

FERTIRRIGAÇÃO COM VINHAÇA NA CANA-DE-AÇÚCAR: AVALIAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO INICIAL, CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E TEOR DE POTÁSSIO NO SOLO*

LEANDRO RENATO GIUNZIONI LANCE¹; RUBISMAR STOLF²; VINICIUS BOF BUFON³; RAQUEL STUCCHI BOSCHI⁴ E CLAUDINEI FONSECA SOUZA²

¹ Mestre em Agricultura e Ambiente pelo Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, Universidade Federal de São Carlos/UFSCar, CEP: 13600-970, Araras, São Paulo, Brasil. leandrolance@hotmail.com

² Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos, Araras – SP.

³ Embrapa Cerrados - Planaltina - Brasília, DF.

⁴ Secretaria Geral de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.

* Trabalho faz parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor.

1 RESUMO

A cana-de-açúcar é essencial no Brasil, ocupando 8,3 milhões de hectares e produzindo 30 bilhões de litros de etanol na safra 2021/2022. A vinhaça, subproduto dessa indústria, contém nutrientes como potássio, nitrogênio e fósforo, podendo beneficiar a fertilidade do solo e a saúde das plantas, promovendo uma agricultura mais sustentável. Este estudo avaliou os efeitos da aplicação localizada de vinhaça no crescimento inicial da cana-de-açúcar em solo arenoso na Fazenda Santa Rita (SR), Pirassununga – SP. O experimento foi realizado em um canavial de 9 ha com 200 linhas de 300 metros, espaçadas a 1,5 m, com 4 tratamentos: vinhaça localizada (Vlocal), vinhaça em área total (Vtotal), água localizada (W) e testemunha (T), cada um com 5 repetições. A aplicação de vinhaça foi de 3 mm (30 m³/ha). Analisaram-se a condutividade elétrica do solo, o teor de potássio e o desenvolvimento inicial da cana, com medições antes e após 30 dias. A vinhaça localizada aumentou a salinidade e o teor de potássio na camada superficial do solo, reduzindo o crescimento inicial das plantas, enquanto a vinhaça total também teve efeitos negativos, mas menos severos. Recomenda-se cautela no uso da vinhaça e estudos adicionais em solos arenosos e regiões com alta pluviosidade.

Palavras-chave: Irrigação, Fertilização, Lixiviação, Sustentabilidade.

LANCE, L. R. G.; STOLF, R.; BUFON, V. B.; BOSCHI, R. S.; SOUZA, C. F.
FERTIGATION WITH VINASSE IN SUGARCANE: EVALUATION OF INITIAL DEVELOPMENT, ELECTRICAL CONDUCTIVITY, AND POTASSIUM CONTENT IN THE SOIL

2 ABSTRACT

Sugarcane is essential in Brazil, covering 8.3 million hectares and producing 30 billion liters of ethanol in the 2021/2022 harvest. Vinasse, a byproduct of this industry, contains nutrients such as potassium, nitrogen, and phosphorus, which can benefit soil fertility and plant health, promoting more sustainable agriculture. This study evaluated the effects of localized vinasse application on the initial growth of sugarcane in sandy soil at Fazenda Santa Rita (SR),

Pirassununga, SP. The experiment was conducted in a 9-hectare sugarcane field with 200 rows of 300 meters spaced 1.5 meters apart, with 4 treatments: localized vinasse (Vlocal), total area vinasse (Vtotal), localized water (W), and control (T), each with 5 replications. The vinasse application was 3 mm (30 m³/ha). The soil electrical conductivity, potassium content, and initial sugarcane development were analyzed, with measurements taken before and 30 days after application. Localized vinasse increased salinity and potassium in the surface layer, reducing initial plant growth, whereas total vinasse also had negative effects, although they were less severe. Caution is recommended in the use of vinasse, with further studies needed in sandy soils and high-rainfall areas.

Keywords: Irrigation, Fertilization, Leaching, Sustainability.

3 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma das principais culturas brasileira, ocupando uma extensão significativa de 8,3 milhões de hectares na safra 2021/2022. O setor sucroenergético do Brasil desempenha um papel crucial, contribuindo para a produção de açúcar, energia elétrica e etanol. Nessa mesma safra, a produção total de etanol, composta por etanol anidro (40%) e etanol hidratado (60%), atingiu a expressiva marca de 30 bilhões de litros (Cana-de-Açúcar, 2022).

A trajetória da produção de álcool a partir da cana-de-açúcar no Brasil, iniciada em 1925 e consolidada em 1938 com a regulamentação da mistura de etanol na gasolina (Lei n° 737), destaca a importância histórica desse setor (Brasil, 1938).

Entretanto, esse cenário produtivo traz consigo desafios relacionados ao gerenciamento do resíduo, principalmente o mais abundante do processo de produção de etanol: a vinhaça. Com uma média de 12 litros gerados para cada litro de etanol, a safra 2021/2022 acumulou impressionantes 360 bilhões de litros de vinhaça (Elia Neto, 2019).

A conscientização ambiental ganhou força em 1978, com a Portaria n° 323 do Ministério do Interior, que proibiu o despejo de vinhoto em corpos d'água (Brasil, 1978). Atualmente, a aplicação de vinhaça segue regulamentações nacionais, como a

Resolução do CNRH n°15 de 2001 e a Portaria do Ministério da Saúde n°518/04 de 2004 (Brasil, 2001, 2004).

Em São Paulo, a CETESB desempenha um papel crucial na regulamentação e fiscalização, estabelecendo valores orientadores para solo e águas subterrâneas por meio das Decisões de Diretoria n° 195-2005 – e n° 103/2007/C/E (CETESB, 2005, 2007). A Norma Técnica P4.231, elaborada em 2015, define critérios e procedimentos para a aplicação de vinhaça no solo agrícola (CETESB, 2015).

A vinhaça, um subproduto da indústria do açúcar e do etanol, é rica em nutrientes valiosos para a agricultura, como potássio, que ajuda na regulação da água e na fotossíntese; nitrogênio, essencial para o crescimento e formação de proteínas; e fósforo, importante para a energia celular e o desenvolvimento das raízes. Além disso, a vinhaça fornece micronutrientes como cálcio, magnésio e enxofre, que são cruciais para a saúde das plantas. Sua aplicação no solo pode melhorar a fertilidade e a estrutura do solo, promovendo uma agricultura mais sustentável ao reaproveitar um resíduo industrial útil (Silva; Griebeler; Borges, 2007).

Apesar dos avanços nas regras e procedimentos para avaliar os impactos ambientais da aplicação de vinhaça, observa-se que as normas em vigor foram desenvolvidas para métodos tradicionais,

como a aspersão em área total. Essas diretrizes não consideram a aplicação localizada de vinhaça, nem estabelecem procedimentos adequados de coleta de amostras para essas áreas.

Outro aspecto não contemplado é o período do ciclo de cultivo, no qual a cana-de-açúcar demanda nutrientes de forma mais acentuada. Estudos, como o de Santana *et al.* (2007), destacam que a extração significativa de potássio ocorre na fase final do ciclo fisiológico, enquanto a aplicação inicial pode resultar em lixiviação do potássio, elevando a salinidade do solo.

Diante das limitações no desenvolvimento impostas pelo aumento da condutividade elétrica, a irrigação com água emerge como uma ferramenta crucial para elevar a produtividade dos canaviais e preservar a qualidade do plantio. Em um cenário em que a área irrigada no Brasil possui potencial significativo de crescimento, alcançando 55 milhões de hectares, a irrigação da cana-de-açúcar pode não apenas reduzir os custos de produção, mas também manter uma atividade econômica vital, diminuir a área cultivada, reduzir a distância entre o plantio e a colheita e servir como veículo para aplicação fracionada de nutrientes, especialmente no momento de maior exigência durante o ciclo final (ANA, 2022). Este estudo busca explorar esses aspectos críticos, proporcionando uma compreensão abrangente da gestão da vinhaça e suas implicações no cenário agrícola contemporâneo.

Neste contexto, a hipótese geral orienta que a aplicação localizada de vinhaça pode acarretar aumento na salinidade do

solo, comprometendo o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar e levando à lixiviação de potássio abaixo da profundidade efetiva das raízes. Essa investigação pretende contribuir significativamente para a compreensão e otimização dessa prática, considerando seus impactos nos aspectos agrícolas e ambientais. Este estudo tem como objetivo avaliar os efeitos da aplicação localizada de vinhaça no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar em comparação com o método convencional.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

O presente experimento foi conduzido em uma área de cultivo de cana-de-açúcar pertencente a Fazenda Santa Rita (SR), situada em Pirassununga – SP com classe de solo predominante de Neossolo Quartzarênico. A área foi escolhida após a conclusão da primeira colheita de cana, ocorrida em 12/03/2021 e a variedade cultivada foi a RB966928. A classificação climática de Köppen para Pirassununga é Cwa, caracterizada por uma estação seca no inverno (maio a outubro) e uma estação chuvosa no verão (novembro a abril), com temperatura média de aproximadamente 21 °C e pluviosidade anual em torno de 1.400 mm.

Os atributos físicos e químicos do solo na área experimental estão detalhados na Tabela 1. As análises seguiram as orientações propostas por Rajj *et al.* (2001).

Tabela 1. Atributos físicos e químicos do solo da área experimental.

Atributos	Santa Rita
Capacidade de campo (%)	36
Ponto de murcha permanente (%)	22
Areia fina (g/kg)	550
Areia grossa (g/kg)	260
Areia total (g/kg)	810
Argila (g/kg)	142
Silte (g/kg)	48
Classe textural	Arenosa
pH CaCl ₂	4,8
P Resina (mg/dm ³)	5
K ⁺ (mmol _c /dm ³)	1,9
Ca ²⁺ (mmol _c /dm ³)	18
Mg ²⁺ (mmol _c /dm ³)	6
Al ³⁺ (mmol _c /dm ³)	<1
H + Al (mmol _c /dm ³)	35
S-SO ₄ ⁻² (mg/dm ³)	14
Soma de Bases (mmol _c /dm ³)	30,4
Capacidade de Troca Catiônica (mmol _c /dm ³)	44,2
Saturação de Bases (%)	42,1
Saturação de alumínio (%)	1
%K na CTC	2,9
%Ca na CTC	46
%Mg na CTC	12,9
B (mg/dm ³)	0,15
Cu (mg/dm ³)	1,9
Mn (mg/dm ³)	2,1
Fe (mg/dm ³)	21
Zn (mg/dm ³)	0,9
Condutividade elétrica (dS/m)	0,065

Fonte: os autores.

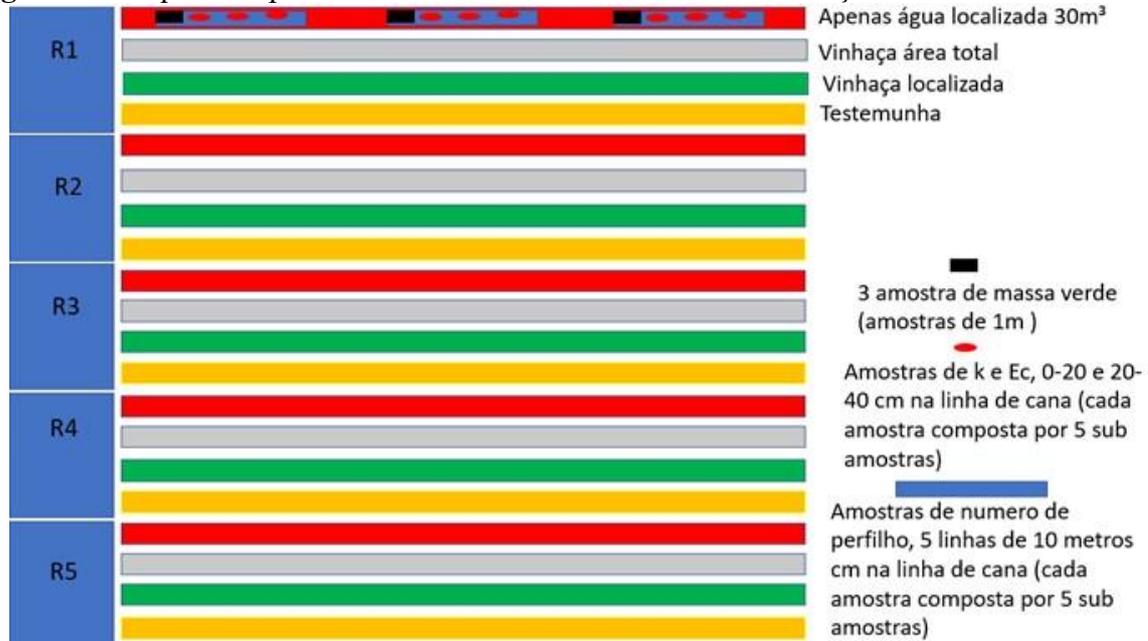
4.2 Design do experimento

O experimento foi implementado em um canavial recém brotado em talhões de 9 ha, distribuídos em 200 linhas de 300 metros, com um espaçamento de 1,5 m. Foram aplicados 4 tratamentos, cada um com 5 repetições, nas 160 linhas centrais.

Cada parcela constituiu-se de 8 linhas, conforme mostrado na Figura 1. Os tratamentos incluíram a aplicação de vinhaça localizada (Vlocal), vinhaça em área total (Vtotal), água localizada (W), e uma testemunha (T), sem qualquer aplicação. A lâmina de vinhaça aplicada foi de 3 mm (30 m³/ha) e, para garantir a uniformidade com o

caminhão “Nonino”, utilizaram-se linhas longas para minimizar a variação na distribuição do produto.

Figura 1. Croqui do experimento realizado em Santa Rita e localização das amostras coletadas.



Fonte: os autores.

A aplicação de vinhaça localizada foi realizada pelo caminhão, atingindo simultaneamente 8 linhas, enquanto a vinhaça em área total foi dispersa com um difusor que espalhou o produto por toda a área; a vinhaça utilizada continha 6 kg de potássio por m^3 , resultando em 180 kg de potássio/ha, conforme os limites estabelecidos pela CETESB para áreas com CTC saturada de potássio. O experimento foi conduzido durante a época de baixa pluviosidade (março a julho de 2021), com um pluviômetro instalado na área para registrar a precipitação pluviométrica.

4.3 Coleta de amostras e procedimentos

As amostras de solo foram coletadas em quatro períodos distintos em relação à aplicação dos tratamentos (1 dia antes (D-1), 1 dia depois (D+1), 30 dias depois (D+30) e 75 dias depois (D+75)), com a coleta realizada em três pontos ao longo das 5 linhas centrais (início, meio e fim),

totalizando 15 amostras por parcela (Figura 1), sendo cada amostra composta por 5 subamostras. Além disso, a avaliação da quantidade de perfilhos foi feita em três pontos ao longo das linhas, marcados com barbante, totalizando 5 ruas, cada uma com 3 pontos de 20 m.

As amostras de massa verde foram coletadas no primeiro metro de cada linha das amostras de perfilhos, com o início e o fim definidos pelo gabarito de barbante, enquanto as amostras de solo foram enviadas aos laboratórios conveniados da Fazenda Santa Rita para análise do teor de potássio nas camadas de 0-20 cm, 20-40 cm e 75-85 cm, além da condutividade elétrica nas camadas de 0-20 cm e 20-40 cm; a coleta da camada de 75-85 cm foi realizada no período D+75 para avaliar a lixiviação de potássio, coincidindo com o final do desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar, conforme o objetivo do trabalho.

As amostras de massa verde foram pesadas no campo utilizando uma balança de

precisão, de onde foram retiradas amostras para determinar o percentual médio de umidade, e a contagem de perfilhos também

foi realizada em campo. As datas de cada operação, bem como os períodos em dias entre elas, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Datas e intervalos de tempo para amostragens e eventos no ciclo de cultivo na área da Fazenda Santa Rita.

Evento	Fazenda Santa Rita
Talhão	A18
Data do Plantio	10/02/2020
Data da Última Colheita	12/03/2021
Data da Amostragem Inicial (D-1)	23/03/2021
Dias entre Amostragem (D-1) e a Colheita	11
Data da Aplicação dos Tratamentos	13/04/2021
Dias entre Aplicação dos Tratamentos e a Colheita	32
Data da Amostragem (D+1)	14/04/2021
Dias entre Amostragem (D+1) e a Colheita	33
Dias entre Amostragem (D+1) e a Aplicação	1
Data da Amostragem (D+30)	18/05/2021
Dias entre Amostragem (D+30) e a Colheita	67
Dias entre Amostragem (D+30) e a Aplicação	35
Data da Amostragem de Produtividade e Perfilhos	25/06/2021
Dias entre Produtividade e Perfilhos e a Colheita	105
Dias entre Produtividade e Perfilhos e a Aplicação	73
Data da Amostragem (D+75)	02/07/2021

(D-1): um dia antes da aplicação dos tratamentos; (D+1): um dia depois da aplicação dos tratamentos; (D+30): 30 dias depois da aplicação dos tratamentos; (D+75): 75 dias depois da aplicação dos tratamentos.

Fonte: os autores.

4.4 Análise dos dados

A etapa de análise estatística contemplou a comparação entre os tratamentos e os períodos de avaliação para cada variável estudada, abrangendo o teor de potássio, condutividade elétrica, número de perfilhos e massa verde. Na presença de interação entre o período de aplicação e o tratamento, os dados foram segregados, permitindo análises distintas para cada período.

Em todos os procedimentos analíticos, foram realizadas verificações cruciais para assegurar a robustez e a confiabilidade dos resultados. A normalidade dos resíduos foi avaliada através do teste de Shapiro-Wilk, enquanto a

homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Levene. Nos casos em que os resíduos não atenderam aos critérios de normalidade e/ou as variâncias não foram homogêneas, procedeu-se à transformação dos dados utilizando o método Box-Cox (Box; Cox, 1964).

Quando a transformação dos dados foi eficaz na resolução das discrepâncias identificadas, aplicaram-se o teste ANOVA e o teste de Tukey (95%) para comparações pareadas. Nas situações em que a transformação não foi suficiente, optou-se pelo teste não-paramétrico ANOVA robusta (Mair; Wilcox, 2020), sendo a comparação efetuada por meio do teste de Wilcox (Wilcox, 2017).

Os gráficos elucidativos foram construídos com o auxílio do pacote *ggplot2* (Wickham, 2016), proporcionando uma visualização clara e informativa dos resultados. Todas as análises foram conduzidas no ambiente R (R Core Team, 2020), garantindo consistência e precisão nos procedimentos estatísticos aplicados ao conjunto de dados coletado. Essa abordagem metódica visa garantir a confiabilidade e a interpretação precisa dos resultados obtidos no decorrer do experimento.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Precipitação pluviométrica mensal

A Tabela 3 apresenta variações significativas na precipitação na Fazenda Santa Rita durante o experimento. Em março, foi registrada uma precipitação de 35 mm, que pode ter fornecido uma umidade inicial importante ao solo. No entanto, a ausência de precipitação em abril e julho provavelmente resultou em condições secas, impactando a disponibilidade de água e exigindo ajustes no manejo, como irrigação adicional. A baixa precipitação em maio e junho (3,5 mm e 2,5 mm, respectivamente) pode ter afetado a umidade do solo e a eficácia dos tratamentos aplicados. A interação entre precipitação e práticas de manejo é crucial para entender o impacto das condições climáticas na eficácia dos tratamentos e nas variáveis estudadas, como o crescimento das plantas e a absorção de nutrientes.

Tabela 3. Precipitação pluviométrica mensal e periódica na Fazendas Santa Rita durante o experimento.

Período 2021	Precipitação mm
10 a 31 março	35
Abril	0
Maio	3,5
Junho	2,5
Julho	0

Fonte: os autores.

Os resultados relacionados aos tratamentos são apresentados para as quatro variáveis avaliadas: teor de potássio no solo, condutividade elétrica no solo, número de perfilhos e massa verde.

5.2 Teor de potássio

5.2.1 Teor de potássio na camada 0 a 20 cm de profundidade

A Tabela 4 apresentam os níveis de potássio no solo na camada de 0 a 20 cm, medidos 1 e 30 dias após a aplicação dos tratamentos: testemunha (T), vinhaça localizada (Vlocal), vinhaça total (Vtotal) e

água localizada (W). A análise dos resultados oferece insights sobre a eficácia

de cada tratamento em alterar os níveis de potássio no solo ao longo do tempo.

Tabela 4. Teores de potássio no solo (mg/kg - 0 a 20 cm) 1 e 30 dias após a aplicação dos tratamentos de vinhaça localizada (Vlocal), vinhaça total (Vtotal), água localizada (W) e testemunha (T).

Tratamento	Média	DesvPad	Mín.	Máx.	Wilcox
1 dia depois da aplicação					
T	2,37	0,24	2,10	2,7	B
Vlocal	4,87	0,73	4,13	5,67	A
Vtotal	4,04	0,65	3,07	4,80	B
W	2,34	0,53	1,62	2,92	B
30 dias depois da aplicação					
T	2,25	0,11	2,13	2,40	B
Vlocal	3,75	0,20	3,53	4,03	A
Vtotal	3,44	0,42	2,73	3,83	A
W	2,09	0,16	1,87	2,30	B

Fonte: os autores.

O tratamento Vlocal apresentou a maior concentração de potássio imediatamente após a aplicação, com um valor médio de 4,87 mg/kg, desvio padrão de 0,73 e uma faixa de valores entre 4,13 e 5,67 mg/kg. A classificação "A" no teste de Wilcox indica que este tratamento é estatisticamente superior aos demais em termos de aumento imediato dos níveis de potássio. Isso se deve à aplicação direta da vinhaça em áreas específicas, permitindo que as plantas acessem rapidamente a alta concentração de potássio no solo, como sugerido em Marschner (2012), que destaca a eficácia da aplicação localizada de fertilizantes para otimizar a disponibilidade de nutrientes. Por outro lado, a vinhaça total resultou em um aumento significativo dos níveis de potássio (4,04 mg/kg), porém com menor intensidade comparada ao tratamento localizado. A classificação "B" sugere que, embora o efeito seja positivo, não é tão pronunciado quanto o do Vlocal, possivelmente devido à diluição da concentração de potássio pela aplicação uniforme, corroborado por Fageria e Baligar (2005), que explicam como a aplicação

uniforme pode reduzir a concentração de nutrientes.

Ambos os tratamentos, testemunha (2,37 mg/kg) e água localizada (2,34 mg/kg) apresentaram níveis de potássio semelhantes e relativamente baixos, com a classificação "B". Isso confirma que a aplicação de água sozinha e a ausência de nutrientes não têm impacto significativo na elevação dos níveis de potássio no solo.

Após 30 dias, o tratamento Vlocal ainda manteve a maior média de potássio (3,75 mg/kg), com desvio padrão de 0,20 e valores variando entre 3,53 e 4,03 mg/kg. A persistência da eficácia do Vlocal em manter níveis elevados de potássio é evidenciada pela classificação "A", sugerindo que a aplicação localizada continua a ser a abordagem mais eficaz para a manutenção dos níveis de potássio no solo ao longo do tempo. Estudos têm demonstrado que a aplicação localizada de fertilizantes pode melhorar significativamente a eficiência na utilização de nutrientes e, portanto, os resultados das culturas (Marschner, 2012). O nível de potássio para Vtotal (3,44 mg/kg) foi significativamente mais baixo que o

Vlocal, mas ainda elevado em comparação com T e W. A classificação "B" indica que o efeito da vinhaça total permanece positivo, embora sua eficácia seja menor em comparação com a aplicação localizada. Essa diferença pode ser atribuída à dispersão mais ampla do potássio pela aplicação total, o que pode resultar em menor concentração no solo, conforme discutido em pesquisas sobre a distribuição e eficiência de fertilizantes (Nkebiwe *et al.*, 2016).

Os dados indicam que a aplicação localizada de vinhaça (Vlocal) é a mais eficaz para aumentar e manter os níveis de potássio no solo, tanto imediatamente após a aplicação quanto após 30 dias. A aplicação direta da vinhaça em pontos específicos proporciona uma concentração mais alta de potássio onde as plantas podem rapidamente acessá-lo, resultando em melhores resultados a curto e médio prazo. A aplicação total de vinhaça (Vtotal) também melhora os níveis de potássio no solo, mas a eficácia é reduzida em comparação com a aplicação localizada. Isso pode ser devido à diluição do potássio em uma área maior.

A água localizada (W) e a testemunha (T) não têm um efeito

significativo sobre os níveis de potássio, destacando a importância de utilizar tratamentos que adicionem nutrientes ao solo para obter melhorias significativas.

5.1.2 Teor de potássio na camada 20 a 40 cm de profundidade

O teor de potássio na camada de 20-40 cm pode ser visualizado na Tabela 5. Um dia após a aplicação, o tratamento Vtotal apresentou a maior média de potássio (2,87 mg/kg), indicando uma rápida liberação e aumento de potássio no solo. A classificação "AB" sugere que o efeito é significativo, embora não seja o mais destacado entre todos os tratamentos. O desvio padrão relativamente alto (0,47) e a faixa de valores (2,33 a 3,50 mg/kg) indicam alguma variabilidade na eficácia. O tratamento Vlocal também mostrou uma concentração elevada de potássio (2,58 mg/kg) um dia após a aplicação, com menor variabilidade (desvio padrão de 0,32). A classificação "AB" sugere um efeito intermediário, demonstrando que a aplicação localizada é eficaz, mas não tão intensa quanto a aplicação total (Nkebiwe *et al.*, 2016).

Tabela 5. Teores de potássio no solo (mg/kg - 20 a 40 cm) 1 e 30 dias após a aplicação dos tratamentos de vinhaça localizada (Vlocal), vinhaça total (Vtotal), água localizada (W) e testemunha (T).

Tratamento	Média	DesvPad	Mín.	Máx.	Wilcox
1 dia depois da aplicação					
T	2,20	0,34	1,70	2,53	A
Vlocal	2,58	0,32	2,13	2,90	AB
Vtotal	2,87	0,47	2,33	3,50	AB
W	2,05	0,37	1,62	2,55	B
30 dias depois da aplicação					
T	1,95	0,11	1,77	2,07	A
Vlocal	2,86	0,38	2,23	3,17	B
Vtotal	2,25	0,19	2,03	2,43	B
W	2,02	0,25	1,63	2,30	B

Fonte: os autores.

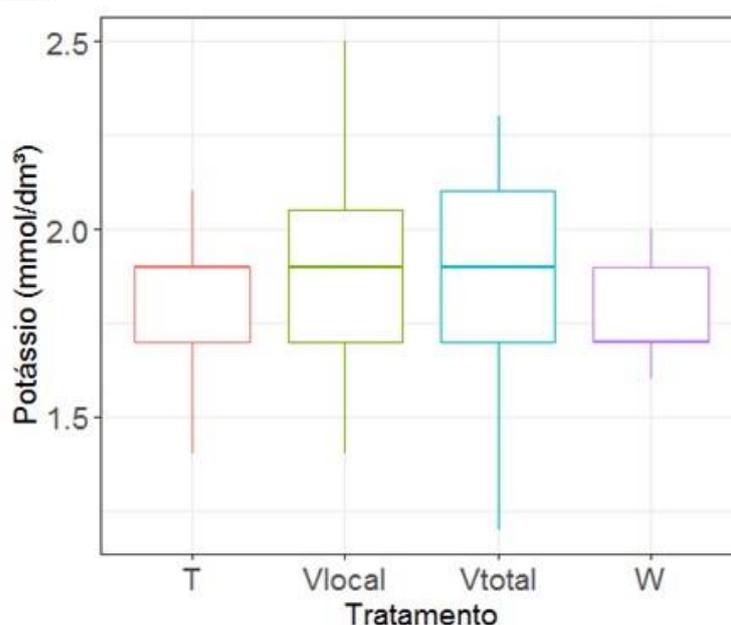
Os tratamentos testemunha (2,20 mg/kg) e água localizada (2,05 mg/kg) mostraram os menores níveis de potássio, com a classificação "B" indicando que esses tratamentos têm impactos semelhantes e não são significativamente diferentes entre si. Isso confirma que a água não contribui para o aumento dos níveis de potássio no solo (Mendes *et al.*, 2016). Após 30 dias da aplicação, os níveis de potássio no solo permanecem elevados para o tratamento de vinhaça localizada (Vlocal), com uma média de 2,86 mg/kg, embora a classificação "B" indique que seu efeito não é significativamente diferente dos outros tratamentos não fertilizantes. Isso sugere que a eficácia do Vlocal pode não ser tão duradoura quanto o inicialmente observado. Por outro lado, o tratamento com vinhaça total (Vtotal) apresentou uma redução nos níveis de potássio para 2,25 mg/kg, mantendo-se superior aos valores encontrados nos tratamentos testemunha (T) e água localizada (W), que foram de 1,95 mg/kg e 2,02 mg/kg, respectivamente. A

classificação "B" para esses tratamentos sugere que, após 30 dias, não há impacto significativo na elevação dos níveis de potássio a longo prazo (Qiu *et al.*, 2014).

5.1.3 Teor de potássio na camada 75 a 85 cm de profundidade

A Figura 2 apresenta o boxplot do teor de potássio na camada de 75 a 85 cm para o período de 75 dias após a aplicação dos tratamentos. A análise estatística não revelou diferença significativa nos valores de potássio entre os tratamentos, indicando que a aplicação de vinhaça, seja localizada ou em área total, não elevou o teor de potássio abaixo da zona radicular, minimizando o risco de contaminação do solo e lençol freático. Estudos semelhantes indicam que, quando aplicada corretamente, a vinhaça não tende a se mover significativamente para camadas mais profundas do solo, o que ajuda a evitar a contaminação de águas subterrâneas (Buvaneshwari *et al.*, 2020).

Figura 2. Boxplot dos teores de potássio na camada 75-85 cm, nos diferentes tratamentos: Vtotal: vinhaça em área total; Vlocal: vinhaça localizada; W: água localizada; T: testemunha.



Fonte: os autores.

5.2 Condutividade elétrica do solo

5.2.1 Condutividade elétrica na camada 0 a 20 cm de profundidade

O tratamento com vinhaça localizada (Vlocal) apresentou uma condutividade elétrica média de 1,43 dS/m (Tabela 6), com um desvio padrão de 0,05, indicando um aumento substancial e significativo em comparação com os outros tratamentos, corroborando com resultados semelhantes descritos por Carmo, Lima e Silva (2016) com a aplicação de resíduos orgânicos no

solo. Embora a classificação "B" sugira que esse efeito não é significativamente diferente do tratamento com vinhaça total (Vtotal), que teve uma média de 0,37 dS/m, Vlocal ainda demonstrou um aumento mais pronunciado. Por outro lado, os tratamentos testemunha (T) e água localizada (W) mostraram níveis muito baixos de condutividade elétrica, ambos com média de 0,1 dS/m, e receberam a classificação "A", indicando que não há aumento significativo na condutividade elétrica devido a esses tratamentos.

Tabela 6. Valores de condutividade elétrica (dS/m - 0 a 20 cm) 1 e 30 dias após a aplicação dos tratamentos de vinhaça localizada (Vlocal), vinhaça total (Vtotal), água localizada (W) e testemunha (T).

Tratamento	Média	DesvPad	Mín.	Máx.	Wilcox
1 dia depois da aplicação					
T	0,10	0,01	0,09	0,11	A
Vlocal	1,43	0,05	1,37	1,51	B
Vtotal	0,37	0,18	0,18	0,65	A
W	0,10	0,01	0,10	0,11	A
30 dias depois da aplicação					
T	0,10	0,01	0,09	0,11	A
Vlocal	1,20	0,16	1,01	1,40	B
Vtotal	0,36	0,14	0,24	0,58	A
W	0,07	0,01	0,07	0,09	A

Fonte: os autores.

Após 30 dias, a condutividade elétrica média para o tratamento com vinhaça localizada (Vlocal) foi de 1,2 dS/m, ainda significativamente mais alta que os outros tratamentos, mas com uma leve redução em comparação ao valor inicial de 1,43 dS/m. A classificação "B" sugere que, apesar da redução, a condutividade elétrica do solo permanece elevada, embora o efeito seja mais moderado em relação ao aumento inicial (Carmo; Lima; Silva, 2016). O tratamento com vinhaça total (Vtotal) apresentou uma pequena redução para 0,36 dS/m, mantendo-se superior aos tratamentos testemunha e água localizada. A

classificação "A" indica que, após um mês, a condutividade elétrica de Vtotal não difere significativamente dos níveis observados para os tratamentos testemunha e água localizada. Ambos, testemunha (T) e água localizada (W), mostraram valores baixos de condutividade elétrica, 0,1 dS/m e 0,07 dS/m, respectivamente, e receberam a classificação "A", indicando que não houve diferença significativa a longo prazo (Qiu *et al.*, 2014).

5.2.2 Condutividade elétrica na camada 20 a 40 cm de profundidade

O tratamento com vinhaça localizada (Vlocal) apresentou a maior condutividade elétrica média de 0,99 dS/m, com um desvio padrão de 0,18 (Tabela 7), indicando um aumento significativo em comparação com os outros tratamentos e recebendo a classificação "A", o que demonstra seu impacto imediato mais pronunciado. Em contraste, vinhaça total (Vtotal) mostrou uma condutividade elétrica média de 0,42

dS/m, superior aos tratamentos testemunha e água localizada, porém inferior ao Vlocal, resultando na classificação "B" que reflete um efeito notável, mas menos intenso que o Vlocal. Já os tratamentos Testemunha (T) e Água Localizada (W) apresentaram condutividades elétricas muito baixas, com médias de 0,11 e 0,08 dS/m, respectivamente, com a classificação "D" para W e "C" para T, indicando que esses tratamentos não têm impacto significativo na condutividade elétrica (Mendes *et al.*, 2016).

Tabela 7. Valores de condutividade elétrica (dS/m - 20 a 40 cm) 1 e 30 dias após a aplicação dos tratamentos de vinhaça localizada (Vlocal), vinhaça total (Vtotal), água localizada (W) e testemunha (T).

Tratamento	Média	DesvPad	Mín.	Máx.	Wilcox
1 dia depois da aplicação					
T	0,11	0,01	0,10	0,12	C
Vlocal	0,99	0,18	0,74	1,23	A
Vtotal	0,42	0,15	0,21	0,57	B
W	0,08	0,01	0,08	0,09	D
30 dias depois da aplicação					
T	0,08	0,02	0,07	0,11	A
Vlocal	0,67	0,10	0,52	0,75	C
Vtotal	0,24	0,04	0,20	0,27	B
W	0,10	0,01	0,09	0,11	A

Fonte: os autores.

Após 30 dias, a Vlocal apresentou uma condutividade elétrica média reduzida para 0,67 dS/m, ainda significativamente mais alta que os tratamentos testemunha e água localizada. A classificação "C" reflete que, embora a condutividade tenha diminuído, ela permanece elevada em relação aos demais tratamentos, mas com um efeito moderado comparado ao aumento inicial (Carmo; Lima; Silva, 2016). A Vtotal mostrou uma redução para 0,24 dS/m, mantendo-se superior aos tratamentos testemunha e água localizada. A classificação "B" indica que, após 30 dias, o efeito da vinhaça total ainda é significativo, mas menos pronunciado que o da vinhaça

localizada. Já os tratamentos testemunha (T) e água localizada (W) apresentaram condutividades elétricas baixas, com médias de 0,08 e 0,10 dS/m, respectivamente, e receberam a classificação "A", indicando que não houve diferença significativa na condutividade elétrica a longo prazo para esses tratamentos.

5.3 Número de perfilhos e massa verde

Os tratamentos T, W e Vtotal evidenciaram um número de perfilhos superior ao tratamento Vlocal (Tabela 8). Para o número de perfilhos, os tratamentos Vinhaça Localizada (Vlocal) e Vinhaça Total

(Vtotal) mostraram médias de 115,50 e 134,94, respectivamente, ambas inferiores às dos tratamentos Testemunha (T) e Água Localizada (W), que apresentaram médias de 139,84 e 137,30. A classificação "A" para T e W sugere que esses tratamentos resultaram em um número de perfilhos significativamente maior em comparação com Vlocal, que obteve a classificação "B". Isso indica que o uso de vinhaça, tanto em

área total quanto localizada, pode não ter sido tão eficaz em promover o desenvolvimento de perfilhos quanto os tratamentos de controle. O número reduzido de perfilhos no tratamento com vinhaça pode ser atribuído a efeitos adversos da vinhaça sobre a planta, como alta salinidade ou excesso de nutrientes que podem inibir o crescimento (Holanda *et al.*, 2011).

Tabela 8. Comparação do número de perfilhos e da massa verde nos quatro tratamentos (Vtotal: vinhaça em área total; Vlocal: vinhaça localizada; W: água localizada; T: testemunha).

Tratamento	Média	Desvio Padrão	Mín.	Máx.	Wilcox
Número de Perfilhos					
T	139,84	21,35	104	210	A
Vlocal	115,50	12,14	88	142	B
W	137,30	15,29	102	175	A
Vtotal	134,94	12,01	99	161	A
Massa verde (g)					
Tratamento	Média	DesvPad	Mín.	Máx	Wilcox
T	4,25	0,56	3,15	5,15	A
Vlocal	3,20	1,01	1,90	5,60	C
W	4,35	1,17	2,20	7,10	AB
Vtotal	3,84	0,81	2,80	5,90	B

Fonte: os autores.

Em relação à massa verde, o tratamento Testemunha (T) apresentou a maior média de 4,25 g, seguido por Água Localizada (W) com 4,35 g, ambos com classificação "A" e "AB", respectivamente, indicando valores significativamente altos. Em contraste, o tratamento com Vinhaça Localizada (Vlocal) teve a menor média de massa verde (3,20 g) e obteve a classificação "C", sugerindo que a aplicação de vinhaça localizada pode ter tido um impacto negativo na massa verde das plantas. Vinhaça Total (Vtotal), com uma média de 3,84 g, também apresentou valores mais baixos em comparação com os controles, mas com a classificação "B", indicando um efeito menos severo, porém ainda adverso em relação ao crescimento da massa verde.

Esses resultados indicam que, embora a vinhaça possa ter efeitos benéficos em algumas condições, ela também pode ter impactos negativos sobre o crescimento das plantas, especialmente em termos de número de perfilhos e massa verde. A redução no desempenho das plantas em resposta ao tratamento com vinhaça pode estar relacionada a fatores como alta concentração de sal ou desequilíbrio de nutrientes, que podem exigir ajustes nas práticas de manejo para mitigar esses efeitos adversos (Santana *et al.*, 2007). A diferença observada entre os tratamentos destaca a necessidade de um balanço cuidadoso ao utilizar vinhaça como fertilizante, visando otimizar os benefícios enquanto se minimizam os impactos negativos sobre o crescimento das plantas.

6 CONCLUSÕES

A aplicação localizada de vinhaça aumentou a disponibilidade de potássio no solo, mas seu efeito benéfico diminuiu após 30 dias. Além disso, não houve lixiviação para camadas mais profundas durante períodos de baixa precipitação extrema. No desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar, a vinhaça localizada resultou em menor número de perfilhos e massa verde em comparação com os tratamentos testemunha e água localizada. A vinhaça total também teve efeitos negativos, mas menos severos do que a vinhaça localizada. Em resumo, embora a aplicação localizada de vinhaça seja eficaz para fornecer potássio, seu impacto adverso no crescimento da cana-de-açúcar sugere que seu uso deve ser gerido com cuidado para evitar efeitos negativos.

7 REFERÊNCIAS

ANA. **Atlas Irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília, DF: ANA, 2022.

BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, Oxford, v. 26, n. 2, p. 211-243, 1964.

BRASIL. **Decreto-Lei nº 737, de 23 de setembro de 1938**. Torna obrigatória a adição de álcool anidro à gasolina produzida no país, qualquer que seja o método ou processo de sua fabricação, e dá outras providências. Rio de Janeiro: Câmara dos Deputados, 1938. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decllei/1930-1939/decreto-lei-737-23-setembro-1938-350748-publicacaooriginal-1-pe.html#:~:text=Torna%20obrigat%C3%B3ria%20a%20adi%C3%A7%C3%A3o%20de,fabrica%C3%A7%C3%A3o%2C%20e%2>

0d%C3%A1%20outras%20provid%C3%A Ancias. Acesso em: 10 set. 2024.

BRASIL. **Portaria 323, de 29 de novembro de 1978**. Proíbe o lançamento, direto ou indireto do vinhoto em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias de álcool do país. Brasília, DF: Ministério do Interior, 1978. Disponível em: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/bra14330.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2025.

BRASIL. **Portaria n.º 518, de 25 de março de 2004**. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2004. Disponível em: http://189.28.128.100/dab/docs/legislacao/portaria518_25_03_04.pdf. Acesso em: 10 set. de 2024.

BRASIL. **Resolução nº 15 de 11 de janeiro de 2001**. Estabelece diretrizes gerais para a gestão de águas subterrâneas. Brasília, DF: CNRH, 2001. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2013/11/Resolucao_CNRH-15_2001.pdf. Acesso em: 14 abr. 2025.

BUVANESHWARI, S.; RIOTTE, J.; SEKHAR, M.; SHARMA, A. K.; HELLIWELL, R.; KUMAR, M. S. M.; BRAUN, J. J.; RUIZ, L. Potash fertilizer promotes incipient salinization in groundwater irrigated semi-arid agriculture. **Scientific Reports**, London, v. 10, p. e3691, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60365-z>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-60365-z>. Acesso em: 14 abr. 2025.

CANA-DE-AÇUCAR. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar,

Brasília, DF, v. 8, n. 4, p. 1-59, 2022. Safra 2021/22, Quarto levantamento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 5 maio 2022.

CARMO, D. L.; LIMA, L. B.; SILVA, C. A. Soil fertility and electrical conductivity affected by organic waste rates and nutrient inputs. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 40, p. e0150152, 2016.

CETESB. Decisão de Diretoria nº 103/2007/C/E, de 22 de junho de 2007. Dispõe sobre o procedimento para gerenciamento de áreas contaminadas. **Diário Oficial Estado de São Paulo**: seção 1, São Paulo, caderno executivo 1, p. 34, 27 jun. 2007. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/17/2015/07/DD-103-07-C-E-Procedimento-para-Gerenciamento-de-Areas-Contaminadas.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

CETESB. **Decisão de Diretoria nº 195-2005 - E, de 23 de novembro de 2005**. São Paulo: CETESB, 2005. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2022/09/DD-195-05-E-Aprovacao-dos-val.Orientadores-para-solos-e-aguas-subt.no-Estado-de-Sao-Paulo.pdf>. Acesso em: 10 set. 2024.

CETESB. **Vinhaça** – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. 3 ed. São Paulo: CETESB, 2015. (Norma técnica P4.231). Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/P4.231_Vinha%C3%A7a_-Crit%C3%A9rios-e-procedimentos-para-aplica%C3%A7%C3%A3o-no-solo-agr%C3%ADcola-3%C2%AA-Ed-2%C2%AA-VERS%C3%83O.pdf. Acesso em: 10 set. 2024.

ELIA NETO, A. **Vinhaça**: biofertilizante e energia sustentável. São Paulo: UNICA, 2019. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/vinhaca-biofertilizante-e-energia-sustentavel/>. Acesso em: 8 ago. 2022.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 88, p. 97-185, 2005.

HOLANDA, S. J. R.; ARAÚJO, F. S.; GALLÃO, M. I.; MEDEIROS FILHO, S. Impacto da salinidade no desenvolvimento e crescimento de mudas de carnaúba (*Copernicia prunifera* (Miller) H.E.Moore). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 15, n. 1, p. 47-52, 2011.

MAIR, P.; WILCOX, R. R. Robust Statistical Methods in R Using the WRS2 Package. **Behavior Research Methods**, London, v. 52, p. 464-488, 2020.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Academic Press, 2012.

MENDES, W. C.; ALVES JÚNIOR, J.; CUNHA, P. C. R.; SILVA, A. R.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Potassium leaching in different soils as a function of irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 11, p. 972-977, 2016.

NKEBIWE, P. M.; WEINMANN, M.; BAR-TAL, A.; MÜLLER, T. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis, **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 196, p. 389-401, 2016.

- QIU, S.; XIE, J.; ZHAO, S.; XU, X.; HOU, Y.; WANG, X.; ZHOU, W.; HE, P.; JOHNSTON, A. M.; CHRISTIE, P.; JIN, J. Long-term effects of potassium fertilization on yield, efficiency, and soil fertility status in a rain-fed maize system in northeast China. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 163, p. 1-9, 2014.
- R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Viena: R Foundation for Statistical Computing. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 8 ago. 2022.
- RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001.
- SANTANA, M. J.; CARVALHO, J. A.; SOUZA, K. J.; SOUSA, A. M. G.; VASCONCELOS, C. L.; ANDRADE, L. A. B. Efeitos da salinidade da água de irrigação na brotação e desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) e em solos com diferentes níveis texturais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 5, p. 1470-1476, 2007.
- SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.
- WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. New York: Springer-Verlag, 2016.
- WILCOX, R. R. **Introduction to robust estimation and hypothesis testing**. 4. ed. London: Academic Press, 2017.