vinhaça, o elemento predominante é o potássio – correspondendo a 20% dos minerais –, seguido do sódio, cálcio e magnésio (Pazuch et al., 2017). Por isso, a elaboração da dose a ser aplicada normalmente é feita com base no teor de potássio e da necessidade da cultura.

O manejo adequado da dose de vinhaça a ser utilizada é importante, visto que uma super dosagem poderia ocasionar problemas por excesso de sais no solo, comprometendo a fertilidade e, conseqüentemente, o desempenho da cana-de-açúcar.

Silva et al. (2014), observaram que aplicar uma dose de até 400 m³ ha⁻¹ de vinhaça é adequada a um ótimo crescimento da cana-de-açúcar, mas 800 m³ ha⁻¹ ocorre redução do desempenho da cultura. Com a dose ótima, o potencial aumento de produtividade que o resíduo apresentou foi de até 10,5 toneladas por hectare.

Brito et al. (2009) afirmaram que a aplicação de vinhaça aumentou as concentrações de potássio e o pH do solo e diminuiu as concentrações de cálcio, magnésio e sódio. Zolin et al. (2011) também observaram aumento da concentração de K no solo ao longo de sucessivas aplicações de vinhaça. Canellas et al. (2003) observaram um aumento dos

macronutrientes no solo de maneira geral com uso de vinhaça ao longo dos anos de utilização do resíduo.

A vinhaça possui uma desproporção na distribuição de minerais em sua composição se comparado com o balanceamento feito na adubação mineral, o que faz com que o resíduo melhore o suprimento de K e de matéria orgânica do solo, mas por outro lado compromete o suprimento de cálcio e magnésio e altera o pH e outros atributos do solo. Por isso, que a utilização do resíduo deve ser manejada adequadamente de acordo com as condições do solo e a necessidade da cana-de-açúcar ou de qualquer outra cultura a ser fertilizada.

Deste modo foi avaliado o efeito que doses elevadas de vinhaça exercem nos atributos químicos do solo em comparação com a adubação mineral durante o crescimento inicial da cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife – PE, em ambiente protegido (8° 01' 05" S e 34° 56' 48" O, altitude de 6,49 m). O solo utilizado foi um Argissolo coletado em uma região de tabuleiros costeiros, na profundidade até 40 cm, separando as camadas 0 – 20 e 20 – 40 cm, em região da zona da mata do Estado de Pernambuco. A vinhaça utilizada foi coletada na Usina Petribu – localizada na zona rural de Lagoa de Itaenga, mata norte de Pernambuco – na tubulação de saída da destilaria para a lagoa de distribuição, cuja caracterização química se encontra na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química da vinhaça.

Parâmetros	Unidades	Resultado
pH		4,2
Condutividade elétrica	(dS m ⁻¹)	15,06
Carbono	(mg L ⁻¹)	1032,5
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO ₅)	(mg L ⁻¹)	12.300
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	(mg L ⁻¹)	27.250
Sólidos totais	(mg L ⁻¹)	22.368
Potássio	(mg L ⁻¹)	1.053
Cálcio	(mg L ⁻¹)	888,3
Magnésio	(mg L ⁻¹)	395,3
Sódio	(mg L ⁻¹)	729,1

O estudo foi realizado em vasos com capacidade volumétrica de 100 L que foram preenchidos da seguinte forma: na base se adicionou uma camada de 10 cm de brita n°

0; em seguida uma manta geotêxtil para drenagem; e, uma camada de 55 cm de solo, em que a porção inferior foi utilizado o solo coletado na camada 20 – 40 cm, e a porção superior o solo coletado na camada 0 – 20 cm, correspondendo a aproximadamente 77 L, com uma folga de 10 cm entre a borda superior do vaso e a superfície do volume de solo. Depois de acomodado no vaso, o solo possuiu uma porosidade de 46,15% e uma densidade semelhante a 1,4 g cm⁻³.

Antes de aplicar a vinhaça, o Argissolo utilizado no estudo possuía as características químicas apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Atributos químicos do Argissolo antes da aplicação de vinhaça.

Parâmetros	Resultado	
	0 – 20 cm	20 – 40 cm
pH	5,80	5,60
Fósforo (mg dm ⁻³)	8,00	5,00
Potássio (cmol _c dm ⁻³)	0,09	0,06
Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	1,75	1,25
Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	0,75	0,75
Sódio (cmol _c dm ⁻³)	0,08	0,07
CTC* (cmol _c dm ⁻³)	5,80	5,60
V** (%)	46,00	38,00
m*** (%)	2,00	7,00

*Capacidade de Troca Catiônica; ** Saturação por base; *** Saturação por alumínio.

O manejo da vinhaça se deu de acordo com 4 doses aplicadas em uma quantidade equivalente a 0(D0), 150 (D150), 300 (D300), 600 (D600) e 1200 (D1200) m³ ha⁻¹. Os tratamentos que não receberam vinhaça foram compostos de o que recebeu adubação mineral (AM) NPK, correspondente a 500 kg ha⁻¹ na formulação 14-24-18, composto de sulfato de amônio, super-simples e cloreto de potássio, necessidade calculada conforme análise de solo e a demanda nutricional da cana-de-açúcar e na recomendação de adubação para o Estado de Pernambuco sugerida por Cavalcanti et al. (2008); e, o outro, tratamento que foi irrigado somente com água de abastecimento (D0), nutrindo as plantas com os nutrientes remanescentes no solo. Os 6 tratamentos totalizaram 30 parcelas experimentais dispostas aleatoriamente em um ambiente protegido.

A quantidade de potássio, cálcio, magnésio e sódio adicionado em cada dose de vinhaça equivalente a doses de adubo mineral, extrapolando m³ ha⁻¹ de vinhaça para kg ha⁻¹, estão apresentados na Tabela 3.

A vinhaça foi aplicada 20 dias antes da semeadura da cana-de-açúcar. As irrigações se deram de forma manual e com quantidade igual para todos os tratamentos. O manejo foi realizado através da ocorrência de drenagem de água coletada no fundo do vaso, com um turno de rega de 2 dias. Ao final de 210 dias foi aplicado cerca de 160L de água em cada vaso.

Tabela 3. Dose de potássio (K_2O), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e sódio (Na^+), equivalentes a $kg\ ha^{-1}$ de adubo mineral, de acordo com as doses de vinhaça.

Dose $m^3\ ha^{-1}$	K_2O	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+
	----- $kg\ ha^{-1}$ -----			
150	189	133,24	59,29	109,36
300	378	266,49	118,59	218,73
600	756	532,98	237,18	437,46
1200	1512	1065,96	474,36	874,92

O experimento foi avaliado aos 90, 120, 150 e 210 dias após o plantio para os parâmetros: potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca), magnésio (Mg), matéria orgânica (MO) e capacidade de troca catiônica (CTC). A extração e quantificação desses elementos foi realizada de acordo com a metodologia de Silva (2009). A respiração basal microbiana ($C-CO_2$) também foi analisada, porém somente aos 210 dias, seguindo a metodologia de Silva et al. (2007a).

Os dados foram submetidos a análise de variância utilizando o PROC GLM do pacote estatístico SAS (SAS Institute, 2010). O delineamento estatístico adotado foi o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). De acordo com o resultado obtido através do teste de Mauchly, as variáveis avaliadas ao longo do tempo foram analisadas utilizando o arranjo em parcelas subdivididas; e para avaliação do efeito de cada variável entre os tratamentos foi realizada análise de contrastes ortogonais e análise de regressão.

A análise de contrastes ortogonais foi realizada com a finalidade de comparar a adubação mineral (AM) com os tratamentos que receberam vinhaça ($AM \times Vinhaça$ (D150 a D1200)); a adubação mineral com a não aplicação de vinhaça ($AM \times D0$); a adubação mineral com a dose de $300\ m^3\ ha^{-1}$ ($AM \times D300$); a adubação mineral com a dose de $1200\ m^3\ ha^{-1}$ ($AM \times D1200$); e a aplicação de vinhaça com a não aplicação de vinhaça ($D0 \times Vinhaça$ (D150 a D1200)).

Para realizar a análise de regressão entre as médias, foram elaboradas equações que melhor se ajustavam ao comportamento dos dados entre os modelos de equações lineares, quadráticas ou equação segmentada com platô (*broken line*). A adubação mineral não foi utilizada nos ajustes das equações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apenas o potássio e o sódio foram significativos na interação tratamento \times tempo, e a CTC, não apresentou efeito em relação aos tratamentos aplicados (Tabela 4).

Tabela 4. Efeito do tratamento e da sua interação com o tempo para o potássio, sódio, cálcio, magnésio, CTC (Capacidade de Troca Catiônica) e matéria orgânica (MO).

	Valores de F					
	Potássio	Sódio	Cálcio	Magnésio	CTC	MO
Tratamentos	24,89 ^{**}	17,92 ^{**}	5,05 ^{**}	3,59 [*]	1,97 ^{NS}	3,79 [*]
Tratamentos \times Tempo	2,16 [*]	2,40 ^{**}	1,43 ^{NS}	0,85 ^{NS}	0,96 ^{NS}	1,48 ^{NS}

^{*}Significativo a 5% de probabilidade; ^{**}Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} Não significativo a 5% de probabilidade

A aplicação de D300 promoveu a atividade dos microrganismos no solo, registrando uma média da respiração basal microbiana (Tabela 5) de 23,09 mg CO₂, superior à AM (18,41 mg CO₂), enquanto que as médias observadas em D600 e D1200 foram menores (Tabela 6).

Tabela 5. Efeito das doses de vinhaça e adubação mineral (AM) na respiração microbiana (mg CO₂), magnésio, cálcio e matéria orgânica (MO).

Contrastes	Valores de F			
	mg CO ₂	Magnésio	Cálcio	MO
AM \times Vinhaça (D150 a D1200)	1,75 ^{NS}	0,02 ^{NS}	8,32 ^{**}	1,07 ^{NS}
AM \times D0	0,18 ^{NS}	0,00 ^{NS}	16,84 ^{**}	6,60 [*]
AM \times D300	4,71 [*]	0,33 ^{NS}	9,98 ^{**}	0,83 ^{NS}
AM \times D1200	0,58 ^{NS}	3,08 ^{NS}	0,03 ^{NS}	0,32 ^{NS}
D0 \times Vinhaça (D150 a D1200)	1,22 ^{NS}	0,09 ^{NS}	5,65 [*]	6,32 [*]

^{*}Significativo a 5% de probabilidade; ^{**}Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} não significativo a 5% de probabilidade

Os microrganismos do solo são importantes para fertilidade devido à ciclagem de nutrientes que realizam em fontes orgânicas. No caso da vinhaça, a atividade microbiana é importante na degradação da matéria orgânica e, conseqüentemente, no aumento da disponibilidade de nutrientes para absorção pelas raízes das plantas. No

entanto, a população de microrganismos no solo sofre alterações para se adaptar às elevadas cargas de matéria orgânica, condutividade elétrica e baixo pH da vinhaça, podendo refletir em uma menor atividade (Christofoletti et al., 2013) (Tabela 1), como possivelmente ocorreu em D600 e D1200. Moran-Salazar et al. (2016) afirmam que os compostos orgânicos presentes na vinhaça, como açúcares residuais, nutrientes, melanoidinas e polifenóis, são os que mais afetam a atividade dos microrganismos.

Tabela 6. Média da respiração microbiana (mg CO₂) e magnésio de acordo com as doses de vinhaça e a adubação mineral (AM).

Tratamentos	mg CO ₂	Magnésio (mg dm ⁻³)
AM	18,41	1,05
D0	11,90	1,30
D150	19,66	1,39
D300	23,09	1,26
D600	14,33	1,14
D1200	9,13	1,09

A concentração de Mg na vinhaça não foi suficiente para ocasionar efeito significativo no solo para os contrastes avaliados (Tabela 5).

A vinhaça aumentou a concentração de cálcio no solo, variou as médias conforme as doses e em relação à AM (Tabela 5). Na Figura 1A mostra que a partir de D150 a vinhaça incrementou a concentração de cálcio a uma média superior ao controle. Observou-se também que a relação entre as doses de vinhaça apresentou um platô na dose teórica de 266,71 m³ ha⁻¹ com uma concentração de 2,77 cmol_c dm⁻³, ou seja, acima disso, o acréscimo de vinhaça não aumentou a concentração de Ca no solo.

Paulino et al. (2011), Brito et al. (2009) e Barros et al. (2010) observaram que a vinhaça contribui no aumento da concentração de cálcio e magnésio no solo, sendo o primeiro em maior quantidade do que o segundo, pois, na composição química do resíduo, a concentração de cálcio predomina em relação ao magnésio.

Analisando a matéria orgânica, Tabela 5, nota que o aporte orgânico oriundo da vinhaça e da adubação mineral não diferiram entre si. Entretanto, quando se analisa somente entre as doses de vinhaça, percebe-se que o aumento do fornecimento do resíduo no solo ocasionou alteração significativa, obtendo assim um aumento da MO do

solo de acordo com o acréscimo da dose de vinhaça aplicada (Figura 1B). Yin et al. (2018) também observaram que a vinhaça contribuiu para o aumento da matéria orgânica no solo.

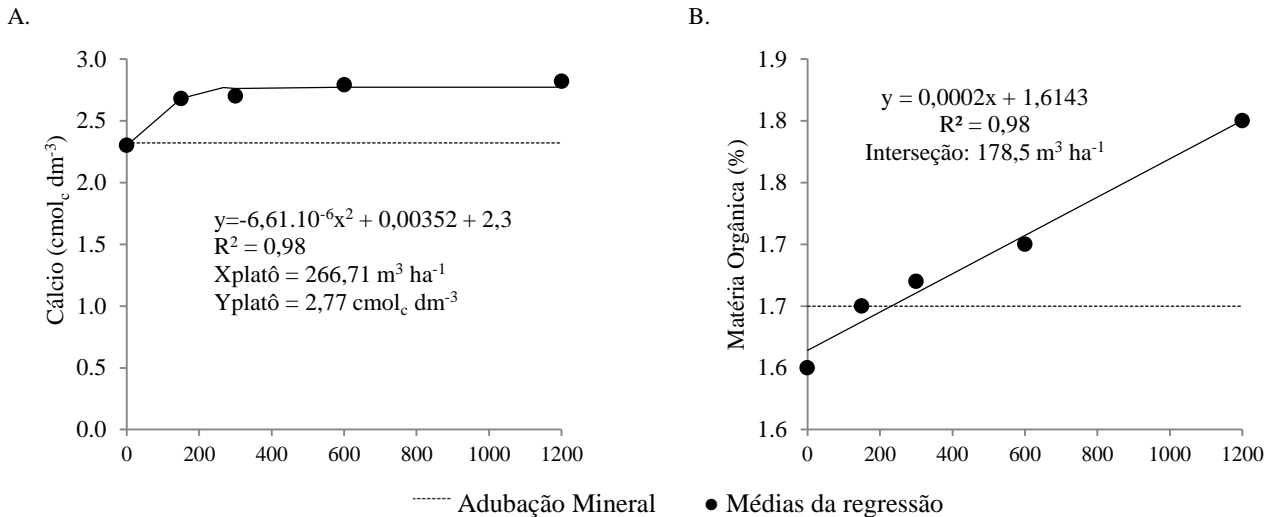


Figura 1. Médias de cálcio (A) e matéria orgânica (B) em relação as doses de vinhaça e adubação mineral.

O potássio, Tabela 4, apresentou significância estatística na interação do tratamento com o tempo ($P < 0,05$), por isso será discutido analisando as épocas de avaliação separadamente.

As concentrações de potássio no solo nos tratamentos que receberam vinhaça diferiram estatisticamente daqueles que receberam adubação mineral a partir dos 90 dias, Tabela 7. A concentração de potássio no solo também foi influenciada conforme a dose de vinhaça aplicada.

Tabela 7. Contrastes ortogonais do potássio aos 90, 120, 150 e 210 dias após o plantio de acordo com a adubação mineral (AM) e as doses de vinhaça ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$).

Contrastes	Valores de F			
	Período de avaliação (dias de plantio)			
	90	120	150	210
AM × Vinhaça (D150 a D1200)	24,50**	7,19*	14,57**	3,07 ^{NS}
AM × D0	51,24**	10,24**	53,32**	12,87**
AM × D300	20,25**	10,84**	21,06**	3,12 ^{NS}
AM × D1200	11,33**	0,12 ^{NS}	0,12 ^{NS}	0,00 ^{NS}
D0 × Vinhaça (D150 a D1200)	18,08**	1,63 ^{NS}	35,68**	9,60**

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} não significativo a 5% de probabilidade

Aos 90 dias o aumento da concentração de potássio no solo em relação às doses de vinhaça é perceptível (Figura 2), a partir de D150 a concentração de K foi superior à AM. Aos 120 dias se nota que a concentração de K em D300 e D1200 é semelhante, indicando a ocorrência de lixiviação do excesso de K fornecido por D1200 no seu período de maior disponibilidade, devido à elevada mobilidade de K. A quantidade de íons fornecido por D1200 pode ter ocasionado uma saturação de K no solo, ocasionando lixiviação para demais camadas do vaso.

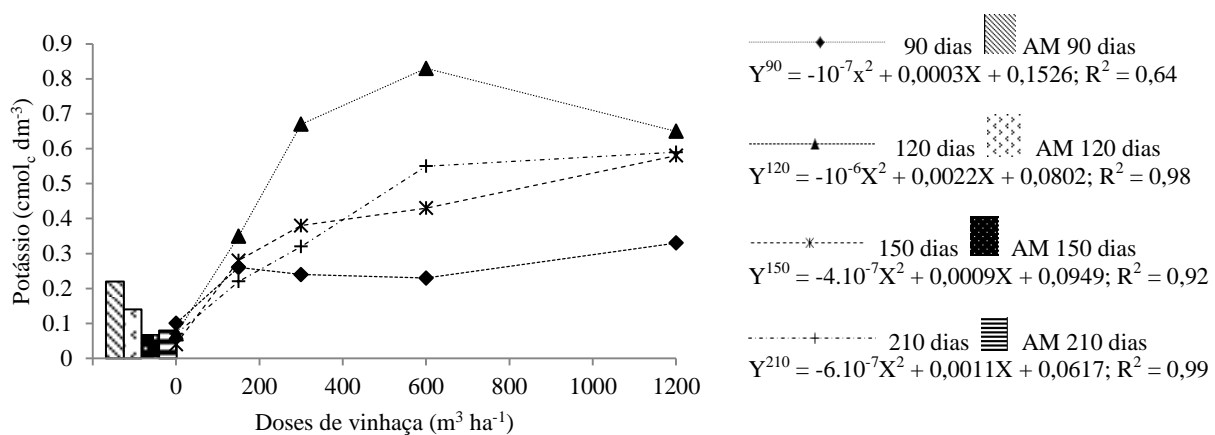


Figura 2. Médias das concentrações de potássio no solo em relação às doses de vinhaça e a adubação mineral (AM) aos 90, 120, 150 e 210 dias de plantio.

Concordando, Yin et al. (2018) avaliaram que a concentração de K, em um curto período de tempo, também reduz a sua concentração no solo conforme o aumento da dose aplicada.

A partir dos 120 dias é quando a concentração de K no solo tende a reduzir, como mostra as concentrações aos 150 e 210 dias. Francisco et al. (2016) também observaram que a concentração de K no solo, oriundo da aplicação de vinhaça, tende a reduzir a partir dos 120 dias. Entretanto, os resultados apresentados por Zolin et al. (2011) mostraram que, aplicando doses baixas, como 150 m³ ha⁻¹, por um tempo superior a 1 ano, é possível que a concentração de K no solo aumente ao longo das sucessivas aplicações durante os anos de cultivo da cana-de-açúcar.

As respostas das concentrações de sódio em relação ao tempo não diferiram tanto quanto o K (Tabela 8). A adubação mineral diferiu de D300 apenas aos 90 dias, enquanto que em D1200 a adubação foi estatisticamente igual para os quatro períodos avaliados.

Tabela 8. Contraste do sódio avaliado aos 90, 120, 150 e 210 dias após o plantio de acordo com a adubação mineral (AM) e as doses de vinhaça ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

Contrastes	Valores de F			
	Período de avaliação (dias de plantio)			
	90	120	150	210
AM × Vinhaça (D150 a D1200)	3,60 ^{NS}	0,33 ^{NS}	6,02*	1,59 ^{NS}
AM × D0	8,70**	0,02 ^{NS}	25,37**	9,40**
AM × D300	7,18**	0,86 ^{NS}	3,66 ^{NS}	0,66 ^{NS}
AM × D1200	0,15 ^{NS}	0,18 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,01 ^{NS}
D0 × Vinhaça (D150 a D1200)	3,76 ^{NS}	0,29 ^{NS}	19,01**	8,77**

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} não significativo a 5% de probabilidade

Entre os períodos de tempo avaliado, a disponibilidade de sódio foi maior aos 90 dias entre as doses de vinhaça. Aos 150 e 210 dias a concentração de Na em D600 e D1200 são superiores às demais doses e à AM.

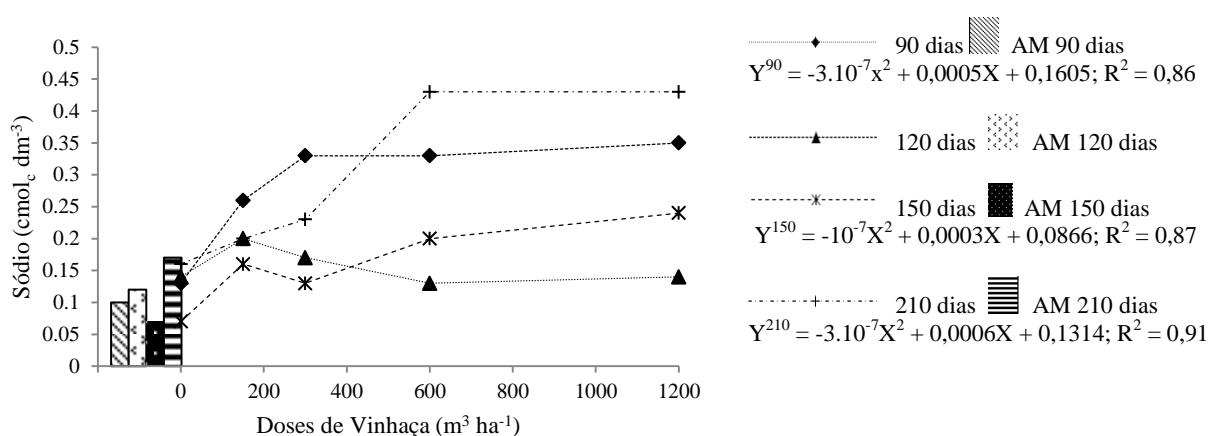


Figura 3. Concentração de sódio aos 90, 120, 150 e 210 dias de plantio de acordo com as doses de vinhaça e a adubação mineral (AM).

O alto teor de Na no solo é um atributo característico da vinhaça utilizada comparada a outros resíduos, como esgoto doméstico apresentado por Bonini et al. (2014). Um aspecto negativo que o aumento de Na no solo pode trazer, dentre outros, é o antagonismo em relação à absorção de cálcio pela planta e a competição com o K pelos sítios de absorção (Malavolta, 2006).

De modo geral, a quantidade de nutrientes presentes no solo tendeu diminuir dos 90 aos 210 dias. A ocorrência de maior disponibilidade de nutrientes no solo houve entre os 120 e 150 dias, pois a lenta mineralização da matéria orgânica permite que a

liberação de nutrientes no solo vá ocorrendo lentamente. De acordo com Parnaudeau et al. (2008), em torno de 180 dias é suficiente para uma redução significativa da mineralização do carbono.

Jiang et al. (2012) observaram que a vinhaça ao longo dos anos contribuiu no aumento do teor de potássio no solo, não havendo necessidade de reposição desse nutriente via adubação mineral. Também mostraram que em solos que são naturalmente deficientes em potássio, o resíduo é uma opção viável e sustentável, mas que deve ser manejado adequadamente.

A vinhaça como fornecedor de K permite que a fonte mineral do nutriente seja dispensada, entretanto, a dose adotada deve ser manejada de acordo com os atributos químicos do solo e a necessidade da cana-de-açúcar, pois do contrário, a concentração de K no solo pode chegar a concentrações que podem prejudicar o desenvolvimento das plantas. Observar a quantidade de K remanescente de uma última aplicação de vinhaça também é importante para o balanceamento nutricional do elemento no solo.

CONCLUSÕES

A vinhaça nas doses 600 e 1200 m³ ha⁻¹ proporciona uma relação inversa entre as concentrações de sódio e potássio com o cálcio e magnésio no solo.

Doses acima de 600 m³ ha⁻¹ pode ser prejudicial ao desenvolvimento da população microbiana do solo.

Após os 120 dias de plantio da cana-de-açúcar, a disponibilidade de potássio e sódio no solo é máxima. Na dose 1200 m³ ha⁻¹ pode haver saturação de íons K⁺ e Na⁺ no solo.

O teor de matéria orgânica do solo é proporcional ao aumento da quantidade de vinhaça aplicada.

A aplicação de até 1200 m³ ha⁻¹ de vinhaça não altera a capacidade de troca catiônica e a concentração de magnésio do solo.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida, e a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pelas condições de ensino e desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barros, R. P.; Viégas, P. R. A.; Silva, T. L.; Souza, R. M.; Barbosa, L.; Viégas, R. A.; Barretto, M. C. V.; Melo, A. S. (2010). Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 40, 341-346.
- Bonini, M. A.; Sato, L. M.; Bastos, R. G.; Souza, C. F. (2014). Alterações nos atributos químico e físicos de um Latossolo Vermelho irrigado com água residuária e vinhaça. *Revista Biociências*, 20, 78-85.
- Brito, F. L.; Rolim, M. M.; Pedrosa, E. M. R. (2009). Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 4, 456-462.
- Canellas, L. P.; Velloso, A. C. X.; Marciano, C. R.; Ramalho, J. F. G. P.; Rumjanek, V. M.; Rezende, C. E.; Santos, G. A. (2003). Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo do tempo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27, 935-944.
- Cavalcanti, J. F. A. (Coord.) (2008). Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação. Recife: IPA. 198p.
- Christofoletti, C. A.; Escher, J. P.; Correia, J. E.; Marinho, J. F. U.; Fontanetti, C. S. (2013). Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. *Waste Management*, 33, 2752-2761.
- CONAB. Acompanhamento de safra brasileira. Cana-de-açúcar, v. 6 – Safra 2010/20, n. 3 – Terceiro levantamento, Brasília. 2019. 75p.
- Francisco, J. P.; Folegatti, M. V.; Silva, L. B. D.; Silva, J. B. G.; Diotto, A. V. (2016). Variations in the chemical composition of the solution extracted from a Latosol under fertigation with vinasse. *Revista Ciência Agronômica*, 47, 229-239.
- Jiang, Z.; LI, Y.; Wei, G.; Liao, Q.; Su, T.; Meng, Y.; Zhang, H.; Lu, C. (2012). Effect of long-term vinasse application on physico-chemical properties of sugarcane field soils. *Sugar Tech*, 14, 412-417.
- Malavolta, E. (2006). Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres. 638p.
- Martinez, H. E. P.; Carvalho, J. G.; Souza, R. B. (1999) Diagnose foliar. In: Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez V., V. H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5º Aproximação. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa. p. 126-151.

- Moran-Salazar, R. G.; Sanchez-Lizarraga, A. L.; Rodriguez-Campos, J.; Davila-Vazquez, G.; Marino-Marmolejo, E. N.; Dendooven, L.; Contreras-Ramos, S. M. (2016). Utilization of vinasses as soil amendment: consequences and perspectives. *Springer Plus*, 5:1007.
- Parnaudeau, V.; Condom, N.; Oliver, R.; Cazevielle, P.; Recous, S. (2008). Vinasse organic matter quality and mineralization potential, as influenced by raw material, fermentation and concentration processes. *Bioresource Technology*, 99, 1553-1562.
- Paulino, J.; Zolin, C. A.; Bertonha, A.; Freitas, P. S. L.; Folegatti, M. V. (2011). Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. II. Características da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15, 244-249.
- Pazuch, F. A.; Nogueira, C. E. C.; Souza, S. N. M.; Micuanski, V. C.; Friedrich, L.; Lenz, A. M. (2017). Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of Paraná, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 34-42.
- SAS Institute. Statistical Analysis System. Procedure guide for personal computer. 2010.
- Silva, A. P. M.; Bono, J. A. M.; Pereira, F. A. R. (2014). Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: efeito no solo e na produtividade de colmos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 38-43.
- Silva, E. E.; Azevedo, P. H. S.; De-Polli, H. (2007-a). Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico (qCO₂). Embrapa, Comunicado Técnico 99, 4p.
- Silva, F. C. (ed.) (2009). Manual de análises química de solos, plantas e fertilizantes. 2. Ed. Brasília – DF: Embrapa Informação Tecnológica.
- Silva, M. A. S.; Griebeler, N. P.; Borges, L. C. (2007-b). Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e do lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11, 108-114.
- Yin, J.; Deng, C.; Wang, X.; Chen, G.; Mihucz, V. G.; Xu, G.; Deng, Q. (2018). Effects on long-term application of vinasse on physicochemical properties, heavy metals content and microbial diversity in sugarcane field soil. *Sugar Tech*.
- Zolin, C. A.; Paulino, J.; Bertonha, A.; Freitas, P. S. L.; Folegatti, M. V. (2011). Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. I. Características do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15, 22-28.

**CAPÍTULO 4: BIOMETRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR ADUBADA COM DOSES
ELEVADAS DE VINHAÇA**

BIOMETRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR ADUBADA COM DOSES ELEVADAS DE VINHAÇA

RESUMO: O uso da vinhaça no cultivo da cana-de-açúcar é uma boa opção para destinar adequadamente o subproduto, devido seu aporte nutricional para as plantas; entretanto, deve-se avaliar o uso de altas dosagens, pois podem prejudicar o rendimento da cana e poluir o solo. Objetivou-se avaliar o efeito de doses elevadas de vinhaça nas características biométricas da cana-de-açúcar na fase inicial de crescimento. Em vasos preenchidos com solo aplicaram-se doses de vinhaça: 0, 150 300, 600, 1200 m³ ha⁻¹ e mais adubação mineral em delineamento inteiramente casualizado. As avaliações iniciaram aos 60 dias com a contagem de perfilhos por vaso, altura da planta e número de folhas verdes e secas. As avaliações foram realizadas a cada 30 dias, após os 60, até aos 210 dias com medidas de biomassa fresca e seca de colmo, raiz e ponteiro mais folhas, diâmetro de colmo e área foliar. As doses de vinhaça aumentaram todos os índices de crescimento da cana-de-açúcar estudados; exceto altura da planta. Ao longo do tempo os tratamentos se tornaram mais expressivos, conforme indicado pelos parâmetros biométricos avaliados. As elevadas doses de vinhaça proporcionam aumento na produção de biomassa da cana-de-açúcar até a dose 600 m³ ha⁻¹, mas diminuíram o desenvolvimento da altura da planta.

Palavras-chave: aproveitamento de resíduos, produção biomassa, variáveis biométricas

SUGARCANE BIOMETRY FERTILIZED WITH HIGH STILLAGE DOSES

ABSTRACT: the stillage use on sugarcane field is an option to properly disposal on this sub product due your nutritional support to the plants; however, should evaluate the use of high doses because can prejudice the sugarcane yield and pollute the soil. Aimed evaluate the effect of high stillage doses on characteristics biometric of sugarcane on initial growing. The stillage doses applied were 0, 150, 300, 600 and 1200 m³ ha⁻¹ and mineral supply in a design randomized in vase filled with soil. The evaluations started at 60 days of cultivating with tiller count per vase, plant height and number of green and dry leaves. The evaluations were carried out every 30 days and finished at 210 days of cultivation with the measurement of fresh biomass and dry biomass of the stem, root and pointer plus leaves, stem diameter and area leaf. The stillage doses increased all the growth parameters of sugarcane evaluated; except plant height. Over time the

treatments have become more expressive, as indicated by the biometric parameters evaluated. The higher stillage doses allowed increment in a sugarcane biomass production until $600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, but decreased the development of sugarcane height.

Keywords: use of waste, biomass production, biometric variables

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura de importância comercial para a economia do Brasil, pois é responsável pela produção do açúcar e de biocombustível – o etanol, produto amplamente consumido pela população. Os biocombustíveis foram inseridos no uso diário há anos devido à problemática ambiental ocasionada pelos combustíveis fósseis.

O Brasil, safra 2020/2021, segundo a CONAB previu uma produção de aproximadamente 30 bilhões de litros de etanol para atender a demanda do mercado. A produção de etanol gera um efluente, conhecido por vinhaça, na proporção de cada litro de etanol para até 15 L de resíduo (Christofoletti et al., 2013).

A vinhaça é constituída de 93% de água e 7% de sólidos totais, em que, dessa fração sólida, 75% corresponde à matéria orgânica e os outros 25% é composto de minerais, cujo potássio está em concentração predominante (Pazuch et al., 2017).

De modo geral, a vinhaça é considerada resíduo, mas para a agricultura pode receber classificação semelhante à de um subproduto, devido seu elevado conteúdo de matéria orgânica e fertilizante agrícola, podendo vir a substituir parte da adubação mineral em plantio de cana-de-açúcar.

Vários estudos têm sido conduzidos com a vinhaça desde o primeiro trabalho publicado por Almeida et al. (1950), com o objetivo de avaliar os efeitos que o resíduo exerce sobre a cana-de-açúcar. Com os resultados observados em relação aos benefícios sobre a fertilidade do solo por diversos autores, a prática de fertirrigação com vinhaça foi se tornando comum nas propriedades rurais, passando a ser uma forma de aproveitamento do subproduto.

Porém, para que os benefícios sejam obtidos e não haja consequências prejudiciais ao ambiente, antes de aplicar a vinhaça se deve conhecer as suas características físico-química, a capacidade do solo de reter nutrientes e minerais, e a quantidade que está sendo lançada.

A cana-de-açúcar quando nutrida com vinhaça pode apresentar comportamento distinto de quando é cultivada somente com adubos minerais, pois o resíduo não

apresenta a mesma proporção de nutrientes balanceada, afetando o desenvolvimento da cana que a recebe como fonte nutritiva.

Barbosa et al. (2012) observaram que em relação à adubação mineral a vinhaça prejudicou o número de perfilhos, a área foliar da cana-de-açúcar e a produção de colmos. Silva et al. (2018) observaram que aplicando uma dose de 120 m³ ha⁻¹ de vinhaça in natura reduz a produção de colmos em comparação com uso da vinhaça suplementada com adubação mineral. Entretanto, Carvalho et al. (2013) não observaram diferença na produtividade de colmos da cana-de-açúcar aplicando doses de até 200 m³ ha⁻¹. Maradiaga-Rodriguez et al. (2018) observaram que a dose 330 m³ ha⁻¹ é a mais indicada para um melhor desenvolvimento biométrico da cana-de-açúcar.

Alguns parâmetros podem ser utilizados para avaliar o desempenho da cultura, dentre eles parâmetros biométricos, que são reflexo direto das condições de cultivo fornecidas às plantas. Com isso, esse trabalho visa avaliar e analisar os parâmetros biométricos da cana-de-açúcar quando recebe doses elevadas de vinhaça cultivada em vaso sob ambiente protegido durante a fase de inicial de desenvolvimento.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado nas dependências da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), campus Recife – PE, em ambiente protegido (8° 01' 05" S e 34° 56' 48" O, altitude de 6,49 m).

O experimento foi conduzido em vasos de 100 L, cujo preenchimento se deu com um Argissolo coletado nas profundidades de 0 – 20 e 20 – 40 cm na EECAC – UFRPE (Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina), localizado na região de tabuleiros costeiros da zona da mata norte de Pernambuco. A vinhaça por sua vez foi coletada na Usina Petribu – localizada na zona rural de Lagoa de Itaenga, também mata norte de Pernambuco – na tubulação de saída da destilaria para a lagoa de distribuição.

Os vasos possuíam uma perfuração no fundo com um coletor para possível captação da drenagem da água irrigada. Na base do vaso adicionou-se uma camada de 10 cm de brita número 0 com uma manta geotêxtil para drenagem separando-o do solo. O restante do vaso foi preenchido com aproximadamente 77 L de solo, sendo metade desse volume utilizado o solo da camada 0 – 20 cm e outra da camada 20 – 40 cm, resultando em uma porosidade de 46,15% e disposto de forma que tivesse uma densidade semelhante a 1,4 g cm⁻³.

Foi adotado um total de seis tratamentos: adubação mineral (AM), em que as plantas receberam como fonte nutritiva uma formulação NPK 14-24-18, correspondente a 500 kg ha⁻¹, dose calculada conforme análise do solo prévia ao plantio e a necessidade da cana-de-açúcar conforme as recomendações de Cavalcanti (2008), utilizando-se como fonte de N o sulfato de amônio, como fonte de P₂O₅ o superfosfato simples e como fonte de K₂O o cloreto de potássio; D0, em que as plantas não receberam nenhum tipo de adubo, ou seja, a cana-de-açúcar se nutria somente dos nutrientes remanescentes do solo; e quatro doses de vinhaça correspondentes a 150 (D150), 300 (D300), 600 (D600) e 1200 (D1200) m³ ha⁻¹. Os tratamentos totalizaram 30 parcelas distribuídas aleatoriamente no ambiente protegido, contendo cada um 6 repetições nos tratamentos contendo vinhaça.

Além do efeito dos tratamentos também se avaliou o efeito do tempo sobre os parâmetros analisados, realizando avaliações a partir dos 60 dias após o plantio (DAP) até os 210 DAP.

O cultivo da cana-de-açúcar foi realizado a partir de rebolos contendo uma gema cada. Foram cultivadas quatro gemas por vaso, em que após a germinação efetuou-se o desbaste, deixando três plantas por vaso, fazendo uso do cultivar RB867515.

A vinhaça foi aplicada 20 dias antes da semeadura da cana-de-açúcar, decorrido esse período de tempo, foram iniciadas as irrigações juntamente com o plantio, de forma igualitária para todos os tratamentos, mantendo a umidade do solo favorável ao desenvolvimento da cultura. Ao longo dos 210 DAP foram utilizados cerca de 160L de água de abastecimento em cada vaso.

A composição da vinhaça é apresentada na Tabela 1. A quantidade de macronutrientes mais o sódio aplicado nos tratamentos com doses de vinhaça, equivalentes a fontes de adubação mineral, se encontra na Tabela 2, de acordo com cada dose, sendo extrapolado para kg ha⁻¹ proporcional a área superficial do vaso.

Tabela 1. Caracterização química da vinhaça.

Parâmetros	Resultado
pH	4,2
Carbono (mg L ⁻¹)	1032,5
Nitrogênio total (mg L ⁻¹)	51,8
Fosfato total (mg L ⁻¹)	6,78
Cálcio (mg L ⁻¹)	888,3
Magnésio (mg L ⁻¹)	395,3
Sódio (mg L ⁻¹)	729,1
Potássio (mg L ⁻¹)	1053

Tabela 2. Quantidade de nitrogênio (N), fósforo (P₂O₅), potássio (K₂O), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺) e sódio (Na⁺) aplicados de acordo com cada dose de vinhaça.

Dose (m ³ ha ⁻¹)	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺
	------(kg ha ⁻¹)-----					
150	7,77	1,01	189	133,24	59,29	109,36
300	15,54	2,03	378	266,49	118,59	218,73
600	31,08	4,07	756	532,98	237,18	437,46
1200	62,16	8,14	1512	1065,96	474,36	874,92

A avaliação do número de perfilho se deu dos 60 até 150 DAP (NPI/vaso). Dos 90 aos 210 DAP foram avaliados: número de folhas verdes totais por vaso (NFV/vaso), em que se considerou válida uma folha com no mínimo 50% de área verde, a contagem também incluiu as folhas que estavam no cartucho; número de folhas secas por vaso (NFS/vaso), considerando folhas com mais de 50% da superfície foliar amarelada ou necrosada; e altura de planta por vaso (AP/vaso), considerando na medição a base da planta até a primeira lígula visível. Houve medição das mesmas três plantas presentes em cada vaso, fazendo uma média aritmética, representando a altura de planta daquela unidade experimental.

Foram medidos aos 210 DAP área foliar (cm²) por vaso (AF/vaso) através da equação proposta por Hermann e Câmara (1999); diâmetro do colmo (DC/vaso), em mm, em que a medida foi feita na base de cada uma das plantas do vaso, com auxílio de um paquímetro, obtendo uma média aritmética por cada parcela experimental; biomassa fresca do colmo (ou caule) (BFC); biomassa seca do colmo (BSC); biomassa fresca da raiz (BFR), sendo medido através da drenagem e retirada, com auxílio de água, de todo solo presente no vaso; biomassa seca de raiz (BSR); biomassa fresca do ponteiro mais as folhas (BFPF), em que foi aproveitado toda região acima da primeira lígula visível mais as demais folhas verdes; e biomassa seca do ponteiro mais folhas (BSPF). Para determinação da biomassa seca, os materiais foram acondicionados em sacos de papel e colocados em estufa de ventilação forçada a 65°C por 48h.

O delineamento adotado foi o inteiramente casualizado (DIC). Os dados foram submetidos à análise de variância utilizando o PROC GLM do pacote estatístico SAS (SAS Institute, 2010). Utilizando o teste de Mauchly, o resultado permitiu avaliar as variáveis medidas ao longo do tempo utilizando o arranjo em parcelas subdivididas; e para o efeito de cada variável entre os tratamentos, foi realizada análise de contrastes ortogonais e análise de regressão.

A análise de contrastes ortogonais foi realizada com a finalidade de comparar a adubação mineral com os tratamentos que receberam vinhaça (AM × vinhaça (D150 a D1200)); a adubação mineral com a não aplicação de vinhaça (AM × D0); adubação mineral com a dose 300 m³ ha⁻¹ (AM × D300); adubação mineral com a dose 1200 m³ ha⁻¹ (AM × D1200); e a não aplicação com a aplicação de vinhaça (D0 × vinhaça (D150 a D1200)). Para realizar a análise de regressão entre as médias, foram elaboradas equações que melhor se ajustavam ao comportamento dos dados. A adubação mineral não foi utilizada nos ajustes das equações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área foliar diferiu significativamente entre os tratamentos somente quando se comparou a adubação mineral com D0 (Tabela 3). Pode ser verificado que o uso da adubação mineral não resultou em diferença significativa em relação ao uso de vinhaça (Figura 1A). De acordo com os resultados de Palaretti et al. (2015) e Marouni et al. (2016), o aumento da quantidade de vinhaça fornecida a outras culturas também causa o mesmo efeito observado na cana-de-açúcar.

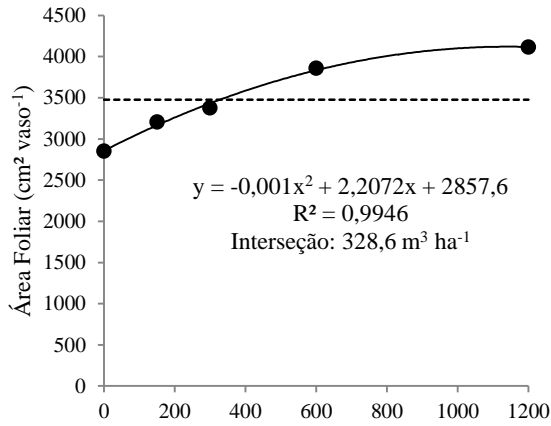
Tabela 3. Contrastes ortogonais da área foliar (AF), biomassa fresca do caule (BFC), biomassa seca do caule (BSC), biomassa fresca da raiz (BFR), biomassa seca da raiz (BSR), biomassa fresca do ponteiro mais folhas (BFPF), biomassa seca do ponteiro mais folhas (BSPF), diâmetro do colmo (DC) e número de perfilhos (NPI) de acordo com a adubação mineral (AM) e as doses de vinhaça (m³ ha⁻¹).

Contrastes	Valores de F								
	AF	BFC	BSC	BFR	BSR	BFPF	BSPF	DC	NPI
AM × Vinhaça (D150 a D1200)	1,72 ^{NS}	21,99 ^{**}	8,85 ^{**}	4,19 ^{NS}	5,99 [*]	21,10 ^{**}	22,53 ^{**}	12,85 ^{**}	15,97 ^{**}
AM × D0	5,71 [*]	33,49 ^{**}	7,27 [*]	8,62 ^{**}	15,86 ^{**}	109,13 ^{**}	85,98 ^{**}	17,17 ^{**}	44,03 ^{**}
AM × D300	0,92 ^{NS}	15,26 ^{**}	6,96 [*]	3,39 ^{NS}	3,74 ^{NS}	14,79 ^{**}	14,98 ^{**}	8,23 ^{**}	14,49 ^{**}
AM × D1200	0,98 ^{NS}	16,83 ^{**}	4,66 [*]	3,33 ^{NS}	5,13 [*]	15,56 ^{**}	16,98 ^{**}	6,88 [*]	1,74 ^{NS}
D0 × Vinhaça (D150 a D1200)	3,51 ^{NS}	6,37 [*]	0,02 ^{NS}	2,96 ^{NS}	7,69 ^{**}	94,01 ^{**}	59,58 ^{**}	2,27 ^{NS}	22,35 ^{**}

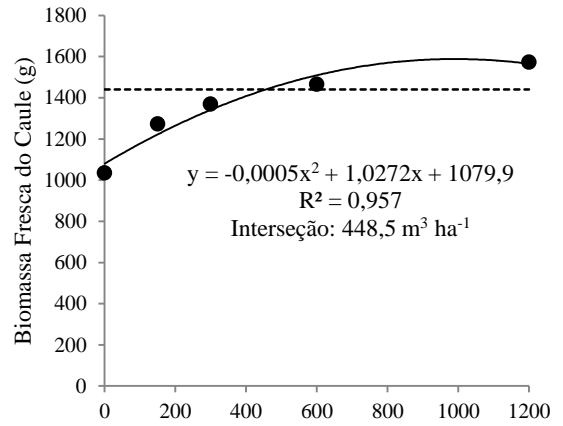
*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} não significativo a 5% de probabilidade

A vinhaça permitiu que a cana-de-açúcar desenvolvesse acúmulo crescente de biomassa fresca do caule (Tabela 3). Em relação à AM, D300 e D600 apresentaram médias semelhantes (Figura 1B), indicando um desenvolvimento equiparável que a cultura pode apresentar se for adubado com algumas dessas doses de vinhaça.

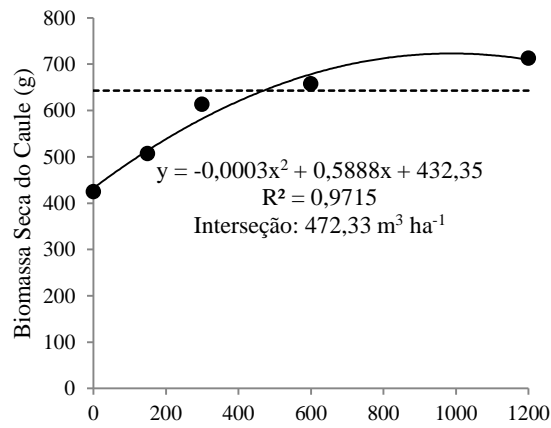
A.



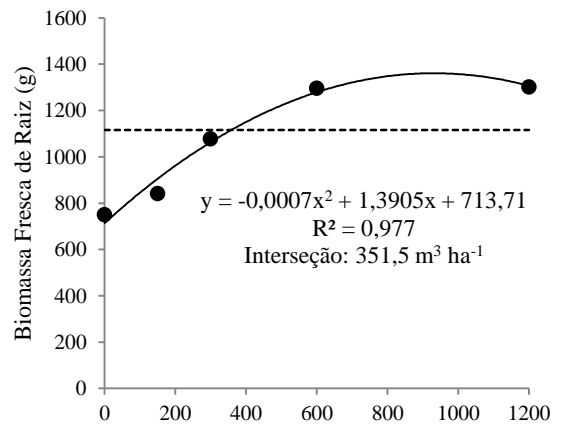
B.



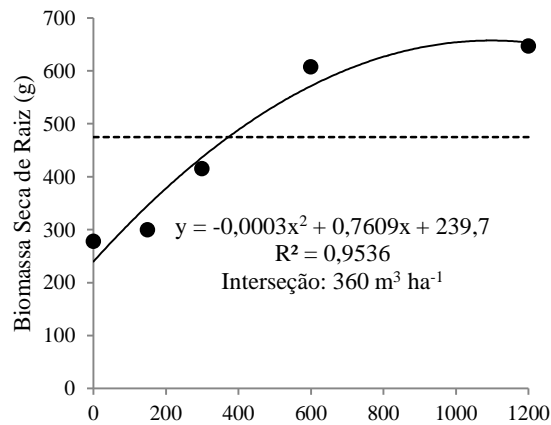
C.



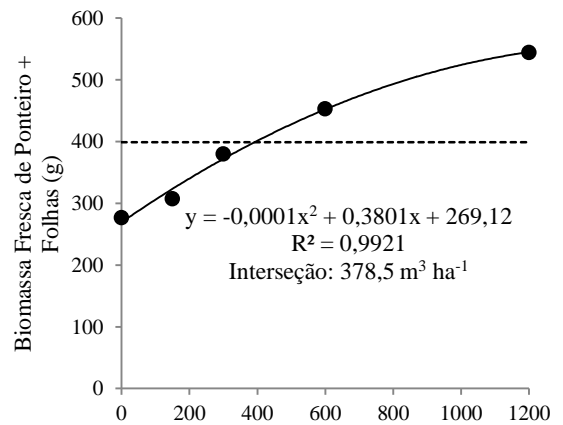
D.



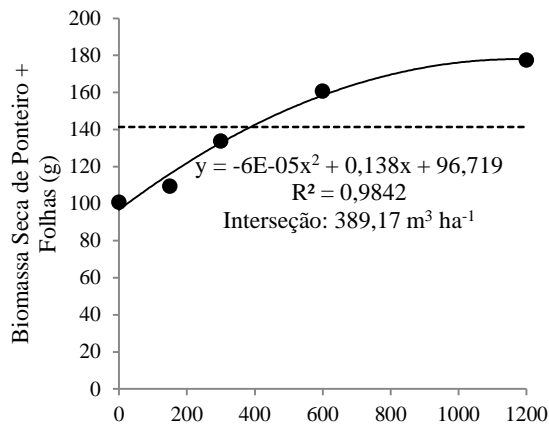
E.



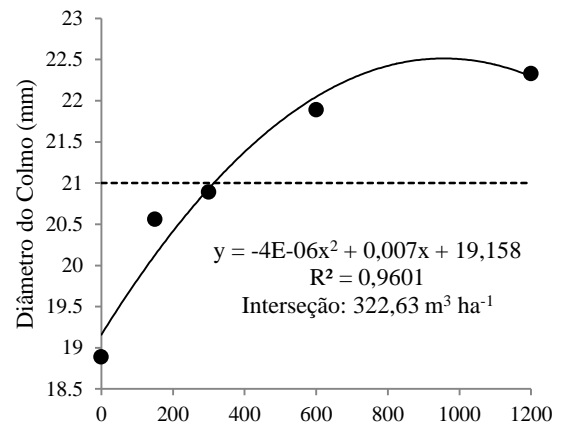
F.



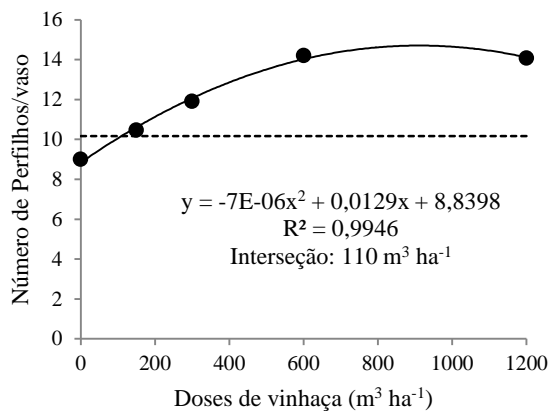
G.



H.



I.



----- Adubação Mineral • Média da dose de vinhaça

Figura 1. Média dos tratamentos nos parâmetros biométricos: área foliar (A), biomassa fresca do caule (B), biomassa seca do caule (C), biomassa fresca de raiz (D), biomassa seca de raiz (E), biomassa fresca do ponteiro mais folhas (F), biomassa seca de ponteiro mais folhas (G), diâmetro do colmo (H) e número de perfilhos (I).

No início de seu desenvolvimento, a cana-de-açúcar busca absorver nutrientes de forma eficiente para promover seu ganho de biomassa, como pode ser observado na Figura 1B. Esse mesmo comportamento pode ser observado quando se fornece outros tipos de fontes orgânicas na adubação, como a torta de filtro observada por Fravet et al. (2010), que possui composição de nutrientes inversa às concentrações de N, P e K na vinhaça.

Em relação à biomassa seca do caule houve efeito significativo das doses de vinhaça em relação à adubação mineral, entretanto não houve diferença entre as doses de vinhaça (Tabela 3). D300 e D600 apresentaram média semelhante a AM, enquanto que D1200 foi superior (Figura 1C), indicando que acima de D300 é possível obter

produção de colmo equiparável ou superior à AM. Os valores de biomassa fresca e seca do colmo obtido através da aplicação de doses de vinhaça concordam com os resultados obtidos por Prado et al. (2017).

Barbosa et al. (2013) mostram que uma dose de $338,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça foi responsável pelo incremento em BSC. Silva et al. (2014) observaram produção crescente de colmos de acordo com o aumento das doses de vinhaça aplicando doses de até $800 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Silva et al. (2018) também concordam ao indicarem que quanto maior a quantidade de nutrientes estiver presente na dose de vinhaça, melhor o desenvolvimento de BSC.

A biomassa fresca da raiz não apresentou diferença significativa quando se comparou a AM com as doses de vinhaça (Tabela 3), implicando que a vinhaça não estimula a produção de biomassa fresca de raízes a uma média superior da nutrição mineral (Figura 1D). Entre as doses de vinhaça, pode ser observado que houve tendência de aumento da BFR até a dose D600 (1296,4 g), a média observada em D1200 (1302,4 g) não foi proporcionalmente elevada.

A biomassa seca da raiz, entretanto, diferiu da adubação mineral apresentando média superior à AM nas doses D600 e D1200 (Tabela 3). Entre as doses de vinhaça as médias foram crescentes proporcionalmente à dose de vinhaça até D600, cessando o acúmulo de biomassa com D1200 (Figura 1E).

Pina et al. (2015) aplicando uma dose de $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça observou que no campo, o enraizamento da cana-de-açúcar foi superior à adubação mineral. Enquanto que Sousa et al. (2013) analisando o uso de efluente de esgoto doméstico, o resíduo foi responsável pelo menor enraizamento da cana.

Na biomassa fresca e biomassa seca do ponteiro mais as folhas (Tabela 3), as doses de vinhaça diferiram estatisticamente da AM, com isso, até D300 o desenvolvimento é abaixo da adubação mineral e em D600 e D1200 é acima (Figura 1F e 1G). Entre as doses de vinhaça há um aumento da biomassa com o aumento da dose, entretanto, entre D600 e D1200 esse acúmulo tende a cessar.

O acúmulo de biomassa na parte aérea indicou que unicamente nas doses D600 e D1200 é possível obter um desenvolvimento superior às plantas que receberam AM, enquanto que aplicando D300 se obtém semelhante, indicando que a nutrição da planta que recebe essa dose pode ser suficiente para ocasionar um acúmulo de biomassa equiparável a uma planta adubada com AM.

Mariano et al. (2016) observara que fertilizante organo-mineral contribui mais no acúmulo de biomassa do que fontes minerais de nutrientes. Ueno et al. (2014) também observaram que a vinhaça contribui na melhoria da produção de biomassa seca da parte aérea. Viglio et al. (2015), entretanto, não observaram efeito da vinhaça no acúmulo de biomassa na parte aérea da cana.

Os contrastes ortogonais realizados para avaliar o diâmetro do colmo (Tabela 3) apontaram que a vinhaça interferiu no desenvolvimento do parâmetro em relação adubação mineral, Figura 1H, mostrando que houve aumento do DC até D600. Até D300 DC apresentou-se inferior à adubação mineral, enquanto que D1200 apresenta média superior.

Comparando as médias de DC com as obtidas por Oliveira et al. (2016), vemos que a vinhaça, apesar de incrementar o DC conforme aumento da sua dose fornecida, permitiu que o DC da cana-de-açúcar se desenvolvesse menos do que nas condições do trabalho do autor citado.

Para análise do número de perfilho, altura de planta, número de folhas secas e número de folhas verdes foi aplicado o teste F para avaliar o efeito dos tratamentos e da interação tempo × tratamento. O resultado do teste, que se encontra na Tabela 4, mostra que apenas o número de perfilhos não foi significativo para a interação tempo × tratamento.

Tabela 4. Tratamento e interação tempo × tratamento no número de perfilho (NPI), altura de planta (AP), número de folhas secas (NFS) e número de folhas verdes (NFV).

	Valores de F			
	NPI	AP	NFS	NFV
Tratamento	6,29**	8,14**	1,79 ^{NS}	14,45**
Tratamento × tempo	1,68 ^{NS}	10,22**	4,59**	2,33**

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} não significativo a 5% de probabilidade

A vinhaça interferiu no perfilhamento da cana-de-açúcar (Tabela 3). A aplicação da vinhaça nas doses D300 (11,91 perfilhos), D600 (14,21 perfilhos) e D1200 (14,08 perfilhos) contribuíram para um perfilhamento superior à adubação mineral (10,17 perfilhos) (Figura 1I). Pode-se também afirmar que quanto maior a dose de vinhaça aplicada maior o perfilhamento da cana até D600. A média do NPI em D1200 não foi superior a D600.

A aplicação de doses próximas ou abaixo de D300 pode não proporcionar um perfilhamento superior à adubação mineral, como observado também por Barbosa et al. (2013). Quantidades de potássio fornecido abaixo do equivalente a D150 não alteram o perfilhamento da cana-de-açúcar (Flores et al., 2012), pois o perfilhamento é mais dependente de nitrogênio e fósforo (Jadoski et al., 2010), nutrientes que estão em baixa concentração na vinhaça, justificando assim o porquê das doses D600 e D1200 terem proporcionado um desenvolvimento superior à AM.

Para a variável altura de planta observa-se efeito dos tratamentos apenas a partir dos 120 dias. A AM não diferiu de D300 e D1200, enquanto que fazendo comparação entre as doses de vinhaça há interferência no desenvolvimento da AP (Tabela 5).

Tabela 5. Contrastes ortogonais da altura da planta aos 90, 120, 150, 180 e 210 dias após o plantio de acordo com a adubação mineral (AM) e as doses de vinhaça ($m^3 ha^{-1}$).

Contrastes	Valores de F				
	Tempo de Avaliação (dias após o plantio)				
	90	120	150	180	210
AM × Vinhaça (D150 a D1200)	0,70 ^{NS}	0,03 ^{NS}	0,01 ^{NS}	4,78*	0,75 ^{NS}
AM × D0	1,10 ^{NS}	5,45*	12,53**	32,20**	16,77**
AM × D300	2,30 ^{NS}	0,88 ^{NS}	1,08 ^{NS}	1,81 ^{NS}	0,01 ^{NS}
AM × D1200	0,07 ^{NS}	0,09 ^{NS}	0,06 ^{NS}	2,60 ^{NS}	0,68 ^{NS}
D0 × Vinhaça (D150 a D1200)	0,22 ^{NS}	14,04**	29,66**	32,21**	25,43**

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} Não significativo a 5% de probabilidade

A partir de 150 DAP, Figura 2A, as plantas que receberam D600 e D1200 tiveram desenvolvimento da altura inferior às que receberam as doses D0, D150 e D300, indicando que a vinhaça pode prejudicar o desenvolvimento deste parâmetro. Com isso, as doses mais baixas apresentaram média semelhante à AM.

Provavelmente o resíduo seja responsável por prejudicar o desenvolvimento da altura da cana-de-açúcar, pois Flores et al. (2012) aumentando o fornecimento de fontes minerais de K_2O observou que a cultura respondeu positivamente, ao mesmo tempo em que Crusciol et al. (2020) mostraram que fontes organo-minerais de K contribuíram no desenvolvimento da altura da cana planta. Maradiaga-Rodriguez et al. (2018), no entanto, mostraram que o aumento da dose de vinhaça fornecida contribuiu na diminuição da altura da cana-de-açúcar.

Com relação ao número de folhas secas, a adubação mineral diferiu das doses de vinhaça a partir dos 180 DAP. Entre as doses de vinhaça fica mais evidente aos 210

DAP que o aumento da quantidade do subproduto aplicada indicou maior ocorrência de folhas secas, tendendo a uma estabilização entre D600 e D1200 (Figura 2B).

Ao contrário do NFS, o NFV apresentou contrastes significativos a partir dos 90 DAP, indicando que a aplicação de vinhaça altera a emissão de folhas verdes em relação à AM no início do ciclo (Tabela 7). Até os 210 DAP o NFV da adubação mineral tende a ser semelhante a D300 e D1200.

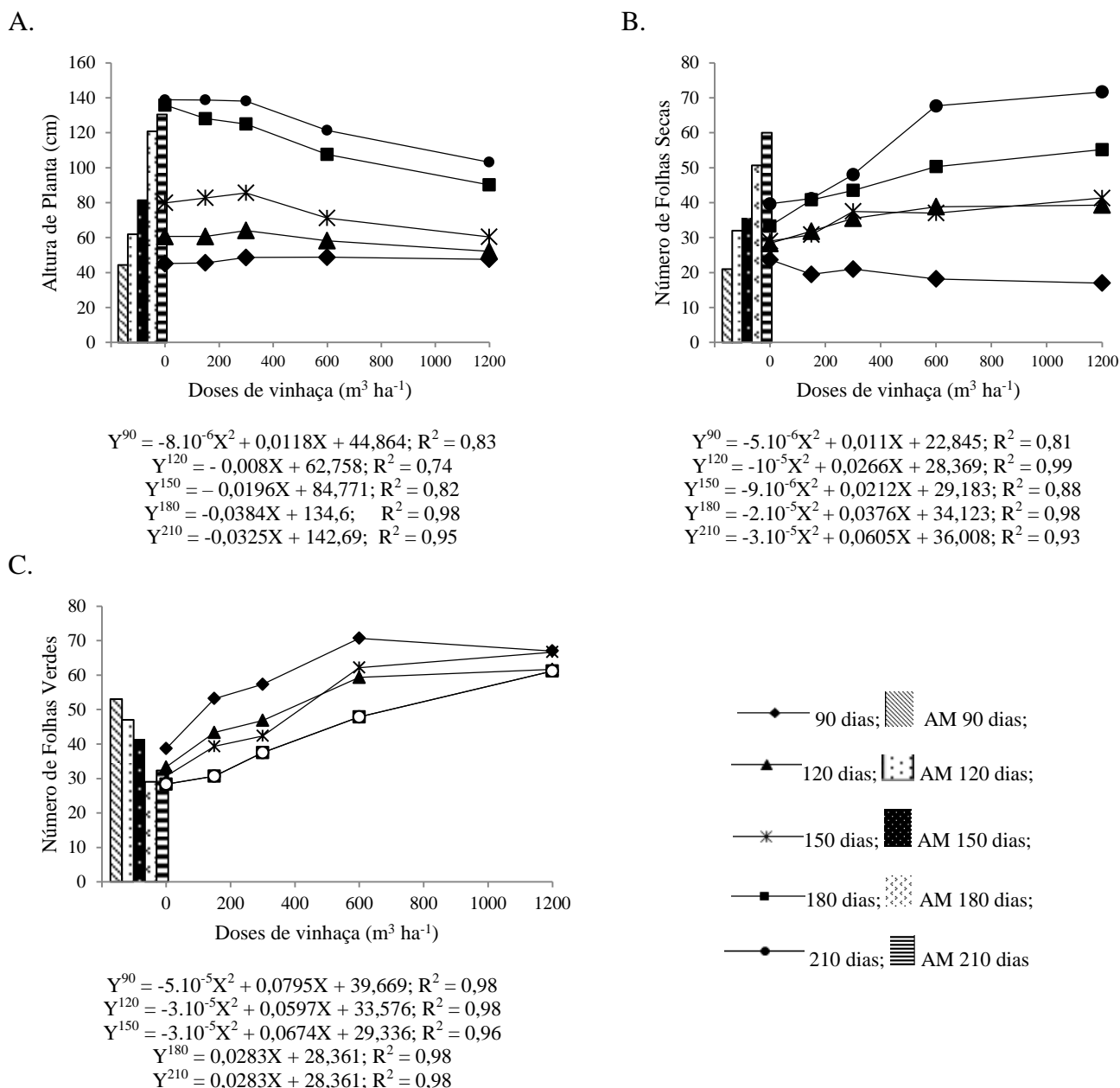


Figura 2. Altura de planta (A), número de folhas secas (B) e número de folhas verdes (C) avaliada em cinco épocas distintas do crescimento inicial da cana-de-açúcar: 90,

120, 150, 180 e 210 dias após o plantio, de acordo com as doses de vinhaça e a adubação mineral (AM).

A vinhaça proporciona aumento da produção de NFV de acordo com o acréscimo da dose aplicada (Figura 2C), entretanto, de modo geral, dos 90 até os 210 DAP a emissão de folhas pela cana-de-açúcar tende a diminuir, visto que a planta vai atingindo o final da fase vegetativa. Souza et al. (2018) observaram que uma dose de 200 m³ ha⁻¹ de vinhaça foi suficiente para incrementar a produção de folhas.

Tabela 6. Contrastes ortogonais do número de folhas secas aos 90, 120, 150, 180 e 210 dias após o plantio de acordo com a adubação mineral (AM) e as doses de vinhaça (m³ ha⁻¹).

Contrastes	Valores de F				
	Tempo de avaliação (dias após o plantio)				
	90	120	150	180	210
AM × Vinhaça (D150 a D1200)	3,01 ^{NS}	2,35 ^{NS}	2,79 ^{NS}	4,82*	4,60*
AM × D0	7,33*	5,68*	8,37**	10,48**	17,19**
AM × D300	1,17 ^{NS}	2,41 ^{NS}	3,98 ^{NS}	2,27 ^{NS}	1,17 ^{NS}
AM × D1200	0,88 ^{NS}	0,47 ^{NS}	1,83 ^{NS}	4,95*	5,20*
D0 × Vinhaça (D150 a D1200)	3,21 ^{NS}	2,46 ^{NS}	4,65*	3,92 ^{NS}	11,69**

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} não significativo a 5% de probabilidade

Tabela 7. Contrastes ortogonais do número de folhas verdes aos 90, 120, 150, 180 e 210 dias após o plantio de acordo com a adubação mineral e as doses de vinhaça (m³ ha⁻¹).

Contrastes	Valores de F				
	Tempo de avaliação (dias após o plantio)				
	90	120	150	180	210
AM × Vinhaça (D150 a D1200)	15,63**	7,70**	12,77**	6,12*	3,81 ^{NS}
AM × D0	24,48**	19,10**	52,27**	38,09**	41,40**
AM × D300	10,62**	4,34*	5,49*	3,51 ^{NS}	3,23 ^{NS}
AM × D1200	4,70*	3,33 ^{NS}	3,44 ^{NS}	0,28 ^{NS}	0,46 ^{NS}
D0 × Vinhaça (D150 a D1200)	4,99*	8,55**	38,27**	36,56**	50,91**

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} Não significativo a 5% de probabilidade

Na composição da vinhaça há uma concentração considerável de potássio, cálcio, magnésio, sódio e nitrogênio, que são nutrientes responsáveis por boa parte do crescimento vegetativo da cana-de-açúcar (Meyer, 2013). Em excesso, a oferta de nutrientes, como ocorre principalmente nas doses D600 e D1200, permite que a cultura aumente a produção de biomassa vegetal.

CONCLUSÃO

Durante a fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar, as doses 600 e 1200 m³ ha⁻¹ de vinhaça melhoraram o índice de perfilhamento, a biomassa fresca e seca da parte aérea e diâmetro da cana-de-açúcar. O mesmo não ocorreu com a altura de planta.

Doses elevadas de vinhaça permitiram desenvolvimento excessivo de biomassa na cana-de-açúcar durante o estágio vegetativo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, J. R.; Ranzani, G.; Valsecchi, O. (1950). La vinasse dans l'agriculture. Contribuição da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" ao Congresso Internacional de Industrias Agrícolas realizado em Bruxelas, Boletim da ESALQ, 12, 27-36.
- Barbosa, E. A. A.; Arruda, F. B.; Pires, R. C. M.; Silva, T. J. A.; Sakai, E. (2013). Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça via irrigação por gotejamento subsuperficial em três ciclos de cana-soca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17, 588-594.
- Barbosa, E. A. A.; Arruda, F. B.; Pires, R. C. M.; Silva, T. J. A.; Sakai, E. (2012). Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça e adubos minerais via irrigação por gotejamento subsuperficial: ciclo da cana-planta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16, 952-958.
- Carvalho, J. M.; Andreotti, M.; Buzetti, S.; Carvalho, M. P. (2013). Produtividade de cana soca sem queima em função do uso do gesso e vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 43, 1-9.
- Cavalcanti, J. F. A. (Coord.) (2008). *Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2ª aproximação*. Recife: IPA. 198p.
- Christofolletti, C. A.; Escher, J. P.; Correia, J. E.; Marinho, J. F. U.; Fontanetti, C. S. (2013). Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. *Waste Management*, 33, 2752-2761.
- CONAB. Acompanhamento de safra brasileira de cana-de-açúcar. v. 7 – Safra 2020/21, n. 1 – Primeiro levantamento, Brasília. 2020. 62p.
- Crusciol, C. A. C.; Campos, M.; Martello, J. M.; Alves, C. J.; Nascimento, C. A. C.; Pereira, J. C. R.; Cantarella, H. (2020). Organomineral fertilizer as source of P and K for sugarcane. *Scientific Reports*, 10:5398.

- Hermann, E. R.; Câmara, G. M. S. (1999). Um método simples para estimar a área foliar da cana-de-açúcar. STAB, 17, 32-34.
- Flores, R. A.; Prado, R. M.; Politi, L. S.; Almeida, T. B. F. (2012). Potássio no desenvolvimento inicial da soqueira de cana crua. Pesquisa Agropecuária Tropical, 42, 106-111.
- Fravet, P. R. F.; Soares, R. A. B.; Lana, R. M. Q.; Lana, A. M. Q.; Korndörfer, G. H. (2010). Efeito de doses de torta de filtro e modo de aplicação sobre a produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar. Ciência Agrotecnológica, 34, 618-624.
- Jadoski, C. J.; Toppa, E. V. B.; Julianetti, A.; Hulshof, T.; Ono, E. O.; Rodrigues, J. D. (2010). Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia, 3, 169-176.
- Maradiaga-Rodriguez, W. D.; Pêgo-Evangelista, A. W.; Alves Júnior, J.; Costa, R. B. (2018). Effects of vinasse and lithothamnium application on the initial growth of sugarcane (*Saccharum* sp. cv. RB 86-7515) irrigated and not irrigated. Acta Agronomica, 67, 252-257.
- Mariano, E.; Leite, J. M.; Vieira-Megda, M. X.; Ciampitti, I. A.; Vitti, A. C.; Faroni, C. E.; Franco, H. C. J.; Trivelin, P. C. O. (2016). Biomass and nutrient content by sugarcane as affected by fertilizer nitrogen sources. Crop Science, 56, 1234-1244.
- Marouni, L. F.; Magalhães, J. L.; Rodrigues, A. A.; Rodrigues, D. A.; Magalhães, P. A. N. R.; Campos, M. S.; Rodrigues, C. L.; Vital, R. G.; Cavalcante, T. J.; Silva, F. B.; Teles, E. M. G.; Guimarães Júnior, R. G. (2016). Growth of eucalyptus seedlings irrigated with different vinasse concentrations. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 10, 115-121.
- Meyer, J. H. (2013). Sugarcane nutrition and fertilization. In: Meyer, J. H.; Turner, P. E.; Rein, P.; Mathias, K. Good Management Practices for the Cane Industry. Edition 1, Ed. Bartens Germany. Cap. 5, 133 – 180.
- Oliveira, A. R.; Braga, M. B.; Santos, B. L. S.; Walker, A. M. (2016). Biometria de cultivares de cana-de-açúcar sob diferentes reposições hídricas no vale do submédio do São Francisco. Revista Energia na Agricultura, 31, 48-58.
- Palaretti, L. F.; Dalri, A. B.; Dantas, G. F.; Faria, R. T.; Santos, W. F.; Santos, M. G. (2015). Produtividade do manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) fertirrigado utilizando vinhaça concentrada. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, 9, 326-334.

- Pazuch, F. A.; Nogueira, C. E. C.; Souza, S. N. M.; Micuanski, V. C.; Friedrich, L.; Lenz, A. M. (2017). Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of Paraná, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 34-42.
- Pina, J. C.; Bono, J. A. M.; Oliveira, A. K. M.; Rufino, R. S.; Amorim, D. O. (2015). Organic residues on rooting and yield of sugarcane in Typic Quartzipsamments soil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19, 650-655.
- Prado, E. A. F.; Vitorino, A. C. T.; Mauad, M.; Ensinas, S. C.; Paim, L. R. (2017). Características tecnológicas da cana-de-açúcar sob aplicação de doses de vinhaça em Latossolo Vermelho distroférico. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 16, 386-395.
- SAS Institute. Statistical Analysis System. Procedure guide for personal computer. 2010.
- Silva, A. P. M.; Bono, J. A. M.; Pereira, F. A. R. (2014). Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: efeito no solo e na produtividade de colmos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 38-43.
- Silva, G. S. P. L.; Silva, F. C.; Alves, B. J. R.; Berton, R. S.; Marchiori, L. F. S.; Silveira, F. G. (2018). Efeitos da aplicação de vinhaça “in natura” ou concentrada associado ao N-fertilizante em soqueira de cana-de-açúcar e no ambiente. *Holos Environment*, 19, 1-21.
- Sousa, A. C. M.; Matura, E. E.; Elaiuy, M. L. C.; Santos, L. N. S.; Montes, C. R.; Pires, R. C. M. (2013). Root system distribution of sugarcane irrigated with domestic sewage effluent application by subsurface drip system. *Engenharia Agrícola*, 33, 647-657.
- Souza, M. D. B.; Fontanetti, A.; Lopes-Assad, M. L. R. C. (2018). Remineralizer, vinasse and cover crops on the biometric parameters and nutrition of common bean. *Científica*, 46, 82-94.
- Ueno, C. R. J.; Costa, A.C.S.; Gimenes, M. L.; Zanin, G. M. (2014). Agricultural recycling of biodigested vinasse for lettuce production. *Revista Ambiente e Água*, 9, 593-601.
- Viglio, L. M.; Varanda, L. L.; Soares, M. R.; Casagrande, J. C. (2015). Sugarcane initial growth with vinasse application in Latosol under gradual aluminum stress. *Geophysical Research Abstracts*, 17.

**CAPÍTULO 5: SALINIZAÇÃO E DISPOSIÇÃO DE MINERAIS EM
ARGISSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR E FERTIRRIGADO
COM VINHAÇA**

SALINIZAÇÃO E DISPOSIÇÃO DE MINERAIS EM ARGISSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR E FERTIRRIGADO COM VINHAÇA

RESUMO: A vinhaça é um resíduo líquido resultante do processamento do etanol, amplamente utilizado na cana-de-açúcar, mas quando aplicada em elevadas doses no solo pode ocasionar a salinidade, bem como a saturação de alguns elementos presentes na sua concentração. Deste modo objetivou-se avaliar o aumento da salinidade no solo e o efeito que a concentração de sais da vinhaça exerce em um Argissolo. O experimento foi desenvolvido em ambiente protegido; e os tratamentos constituídos de doses de vinhaça (0, 150, 300, 600 e 1200 m³ ha⁻¹) e mais uma, testemunha, com adubação mineral convencional. Os parâmetros avaliados foram as concentrações de K, Na, Ca, Mg, pH, matéria orgânica (MO), condutividade elétrica do extrato saturado (CE_{es}) e PST (porcentagem de sódio trocável) aos 90, 120, 150 e 210 dias. Na avaliação da distribuição dos nutrientes, foram utilizados dados avaliados aos 210 dias de cultivo nas camadas 0 – 20 e 20 – 40 cm. O pH do solo, ao longo do tempo, aumentou com o acréscimo da dose de vinhaça. A CE_{es}, PST, K e Na apresentaram resposta similares em relação às doses de vinhaça. Até 1200 m³ ha⁻¹, após 210 dias de cultivo da cana-de-açúcar, se observa aumento da concentração de sais no solo. Elevadas doses de vinhaça podem aumentar o teor de MO do solo e o pH, mas também pode provocar lixiviação do excesso de nutrientes para as camadas inferiores do solo. Houve interação do excesso de K e Na com a concentração de Ca no solo.

Palavras-chave: *saccharum*, salinidade, lixiviação, potássio, sódio.

SALINIZATION AND MINERAL DISPOSAL IN ULTISOL CULTIVATED WITH SUGARCANE AND FERTILIZED WITH STILLAGE

ABSTRACT: the stillage is a waste from the ethanol processing, when used in high doses can increase the soil salinity, also the concentration of a few elements presented in high concentration in stillage. Aimed evaluate the salt accumulation and the distribution in Ultisol cultivated with sugarcane and fertilized with stillage. The study was developed in a protected environment with six treatments, five stillage doses (0, 150, 300, 600 and 1200 m³ ha⁻¹) and mineral nutrition. The parameters analyzed were K, Na, Ca and Mg concentrations, Ph, organic matter (OM), electrical conductivity (EC) and percentage of exchangeable sodium (PES) at 90, 120, 150 and 210 days of

cultivating. Evaluating the nutrient distribution were used data analyzed at 210 days of cultivating in the layers 0 – 20 and 20 – 40 cm. The Ph increased, through the time, according to the stillage doses increase. The EC, PES, K and Na presented results similar to the stillage doses. The doses of up to 1200 m³ ha⁻¹, during 210 days of sugarcane cultivation, the salt soil concentrations increase. Higher stillage doses can increase the soil OM and Ph, but also it can leach excess nutrients. Occurred an interaction of the excess of K and Na with Ca concentration on soil.

Keywords: *saccharum*, salinization, leaching, potassium, sodium.

INTRODUÇÃO

A vinhaça é um resíduo oriundo do processamento do etanol com elevado potencial poluidor. É composta de 93% de água e 7% de sólidos totais, em que, dessa fração sólida, 75% corresponde à matéria orgânica e os outros 25% são compostos dos minerais: potássio, cálcio, magnésio, nitrogênio, fósforo, sulfato e outros; o Ph é de caráter ácido e a condutividade elétrica elevada (Pazuch et al., 2017). A concentração de cada elemento segue conforme a qualidade da cana-de-açúcar e demais produtos utilizados na produção do etanol.

Apesar da utilização da vinhaça no campo ser uma excelente opção no uso do resíduo, o monitoramento e estudo da dose aplicada são essenciais. A composição dos nutrientes na vinhaça pode gerar problemas na fertilidade do solo, principalmente na elevação da concentração de potássio, sódio e cálcio (Christofoletti et al., 2013; Ortegón et al., 2016), levando a um aumento da salinidade, que pode prejudicar o desenvolvimento e absorção de nutrientes por parte das plantas. Por isso seu uso deve ser controlado e a cultura irrigada deve ser tolerante às condições que o resíduo causa no solo.

A planta cultivada em um solo salino pode apresentar problemas na absorção de potássio, já que o sódio presente compete com o elemento nos sítios de troca, podendo reduzir a absorção do potássio em até 80% nas cultivares de cana-de-açúcar mais sensíveis (Ashraf et al., 2010). Além de problemas relacionados ao sódio, a salinidade pode causar também um desequilíbrio no balanço dos nutrientes e gerar um quadro de antagonismo entre potássio e cálcio na solução do solo (Malavolta, 2006).

Francisco et al. (2015) aplicando vinhaça continuamente ao longo de um cultivo, via irrigação por gotejamento, observaram que a vinhaça ocasionou um aumento na condutividade elétrica do solo e a diminuição do Ph conforme o aumento da quantidade

de resíduo aplicado. Silva et al. (2018) observaram que aplicando vinhaça houve aumento da condutividade elétrica e das concentrações de sódio, cálcio, magnésio e potássio no solo em função das doses aplicadas.

Com isso, objetivou-se avaliar o efeito que o aumento da concentração de sais no solo oriundo da aplicação de doses elevadas de vinhaça pode ocasionar nas propriedades de um Argissolo cultivado com cana-de-açúcar e a distribuição de nutrientes até 40 cm de profundidade.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE, campus de Recife – PE, em ambiente protegido (8° 01' 05" S e 34° 56' 48" O, altitude de 6,49 m).

O experimento foi desenvolvido em vasos de capacidade volumétrica de 100 L, cujo preenchimento constou de camada de 10 cm de brita número 0 na base, uma manta geotêxtil para drenagem e aproximadamente 77 L de Argissolo coletado na EECAC – UFRPE (Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina) em que as camadas 0 – 20 e 20 – 40 cm coletadas no campo foram replicadas, de modo a ter uma porosidade de 46,15% e uma densidade aparente próximo a 1,4 g cm⁻³. As características químicas do solo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Característica do Argissolo antes de receber aplicação de vinhaça.

Parâmetros	Resultado	
	0 – 20 cm	20 – 40 cm
Ph	5,80	5,60
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,75	1,25
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,75	0,75
Na (cmol _c dm ⁻³)	0,08	0,07
K (cmol _c dm ⁻³)	0,09	0,06
CTC (cmol _c dm ⁻³)	5,80	5,60
V* (%)	46,00	38,00
m** (%)	2,00	7,00

* Saturação por bases; ** Saturação por alumínio.

A vinhaça foi coletada na Usina Petribu – localizada na zona rural de Lagoa de Itaenga, na mata norte de Pernambuco – na tubulação de saída da destilaria para a lagoa de distribuição.

Utilizaram-se cinco doses de vinhaça: 0 (D0), 150 (D150), 300 (D300), 600 (D600) e 1200 (D1200) m³ há⁻¹ e adubação mineral (AM), com NPK 14-24-18, composto de

sulfato de amônio, super-simples e cloreto de potássio, a uma dosagem correspondendo a 500 kg há⁻¹, totalizando 30 parcelas experimentais.

A vinhaça foi aplicada 20 dias antes do plantio de forma manual. Após a semeadura, todas as parcelas experimentais foram irrigadas, também de forma manual, com água de abastecimento local, em dias alternados e com mesma quantidade, totalizando cerca de 160 L de água aplicados em cada vaso ao longo do período experimental. O manejo de irrigação foi realizado através da observação de drenagem no fundo do vaso direcionada para um coletor. A água de abastecimento e a vinhaça continham as características descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Característica físico-química da água de abastecimento e da vinhaça utilizadas na irrigação das parcelas experimentais.

Parâmetro	Água de abastecimento	Vinhaça
Ph	6,30	4,200
Condutividade Elétrica (Ms/cm)	0,13	15,06
Cálcio (mg L ⁻¹)	0,90	888,30
Magnésio (mg L ⁻¹)	0,60	395,30
Sódio (mg L ⁻¹)	5,10	729,10
Potássio (mg L ⁻¹)	2,50	1053,00
Nitrogênio total (mg L ⁻¹)	-	51,80
Fosfato total (mg L ⁻¹)	-	6,780
Carbono (mg L ⁻¹)	-	1.032,50
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	-	22.368,00
(DBO) (mg L ⁻¹)	-	12.300,00
DQO (mg L ⁻¹)	-	27.250,00

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; DQO – Demanda Química de Oxigênio

A Tabela 3 apresenta as doses de potássio, cálcio, magnésio e sódio aplicados através de cada dose de vinhaça em termos equivalentes à adubação mineral, extrapolados para kg há⁻¹.

Tabela 3. Quantidade de potássio (K₂O), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na) aplicados em cada dose de vinhaça equivalentes a kg ha⁻¹ de adubo mineral.

Dose (m ³ ha ⁻¹)	K ₂ O	Ca	Mg	Na
	------(kg ha ⁻¹)-----			
150	189	133,24	59,29	109,36
300	378	266,49	118,59	218,73
600	756	532,98	237,18	437,46
1200	1512	1065,96	474,36	874,92

Foram avaliados: condutividade elétrica do extrato saturado do solo (CE_{es}), pH, porcentagem de sódio trocável (PST), concentração de sódio (Na), potássio (K), cálcio

(Ca) e de magnésio (Mg) no período de 90, 120, 150 e 210 dias após o plantio (DAP). A PST foi calculada conforme Ayers e Westcot (1985), a concentração dos elementos foi determinada conforme Silva (2009).

Foi feito coleta de solo em duas profundidades, de 0 – 20 cm e 20 – 40 cm aos 210 dias de cultivo da cana-de-açúcar para avaliar: pH, distribuição de potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca), magnésio (Mg), capacidade de troca catiônica (CTC), matéria orgânica (MO), porcentagem de saturação por sódio (PST) e condutividade elétrica do extrato saturado (CE_{es}).

O tipo de delineamento adotado foi o inteiramente casualizado (DIC). Os dados foram submetidos à análise de variância utilizando o PROC GLM do pacote estatístico SAS (SAS Institute, 2010). Através do teste de Mauchly, as variáveis avaliadas aos 90, 120, 150 e 210 DAP foram analisadas utilizando o tempo em arranjo de parcelas subdivididas; e para o efeito de cada variável entre os tratamentos, foi realizada análise de contrastes ortogonais e análise de regressão.

A análise de contrastes ortogonais foi realizada com a finalidade de comparar a adubação mineral com os tratamentos que receberam vinhaça (AM × vinhaça (D150 a D1200)); adubação mineral com a não aplicação de vinhaça (AM × D0); adubação mineral com a dose $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (AM × D300); adubação mineral com a dose $1200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (AM × D1200); e a não aplicação de vinhaça com a aplicação (0 × vinhaça (D150 a D1200)). Para realizar a análise de regressão entre as médias, foram elaboradas equações que melhor se ajustavam ao comportamento dos dados. A adubação mineral não foi utilizada nos ajustes das equações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação dos parâmetros salinos no solo ao longo de 210 dias

O Na, PST, CE_{es} e K foram significativos na interação do tratamento × tempo, Tabela 4. Com isso, a análise desses parâmetros será realizada em cada período separadamente (90, 120, 150 e 210 dias).

O teor de sódio no solo influenciado pelas doses de vinhaça somente diferiu da AM aos 90 e 150 dias (Tabela 5), as doses acima de D150 apresentaram média superior (Figura 1A). Entretanto, comparando as doses de vinhaça entre si, aos 150 e 210 DAP há tendência de aumento da concentração de sódio a partir da D300. Os teores estão acima dos limites de solos sem problema de sais estabelecidos por Malavolta (2006)

Tabela 4. Efeito dos tratamentos e da sua interação com o tempo no sódio (Na), porcentagem de sódio trocável (PST), condutividade elétrica do extrato saturado (CEes), potássio (K), pH, cálcio (Ca) e magnésio (Mg).

	Valor de F						
	Na	PST	CEes	K	pH	Ca	Mg
Tratamentos	17,92**	17,99**	8,66**	24,89**	8,72**	5,05**	3,59*
Tratamentos × Tempo	2,40**	4,00**	2,97**	2,16*	1,70 ^{NS}	1,43 ^{NS}	0,85 ^{NS}

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS}Não significativo a 5% de probabilidade

Tabela 5. Contrastes ortogonais no sódio e do potássio aos 90, 120, 150 e 210 dias após o plantio da cana-de-açúcar de acordo com a adubação mineral (AM) e as doses de vinhaça ($m^3 ha^{-1}$).

Contrastes	Valor de F							
	-----Sódio-----				-----Potássio-----			
	90	120	150	210	90	120	150	210
AM × Vinhaça (D150 a D1200)	3,60 ^{NS}	0,33 ^{NS}	6,02*	1,59 ^{NS}	24,50**	7,19*	14,57**	3,07 ^{NS}
AM × D0	8,70**	0,02 ^{NS}	25,37**	9,40**	51,24**	10,24**	53,32**	12,87**
AM × D300	7,18*	0,86 ^{NS}	3,66 ^{NS}	0,66 ^{NS}	20,25**	10,84**	21,06**	3,12 ^{NS}
AM × D1200	0,15 ^{NS}	0,18 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,01 ^{NS}	11,33**	0,12 ^{NS}	0,12 ^{NS}	0,00 ^{NS}
D0 × Vinhaça (D150 a D1200)	3,76 ^{NS}	0,29 ^{NS}	19,01**	8,77**	18,08**	1,63 ^{NS}	35,68**	9,60**

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS}Não significativo a 5% de probabilidade

Com isso, demonstra-se a importância da análise da vinhaça e da dose a ser aplicada, pois casos como este e de outros autores, como Madejón et al. (2001) e Silva et al. (2018), a vinhaça aumenta a concentração sódio no solo. Entretanto, em outros casos, como estudado por Tejada et al. (2008), não houve esse acréscimo de Na. Manyari e Flores (2017) mostraram que em solos que já possuam elevada concentração de sódio, a vinhaça contribui com a redução da sua concentração, além de também reduzir a condutividade elétrica e os teores de cálcio.

O que também pode ser observado na Figura 1A são as concentrações semelhantes de Na em D600 e D1200, indicando uma possível saturação de íons Na^+ no solo de D1200, mobilizando o excesso para demais camadas do vaso.

O potássio, por ser um nutriente presente na vinhaça em quantidade maior do que o sódio, cálcio e magnésio (Tabela 1), apresentou diferença significativa entre os tratamentos a partir dos 90 DAP (Tabela 5), implicando que a vinhaça contribuiu na concentração de K no solo a partir da primeira observação. Aos 90 DAP também é

quando há maior disponibilidade de K no solo (Figura 1B), entretanto, após esse período, a concentração de K tende a reduzir.

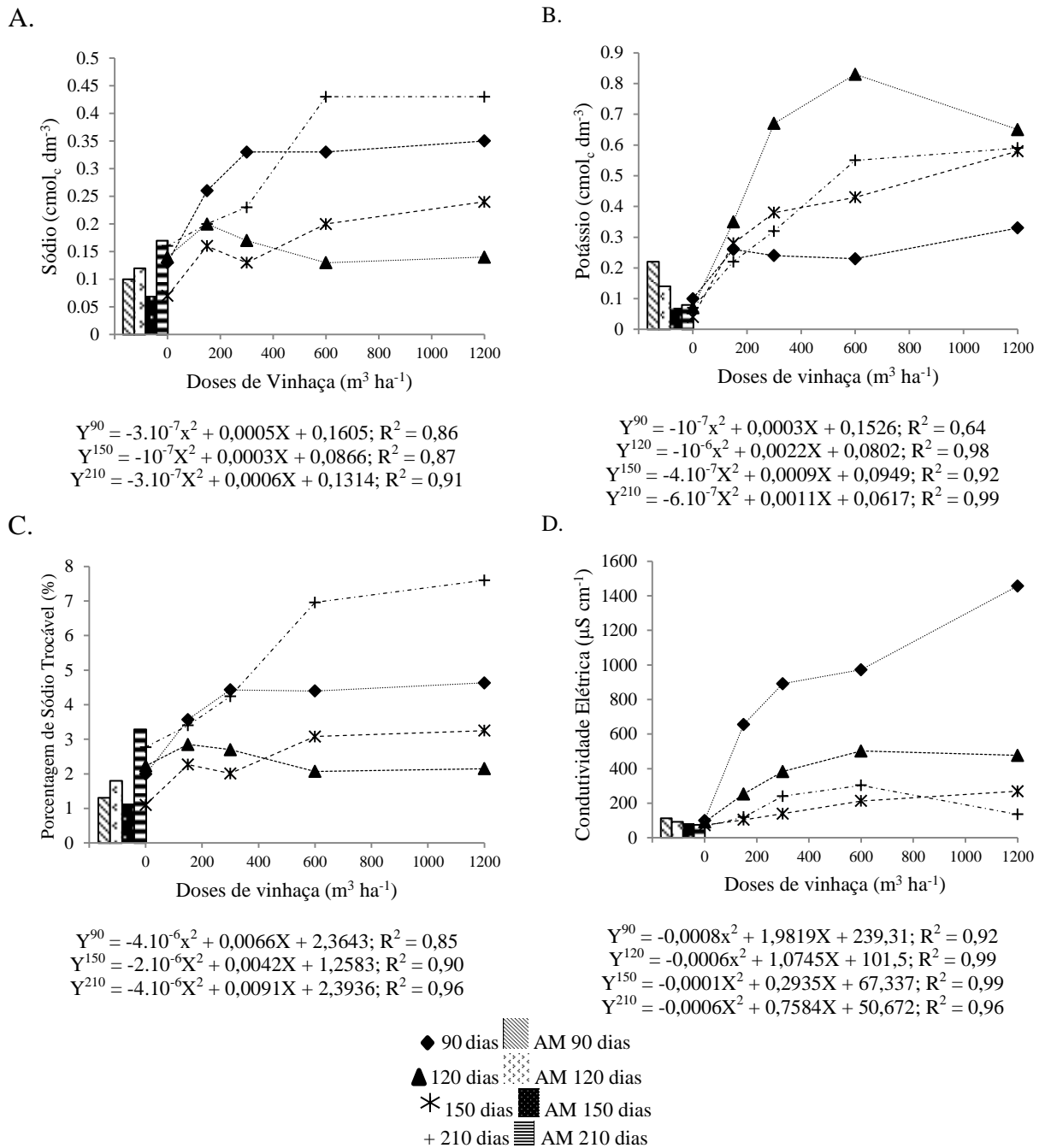


Figura 1. Variação do sódio (A), potássio (B), PST (C) e CEEs (D) ao longo de quatro períodos de tempo em relação às doses de vinhaça e adubação mineral (AM).

A concentração de K entre as doses de vinhaça tende a aumentar até D600 (Figura 1B). D1200 tende a ser semelhante a D600, se tornando estatisticamente igual à AM após 120 DAP. No solo das parcelas de D1200 pode ter ocorrido saturação dos íons K⁺,

drenando o excesso de mineral para a camada mais profunda do vaso devido à sua mobilidade, assemelhando assim à concentração de D600, assim como também ocorreu com o Na. Além da elevada quantidade de íons K^+ , a concentração de cálcio e sódio também favorecera à sua lixiviação (Jalali e Merrikhpour, 2008).

Na análise do PST há um comportamento semelhante ao apresentado pelo sódio, implicando que a vinhaça contribuiu não somente com o aumento da concentração de sódio, como também na adsorção desse mineral e na sua taxa de saturação na solução do solo, visto que os teores de cálcio e magnésio são baixos.

Observa-se na PST aos 150 DAP que houve diferença significativa entre AM e a aplicação de vinhaça (Tabela 6), indicando que doses acima de D150 é suficiente para elevar o PST a uma média acima da AM (Figura 1C). Entre as doses de vinhaça, o efeito é significativo aos 150 e 210 DAP, em que se observa aumento do PST até D600. O PST aumentou no solo tanto em relação às doses de vinhaça (acima de D300), quanto em relação ao tempo (após 150 DAP).

Tejada et al. (2008) afirmam que a vinhaça oriunda da fermentação do sulco da beterraba também contribui para elevação da quantidade de sódio trocável no solo, indicando que talvez esse seja um fator inerente ao tipo de resíduo.

Tabela 6. Contrastes ortogonais realizados na porcentagem de sódio trocável (PST) e condutividade elétrica (CE_{es}) aos 90, 120, 150 e 210 dias após o início do cultivo da cana-de-açúcar, de acordo com a adubação mineral (AM) e doses de vinhaça ($m^3 ha^{-1}$).

Contrastes	Valor de F							
	PST				CE _{es}			
	90	120	150	210	90	120	150	210
AM × Vinhaça (D150 a D1200)	3,39 ^{NS}	0,07 ^{NS}	5,93 [*]	3,51 ^{NS}	3,71 ^{NS}	2,58 ^{NS}	1,01 ^{NS}	1,33 ^{NS}
AM × D0	8,79 ^{**}	0,03 ^{NS}	20,14 ^{**}	21,85 ^{**}	16,90 ^{**}	6,31 [*]	8,03 ^{**}	0,35 ^{NS}
AM × D300	7,49 [*]	0,81 ^{NS}	3,65 ^{NS}	2,00 ^{NS}	5,75 [*]	3,63 ^{NS}	0,91 ^{NS}	2,23 ^{NS}
AM × D1200	0,43 ^{NS}	0,52 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,19 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,00 ^{NS}	0,01 ^{NS}	0,00 ^{NS}
D0 × Vinhaça (D150 a D1200)	4,16 ^{NS}	0,37 ^{NS}	12,61 ^{**}	20,98 ^{**}	13,38 ^{**}	2,77 ^{NS}	8,71 ^{**}	0,41 ^{NS}

^{*}Significativo a 5% de probabilidade; ^{**}Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS}Não significativo a 5% de probabilidade

Aos 90, 120 e 150 DAP a diferença da CE_{es} entre as médias da AM e a D0 foi significativa (Tabela 6), indicando que a alteração desse parâmetro foi em decorrência dos tratamentos utilizados. Aos 90 DAP, quando a concentração de sais no solo foi mais elevada, a AM diferiu apenas da D300, sendo a vinhaça responsável pelo aumento da

CE_{es} (Figura 1D). Com a diminuição da concentração de sais, a tendência foi a igualdade estatística entre os tratamentos.

Analisando o efeito das doses de vinhaça na CE_{es}, Figura 1D, há tendência de aumento conforme a dose aplicada. Francisco et al. (2016) também observaram que a condutividade elétrica do solo aumentou conforme o volume de vinhaça aplicado.

Entretanto, a diminuição da concentração de sais no solo ao longo do tempo também diminui a CE_{es} na intensidade de cada dose. Concordando, Madejón et al. (2001) mostraram que a CE do solo foi elevada após adição de vinhaça nas primeiras observações, e ao longo do tempo foi sendo reduzida.

Aplicar vinhaça no solo altera o pH quando comparado com AM, porém, somente para a dose D1200 (Tabela 7). A variação do pH entre as doses de vinhaça ocorreu na ordem de 0,2 pontos entre D0 e D300, apresentando um platô em seguida (Figura 2A). Valsechi e Gomes (1954) apontaram que o pH do solo aumenta com a aplicação de vinhaça, porém tende a se estabilizar com doses mais elevadas do resíduo. Silva et al. (2014) também observaram que aplicando vinhaça a uma dose de até 800 m³ ha⁻¹ contribui com o aumento de pH.

Tabela 7. Contrastes ortogonais realizados no pH, cálcio e magnésio de acordo com a adubação mineral (AM) e as doses de vinhaça (m³ ha⁻¹).

Contrastes	pH	Valor de F	
		Cálcio	Magnésio
AM × Vinhaça (D150 a D1200)	0,19 ^{NS}	8,32 ^{**}	0,02 ^{NS}
AM × D0	3,07 ^{NS}	16,84 ^{**}	0,00 ^{NS}
AM × D300	3,07 ^{NS}	9,98 ^{**}	0,33 ^{NS}
AM × D1200	7,09 ^{**}	0,03 ^{NS}	3,08 ^{NS}
D0 × Vinhaça (D150 a D1200)	4,27 [*]	5,65 [*]	0,09 ^{NS}

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS}Não significativo a 5% de probabilidade

Com a variação de pH próximo da neutralidade, o caráter ácido da vinhaça não contribuiu para acidificação do solo ao longo do período avaliado, pois, segundo Silva et al. (2007), quando incorporada, os fungos iniciam as atividades de degradação da matéria orgânica, transformando-a em húmus e neutralizando a acidez, permitindo que a partir disso as bactérias também passem a se desenvolver no meio.

Jiang et al. (2012) concordam que a vinhaça não acidificou o solo ao longo de dois anos de cultivo da cana-de-açúcar. Francisco et al. (2016) observaram aumento do pH

do solo em decorrência da aplicação da vinhaça, concordando com o comportamento das médias apresentadas na Figura 2A.

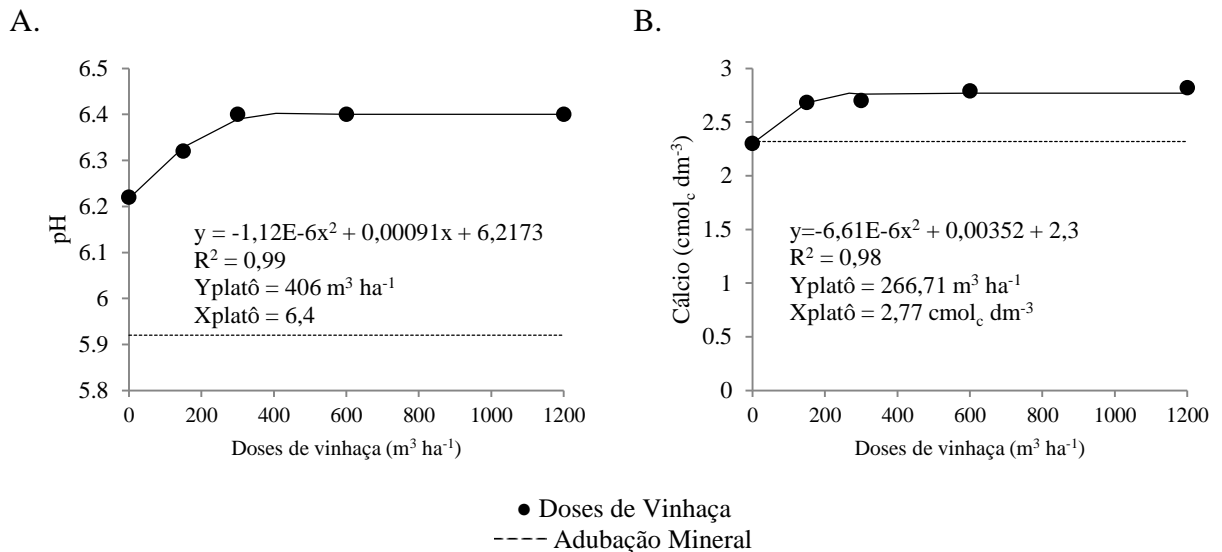


Figura 2. Média do pH (A) e cálcio (B) de acordo com os tratamentos aplicados ao longo de 210 dias.

A aplicação do resíduo aumenta a concentração de Ca no solo em relação à AM (Tabela 7). A vinhaça contribuiu no aumento da concentração de Ca até D150, havendo um platô após, indicando que acima de $267 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, a concentração de Ca no solo tende a um valor de $2,77 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, com uma concentração inicial de $1,75 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Apesar da concentração de Ca na vinhaça ser superior ao do Na e inferior ao K (Tabela 1), a sua concentração não respondeu às doses de vinhaça como nos outros dois nutrientes devido ao antagonismo existente com os cátions monovalentes predominantes (Malavolta, 2006). Para Ribeiro et al. (2016), a presença de considerável quantidade de Na pode precipitar o Ca e Mg deslocando-os por ação de massa.

Para o magnésio não se observou diferença significativa entre os contrastes analisados (Tabela 7), pois a quantidade de magnésio na vinhaça era menor do que a dos minerais K, Na e Ca (Tabela 1).

De acordo com a classificação de Ayers e Westcot (1985) e com os parâmetros de solo iniciais, a utilização de até $1200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça não alterou sua classificação para solo salino ao longo de 210 dias de avaliação.

Disposição de nutrientes nas camadas 0 – 20 e 20 – 40 cm no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar

Ao final da fase de desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar, aos 210 dias após o plantio, avaliou-se a disposição dos nutrientes nas camadas 0 – 20 e 20 – 40 cm do solo. De acordo com a Anova na Tabela 8, o magnésio, a matéria orgânica e PST foram significativos na interação do tratamento com a profundidade.

Tabela 8. Efeito dos tratamentos e da interação tratamento × profundidade no pH, potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca), magnésio (Mg), capacidade de troca catiônica (CTC), matéria orgânica (MO), porcentagem de sódio trocável (PST) e condutividade elétrica do extrato saturado (CEes).

	Valores de F								
	pH	K	Na	Ca	Mg	CTC	MO	PST	CEes
Tratamentos	2,62*	10,74**	9,52**	3,12*	2,79*	2,79*	7,13**	4,76**	3,61**
Profundidade	41,37**	3,08 ^{NS}	4,75*	13,86**	1,29 ^{NS}	9,08**	15,75**	6,41*	4,69*
Tratamentos × Profundidade	0,97 ^{NS}	0,46 ^{NS}	0,53 ^{NS}	2,22 ^{NS}	5,78**	1,05 ^{NS}	3,52**	5,26**	1,87 ^{NS}

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} Não significativo a 5% de probabilidade

Não houve diferença significativa entre a aplicação de vinhaça e a adubação mineral no magnésio sobre os contrastes realizados (Tabela 9), pois além de estar em menor concentração na vinhaça em comparação com K, Na e Ca, também tem menor interação com a fase líquida e sólida do solo (Cabral Filho et al., 2018).

Tabela 9. Avaliação de contrastes no magnésio e matéria orgânica em função das profundidades 0 – 20 cm e 20 – 40 cm, de acordo com a adubação mineral (AM) e as doses de vinhaça (m³ ha⁻¹).

Contrastes	Magnésio		Matéria Orgânica	
	0 - 20	20 - 40	0 - 20	20 - 40
AM × Vinhaça (D150 a D1200)	0,15 ^{NS}	0,75 ^{NS}	196,68**	376,25**
AM × D0	0,24 ^{NS}	0,01 ^{NS}	6,37*	2,41 ^{NS}
AM × D300	0,37 ^{NS}	1,79 ^{NS}	281,17**	504,08**
AM × D1200	0,54 ^{NS}	0,22 ^{NS}	0,00 ^{NS}	2,81 ^{NS}
D0 × Vinhaça (D150 a D1200)	0,05 ^{NS}	1,65 ^{NS}	503,19**	789,26**

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} Não significativo a 5% de probabilidade.

O aporte orgânico do solo provindo da vinhaça, aos 210 dias de cultivo, apresentou diferença em relação à adubação mineral, principalmente para D300 (Tabela 9). O teor de matéria orgânica também diferiu entre as doses aplicadas.

O teor de MO na camada 0 – 20 cm foi ligeiramente superior a 20 – 40 cm. As médias de D300, D600 e D1200 tendem a ser semelhantes, representando uma estabilidade no teor de MO apesar do aumento no fornecimento da vinhaça (Figura 3B). Barros et al. (2010) também observaram que a camada superior do solo reteve a maior quantidade de matéria orgânica.

Em relação a utilização de outros resíduos, Campiteli et al. (2018) observaram que a vinhaça foi responsável pelo maior aporte orgânico no solo quando comparado com outros efluentes utilizados.

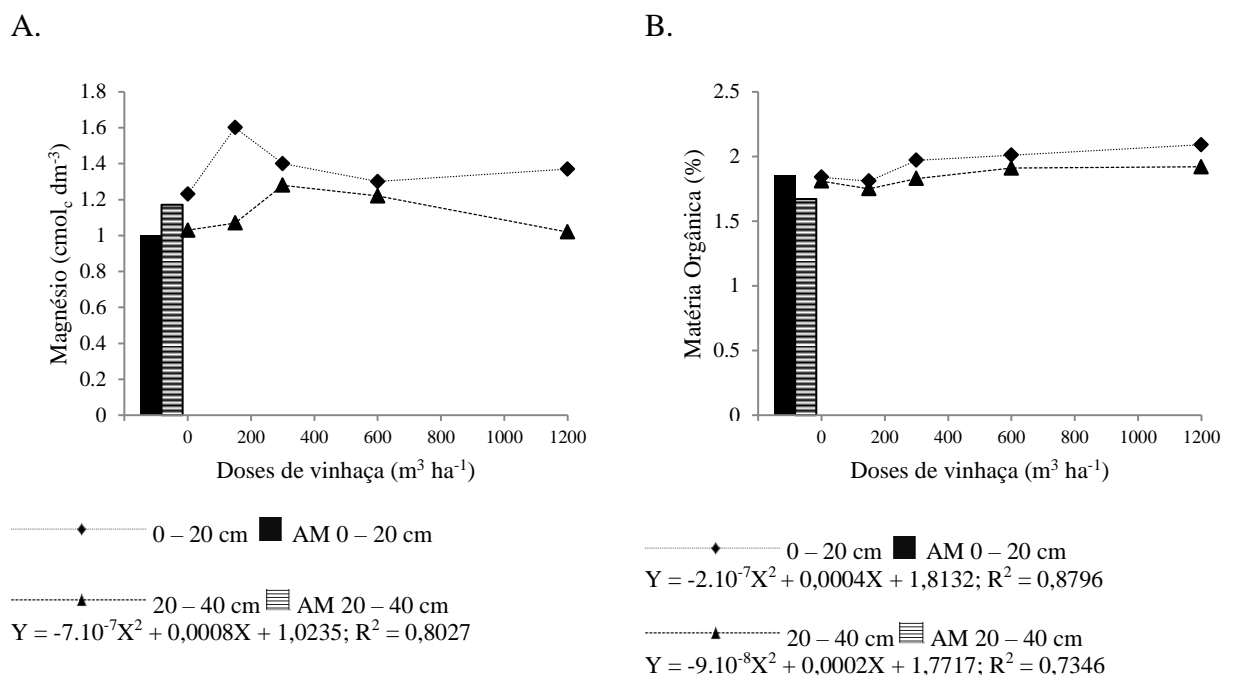


Figura 3. Efeito das médias de magnésio (A) e matéria orgânica (B) de acordo com as doses de vinhaça e a adubação mineral (AM) e as profundidades 0 – 20 e 20 – 40 cm.

Na PST a vinhaça não diferiu da adubação mineral, entretanto, houve diferença entre as doses aplicadas, Tabela 10, com aumento do PST significativo em D600 e D1200 principalmente (Figura 4). Como o solo utilizado no estudo não apresentava elevada concentração de sódio previamente, a quantidade incorporada através da vinhaça foi suficiente para aumentar a concentração desse elemento e dos parâmetros sobre ele (Figura 4).

A PST indicou maior atividade do sódio na camada 0 – 20 cm, onde houve maior concentração do cátion, Figura 4.

Tabela 10. Avaliação de contrastes para PST nas profundidades de 0 – 20 e 20 – 40 cm de acordo com a adubação mineral e as doses de vinhaça ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

Contrastes	Valor de F	
	PST	
	0 - 20	20 - 40
AM × Vinhaça (D150 a D1200)	3,52 ^{NS}	4,22 ^{NS}
AM × D0	21,86 ^{**}	15,14 ^{**}
AM × D300	2,01 ^{NS}	2,20 ^{NS}
AM × D1200	0,19 ^{NS}	0,45 ^{NS}
D0 × Vinhaça (D150 a D1200)	20,96 ^{**}	9,96 ^{**}

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS}Não significativo a 5% de probabilidade

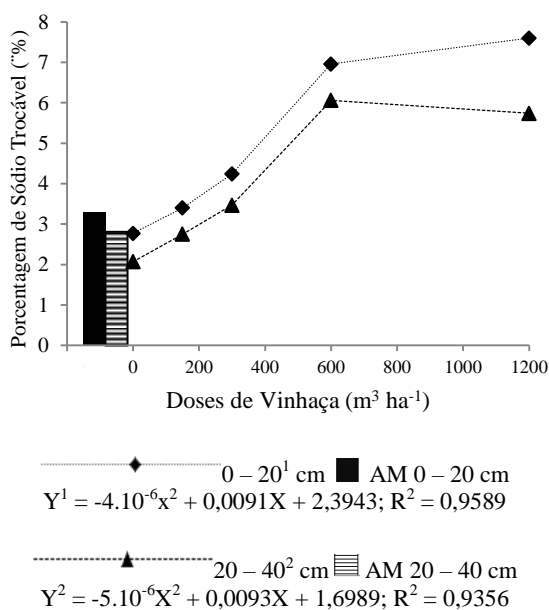


Figura 4. Avaliação do PST nas profundidades de 0 – 20 e 20 – 40 cm em relação às doses de vinhaça e adubação mineral (AM).

As doses de vinhaça aplicada, até 210 dias de observação, não foram suficientes para alterar o pH do solo em relação ao efeito da AM (Tabela 11). Entretanto, analisando o efeito somente do resíduo, registrou-se que o aumento da dose adicionada ao solo ocasionou um aumento proporcional do pH (Figura 5A).

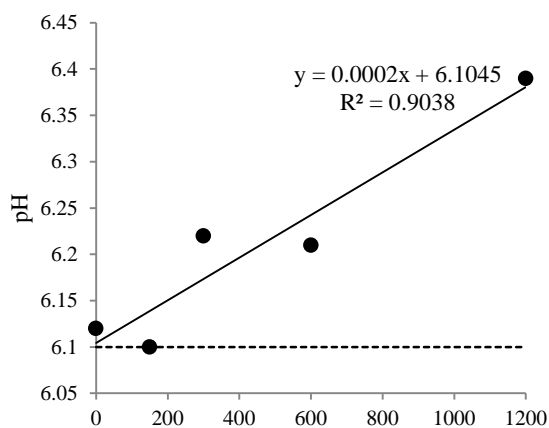
Silva et al. (2014) aplicando doses de vinhaça de até $800 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$ concordam que há relação proporcional do aumento do pH do solo com o aumento da dose aplicada. Entretanto, sob doses baixas, como $150 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$, Barros et al. (2010) observaram que não há alteração significativa do pH do solo, como pode ser visto na Figura 5A.

Tabela 11. Contrastes do pH, potássio, sódio, cálcio, capacidade de troca catiônica (CTC) e condutividade elétrica do extrato saturado (CEes) de acordo com a adubação mineral (AM) e as doses de vinhaça ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

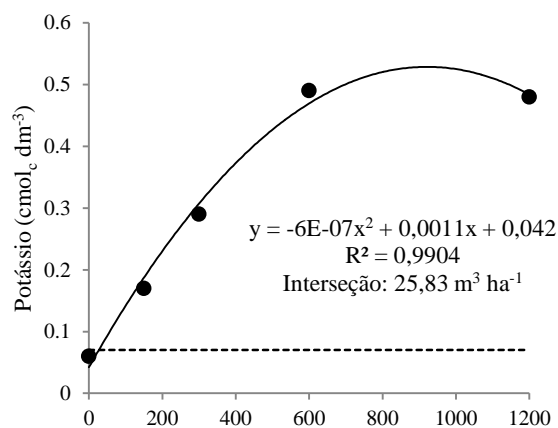
Contrastes	Valores de F					
	pH	Potássio	Sódio	Cálcio	CTC	CEes
AM \times Vinhaça (D150 a D1200)	0,32 ^{NS}	6,60*	3,95 ^{NS}	0,02 ^{NS}	0,07 ^{NS}	3,61**
AM \times D0	4,14*	22,94**	14,93**	1,42 ^{NS}	1,50 ^{NS}	4,69*
AM \times D300	0,64 ^{NS}	6,98*	1,93 ^{NS}	0,14 ^{NS}	0,04 ^{NS}	1,68 ^{NS}
AM \times D1200	0,01 ^{NS}	0,02 ^{NS}	0,13 ^{NS}	1,70 ^{NS}	1,00 ^{NS}	0,01 ^{NS}
D0 \times Vinhaça (D150 a D1200)	5,43*	14,69**	10,26**	2,60 ^{NS}	2,28 ^{NS}	1,87 ^{NS}

*Significativo a 5% de probabilidade; **Significativo a 1% de probabilidade; ^{NS} Não significativo a 5% de probabilidade

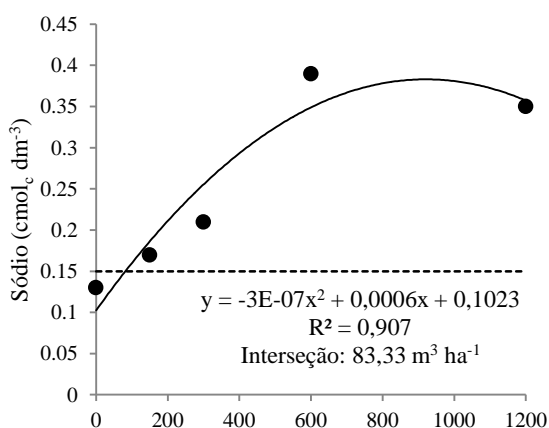
A.



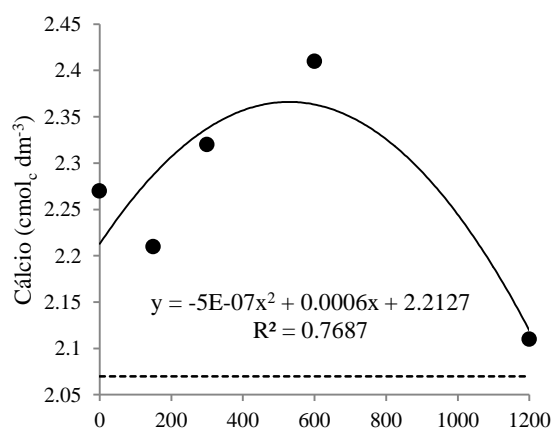
B.



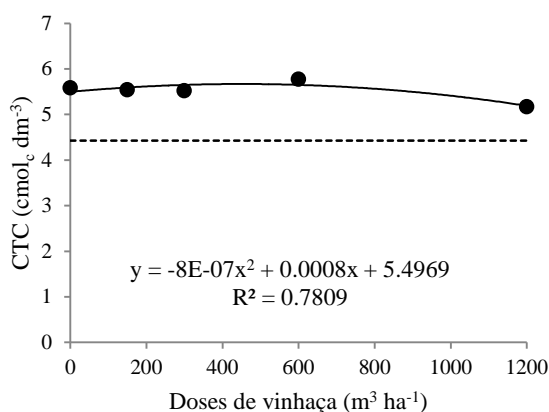
C.



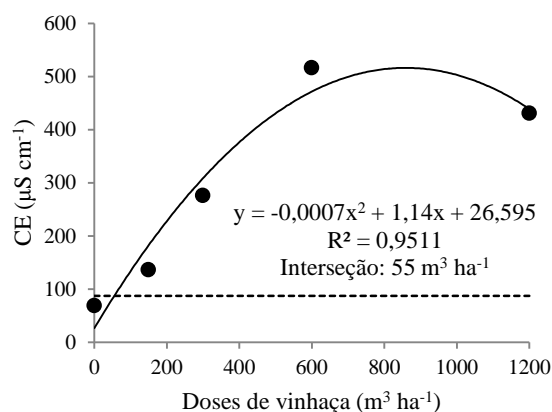
D.



E.



F.



-----AM ● Médias da regressão

Figura 5. Efeito da vinhaça e da adubação mineral (AM) sobre o pH (A), potássio (B), sódio (C), cálcio (D), capacidade de troca catiônica – CTC (E) e condutividade elétrica (F) aos 210 dias em relação a profundidade do solo avaliada.

A relação do pH com a aplicação de vinhaça se dá em decorrência da quantidade de matéria orgânica e da concentração de carbonatos presentes nos resíduos orgânicos, e dos cátions minerais não ácidos, tais como K, Na, Ca e Mg (Brady e Weil, 2013; McGrath et al., 2014).

Devido à elevada concentração de K na vinhaça utilizada, o fornecimento de doses até D600 permitiram um aumento na concentração de K em relação à AM, ao mesmo tempo em que D1200 apresentou concentração reduzida (Tabela 11; Figura 5B). A redução da concentração de K em D1200 indica que nos primeiros 40 cm pode ter havido saturação de K, ocorrendo lixiviação do excesso para as demais camadas presentes no vaso.

Nascimento et al. (2017) aplicando doses de até 300 m³ ha⁻¹ observaram aumento da concentração de potássio, principalmente na camada mais superficial do solo. Su et al. (2012), aplicando doses menores de 1200 m³ ha⁻¹, não observaram diminuição da concentração de K no solo com o aumento da dose de vinhaça.

A alteração da concentração de Na não diferiu, aos 210 DAP, quanto à aplicação de vinhaça e a adubação mineral (Tabela 11), isto é, a vinhaça contribui no aumento do sódio no solo, porém isso não ocorre a uma concentração superior da AM.

A concentração de sódio correspondente às doses D600 e D1200, assim como o potássio, também indicou um nível de saturação na solução do solo, permitindo que não houvesse diferença significativa entre as camadas de solo analisadas (Figura 5C). Brito

et al. (2009) observaram que as maiores concentrações de sódio foram encontradas nas camadas inferiores do solo devido à competição deste elemento com o potássio pelos sítios de troca, o que ocasiona sua lixiviação da camada superficial.

A concentração de cálcio presente no solo aos 210 DAP não permitiu uma diferença estatística entre as doses de vinhaça e adubação mineral (Tabela 11), possivelmente devido à interação antagônica com K^+ e Na^+ , pois os íons Ca^{2+} se precipitam e deslocam para as camadas inferiores (Ribeiro et al., 2016). Nascimento et al. (2017) encontraram restrição da concentração de Ca no solo a partir de $300\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ de vinhaça. A máxima concentração de Ca no solo ocorreu na dose D1200 com o teor de $2,21\text{ cmol}_c\text{ dm}^{-3}$ (Figura 5D).

Apesar da elevada carga orgânica que a vinhaça possui, as doses aplicadas e o tempo de observação não foram suficientes para alterar a CTC do solo (Tabela 11).

A vinhaça altera a CE_{es} do solo em relação à adubação mineral (Tabela 11) devido ao aporte salino que o resíduo possui. A partir de D300 a CE_{es} apresentou uma média superior à AM (Figura 5F), havendo aumento até D600. Devido à redução que o K, Na e Ca apresentaram na dose 1200, a CE_{es} , consequentemente, não apresentou o aumento proporcional.

Portocarrero et al. (2018) também observaram aumento da condutividade elétrica no solo com o uso da vinhaça, porém não foi suficiente para prejudicar o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Os autores observaram que a maior média de condutividade elétrica se manteve na camada de até 30 cm de profundidade.

CONCLUSÕES

O uso da vinhaça em doses de 600 e $1200\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ durante 210 dias no cultivo da cana-de-açúcar aumenta a salinidade do solo em níveis semelhantes.

O teor de nutrientes no solo que recebeu $300\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$ de vinhaça apresenta atributos químicos semelhantes a um solo que recebeu adubação mineral.

A predominância do potássio e sódio na vinhaça indica interação antagônica com cálcio e magnésio nas doses 600 e $1200\text{ m}^3\text{ ha}^{-1}$.

O incremento de magnésio e matéria orgânica pela vinhaça é predominante na camada de $0 - 20$ cm. O potássio, sódio e cálcio apresentam concentrações que não podem ser distintas entre as camadas dos primeiros 40 cm do vaso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ashraf, M.; Rahmatullah; Ahmad, R.; Bhatti, A. S.; Afzal, M.; Sarwar, A.; Maqsood, M. A.; Kanwal, S. (2010). Amelioration of salt stress in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) by supplying potassium and silicon in hydroponics. *Pedosphere*, 20, 153-162.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. (1985) *Water quality agriculture*. Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 174p.
- Barros, R. P.; Viégas, P. R. A.; Silva, T. L.; Souza, R. M.; Barbosa, L.; Viégas, R. A.; Barretto, M. C. V.; Melo, A. S. (2010). Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 40, 341-346.
- Brady, N. C.; Weil, R. R. (2013) *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. 3 ed. Porto Alegre: Bookman.686p.
- Brito, F. L.; Rolim, M. M.; Pedrosa, E. M. R. (2009). Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 4, 456-462.
- Cabral Filho, F. R.; Vieira, G. S.; Silva, N. F.; Cunha, E. S.; Santos, L. N. S.; Rodrigues, C. R.; Cunha, F. N.; Teixeira, M. B.; Soares, F. A. L. (2018). Sugarcane vinasse cations dynamics in Cerrado Soils, Brazil. *Sugar Tech*.
- Campiteli, L. L.; Santos, R. M.; Lazarovits, G.; Rigobelo, E. C. (2018). The impact of applications of sugar cane filter cake and vinasse on soil fertility factors in fields having four different crop rotations practices in Brazil. *Científica*, 46, 42-48.
- Cavalcanti, J. F. A. (Coord.) (2008) *Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco: 2ª aproximação*. Recife: IPA. 198p.
- Christofoletti, C. A.; Escher, J. P.; Correia, J. E.; Marinho, J. F. U.; Fontanetti, C. S. (2013). Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. *Waste Management*, 33, 2752-2761.
- Cruz, J. I.; Portugal, R. S.; Lucendo, M. C. H.; Elis, V. R.; Fachin, S. J. S.; Ustra, A. T.; Borges, W. R. (2008). Detecção da contaminação de solo por vinhaça através de análise de dados de eletrorresistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26, 481-492.
- Francisco, J. P.; Folegatti, M. V.; Silva, L. B. D.; Silva, J. G. B. (2015). Monitoramento da condutividade elétrica e pH da solução do solo sob diferentes doses de aplicação de vinhaça. 23, 552-561.

- Francisco, J. P.; Folegatti, M. V.; Silva, L. B. D.; Silva, J. G. B.; Diotto, A. V. (2016). Variations in the chemical composition of the solution extracted from a Latosol under fertigation with vinasse. *Revista Ciência Agronômica*, 47, 229-239.
- Jalali, M.; Merrikhpour, H. (2008). Effects of poor quality irrigation water on the nutrient leaching and groundwater quality from sandy soil. *Environmental Geology*, 53, 1289-1298.
- Jiang, Z.; LI, Y.; Wei, G.; Liao, Q.; Su, T.; Meng, Y.; Zhang, H.; Lu, C. (2012). Effect of long-term vinasse application on physico-chemical properties of sugarcane field soils. *Sugar Tech*, 14, 412-417.
- Madejón, E.; López, R.; Murillo, J. M.; Cabrera, F. (2001). Agricultural 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*, 84, 55-65.
- Malavolta, E. (2006). *Manual de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres. 638p.
- Manyari, F.; Flores, J. V. (2017). Use of vinasse and bicarbon to the remediation of saline-sodium soils in the district of Tambogrande, Piura. *Journal of Energy & Environmental Sciences*, 1, 23-33.
- Mcgrath, J. M.; Spargo, J.; Penn, C. J. (2014). Soil fertility and plant nutrition. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*, 5, 166-184.
- Nascimento, R.; Souza, A. P.; Moreira, A.; Moraes, L. A. C. (2017). Phosphogypsum and vinasse application: soil chemical properties and alfafa productivity and nutritional characteristics. *Revista Caatinga*, 30, 213-219.
- Ortegón, G. P.; Arboleda, F. M.; Candela, L.; Tamoh, K.; Valdes-Abellan, J. (2016). Vinasse application to sugar cane fields. Effect of the unsaturated zone and groundwater at Valle del Cauca (Colombia). *Science of the Total Environment*, 539, 410-419.
- Pazuch, F. A.; Nogueira, C. E. C.; Souza, S. N. M.; Micuanski, V. C.; Friedrich, L.; Lenz, A. M. (2017). Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of Paraná, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 34-42.
- Portocarrero, R.; Correa, M. A.; Vallejo, J. I.; Ullivarri, E.; Valeiro, A. H. (2018). Salinidad por aplicación de vinazas de un suelo subtropical cultivado con caña de azúcar. *Ciencia del Suelo*, 36, 39-47.

- Ribeiro, M. R.; Ribeiro Filho, M. R.; Jacomine, P. K. T. (2016). Origem e classificação dos solos afetados por sais. In: Gheyi, H. R.; Dias, N. S.; Lacerda, C. F.; Gomes Filho, E. (ed.). Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. 2 ed. INCTSal, 504p.
- SAS Institute. Statistical Analysis System. Procedure guide for personal computer. 2010.
- Silva, A. P. M.; Bono, J. A. M.; Pereira, F. A. R. (2014). Aplicação de vinhaça na agricultura da cana-de-açúcar: efeito no solo e na produtividade de colmos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 38-43.
- Silva, F. C. (ed.) (2009). Manual de análises química de solos, plantas e fertilizantes. 2. Ed. Brasília – DF: Embrapa Informação Tecnológica.
- Silva, M. A. S.; Griebeler, N. P.; Borges, L. C. (2007). Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e do lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 11, 108-114.
- Silva, M. R. M.; Oliveira, F. A.; Cavalcante, L. F.; Souto, A. G. L.; Dias, J. A.; Bezerra, F. T. C. (2018). Salinidade e composição catiônica do lixiviado de um solo salino-sódico tratado com vinhaça. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 12, 2834-2844.
- Su, T.; LI, Y.; Wei, G.; Jiang, Z.; Liao, Q.; Zhu, S. (2012). Macronutrients absorption and surface runoff losses under different fertilizer treatments in sugarcane field. *Sugar Tech*, 14, 255-260.
- Tejada, M.; Gonzalez, J. L.; García-Martínez, A. M.; Parrado, J. (2008). Application of a green manure and green manure composted with beet vinasse on soil restoration: Effects on soil properties. *Bioresource Technology*, 99, 4949-4957.
- Toledo, J. V.; Zolnier, S.; Silva, T. G. F.; Boehring, D.; Steidle Neto, A. J. (2017). Alterations on the evapotranspiration of sugarcane cultivars under distinct salinity levels applied in the fertigation. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, 37, 940-952.
- Valsechi, O.; Gomes, F. P. (1954). Solos incorporados de vinhaça e seu teor de bases. *Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz*, 11, 136-158.