



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**BIODISPONIBILIDADE DE FÓSFORO E POTÁSSIO PROVENIENTES DE  
FERTILIZANTES MINERAL E ORGANOMINERAL**

WELLDY GONÇALVES TEIXEIRA

2013

WELLDY GONÇALVES TEIXEIRA

**BIODISPONIBILIDADE DE FÓSFORO E POTÁSSIO PROVENIENTES DE  
FERTILIZANTES MINERAL E ORGANOMINERAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em Solos, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer

UBERLÂNDIA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

T266 b Teixeira, Welldy Gonçalves, 1987-  
2013 Biodisponibilidade de fósforo e potássio provenientes de fertilizantes mineral e organomineral / Welldy Gonçalves Teixeira. – 2013.  
99 f. : il.

Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Agronomia.  
Inclui bibliografia.

1. Agronomia - Teses. 2. Lixiviação - Teses. 3. Adubos e fertilizantes - Teses. 4. Solos - Teses. I. Korndörfer, Gaspar Henrique. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

---

CDU: 631

WELLDY GONÇALVES TEIXEIRA

**BIODISPONIBILIDADE DE FÓSFORO E POTÁSSIO PROVENIENTES DE  
FERTILIZANTES MINERAL E ORGANOMINERAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em Solos, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 25 de Fevereiro de 2013.

Prof <sup>a</sup> . Dr <sup>a</sup> Regina Maria Quintão Lana	UFU
Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira	UFU
Prof. Dr. Humberto Molinar Henrique	UFU
Prof <sup>a</sup> Dr <sup>a</sup> Suzana Pereira de Melo	UFMT

Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer  
ICIAG-UFU  
(Orientador)

UBERLÂNDIA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2013

## DEDICATÓRIA

Aos meus amados pais, **Brandina Teixeira de Oliveira** (*in memorian*) e **Sady Gonçalves de Oliveira** (*in memorian*).

Exemplos de luta, caráter, dignidade... vocês me ensinaram as lições de vida mais importantes e estarão para sempre em meu coração.

Aos meus irmãos **Welley e Wesley** e madrinha **“Doni”**, apesar da distância, vocês sempre acreditaram em mim.

À minha **persistência** que nos momentos mais difíceis me fez seguir a diante.

## AGRADECIMENTOS

A **Deus**, pela saúde, força e privilégio de realizar mais um sonho em minha vida.

À uma pessoa muito especial que sempre esteve ao meu lado e que soube compreender minhas escolhas, pelo carinho e cuidados dispensados.

À minha irmã Welcy, que me incentivou e ajudou nos momentos mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer, por ter acreditado na execução deste trabalho, exemplo de pessoa, profissionalismo e pelas sugestões.

À Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Regina Maria Quintão Lana, por todo o apoio na redação desta dissertação, contribuição para o meu crescimento profissional e pela amizade e incentivo durante estes meses de convivência.

Ao grande amigo de pós-graduação e colaborador assíduo deste trabalho, Robson Thiago Xavier de Sousa, pelo apoio, amizade e paciência em esclarecer minhas dúvidas. Também a todos os amigos de pós-graduação, pelos momentos de descontração e amizade.

A empresa Geociclo Biotecnologia S/A, pelo fertilizante cedido, e à equipe de funcionários Danilo, Murilo, Buré e Edinho, que me ajudaram nos trabalhos mais árduos.

Ao LABAS, ao LAFER, ao Instituto de Ciências Agrárias e à Universidade Federal de Uberlândia, pela estrutura cedida para a realização deste trabalho. Aos funcionários da pós-graduação Cida e Eduardo, pela amizade e atendimento em todas as solicitações. Também a todos os funcionários e professores do Instituto de Ciências Agrárias.

Aos técnicos do LABAS Manuel, Gilda, Eduardo e Marinho, pela ajuda nas análises de laboratório, com competência e profissionalismo. À todos os funcionários e estagiários do LAFER, pela colaboração na realização desta pesquisa.

À Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ângela Maria Quintão Lana e à Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natascha Almeida Marques da Silva, pela ajuda nas análises estatísticas.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Enfim, a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, aqui expresso minha profunda gratidão.

## EPÍGRAFE

“ **B**om mesmo é ir a luta com determinação, abraçar a vida e viver com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, pois o triunfo pertence a quem se atreve e a vida é muito bela para ser insignificante ”

**Charlie Chaplin**

## SUMÁRIO

RESUMO .....	i
ABSTRACT.....	ii
CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	2
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
1.2.1 Fertilizantes na agricultura brasileira.....	4
1.2.2 Fertilidade dos solos brasileiros: Fósforo e Potássio.....	6
1.2.2.1 Fósforo.....	7
1.2.2.2 Potássio.....	8
1.2.3 Fertilização dos solos brasileiros: a busca por métodos alternativos.....	9
1.2.4 Fertilizante organomineral.....	12
REFERÊNCIAS.....	15
CAPÍTULO II – Fertilizante organomineral na cultura da cana-de-açúcar.....	20
RESUMO.....	21
ABSTRACT.....	22
2.1 INTRODUÇÃO.....	23
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
2.2.1 Caracterização do ambiente experimental.....	26
2.2.2 Caracterização química e física do solo.....	26
2.2.3 Caracterização da variedade.....	27
2.2.4 Delineamento experimental e tratamentos.....	27



2.2.5 Caracterização das fontes.....	28
2.2.6 Instalação do experimento.....	29
2.2.7 Práticas culturais e condução do experimento.....	30
2.2.8 Avaliações experimentais.....	31
2.2.8.1. Variáveis de produção.....	31
2.2.8.2 Variáveis tecnológicas.....	32
2.2.8.3 Análise química do material vegetal.....	32
2.2.8.4 Análise química de solo.....	32
2.2.9 Equivalente em fertilizante mineral.....	33
2.2.10 Análises estatísticas.....	33
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
2.3.1 Fósforo disponível no solo.....	35
2.3.2 Fósforo remanescente.....	41
2.3.3 Potássio trocável.....	43
2.3.4 Teores de nutrientes na planta.....	47
2.3.4.1 Fósforo.....	47
2.3.4.2 Potássio.....	50
2.3.5 Acúmulo de nutrientes e fitomassa seca na planta.....	54
2.3.5.1 Fósforo.....	54
2.3.5.2 Potássio.....	57
2.3.5.3 Fitomassa seca.....	59
2.3.6 Produção de colmos e rendimento de açúcar.....	62
2.3.7 Equivalente em fertilizante mineral.....	65
2.3.8 Variáveis tecnológicas.....	67

2.4 CONCLUSÕES.....	72
REFERÊNCIAS.....	73
CAPÍTULO III - Lixiviação de potássio em função da textura do solo e do tipo de fertilizante (mineral e organomineral).....	81
RESUMO.....	82
ABSTRACT.....	83
3.1 INTRODUÇÃO.....	84
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	85
3.2.1 Localização e caracterização experimental.....	85
3.2.2.Delineamento experimental e tratamentos.....	85
3.2.3 Instalação e condução do experimento.....	86
3.2.4 Análises estatísticas.....	88
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	89
3.3.1 Potássio no solo.....	89
3.3.2 Potássio na solução percolada .....	92
3.4 CONCLUSÕES .....	97
REFERÊNCIAS.....	98

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Médias mensais de precipitação pluviométrica e temperatura (máxima, mínima e média) registradas durante o período experimental (agosto/2011 a maio/2012). Dados da estação climatológica localizada na Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica, em Uberlândia, MG.....	26
FIGURA 2. Mudanças de cana-de-açúcar, variedade IAC 95-5000, após o transplante para vasos de 200 L.....	30
FIGURA 3. Vista da área experimental com sistema de irrigação por gotejamento superficial.....	30
FIGURA 4. Coleta de solo na camada de 0-0,2 cm com trado calador.....	33
FIGURA 5. Teores de P disponível no solo pelos extratores resina e Mehlich-1, aos 133 dias após a aplicação de doses de $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores médios das duas fontes. Dados transformados para $\ln(x+1)$ .....	36
FIGURA 6. Teores de P disponível no solo pelos extratores resina (a) e Mehlich-1 (b), aos 276 dias após a aplicação de doses de $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores disponíveis por resina representam a média das duas fontes. Dados transformados para $\ln(x+1)$ .....	37
FIGURA 7. Teores de P disponível no solo pelos extratores Mehlich-1 e resina, aos 133 e 276 dias após a aplicação de doses de $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores médios das duas fontes e das três doses de $P_2O_5$ . Dados transformados para $\ln(x+1)$ .....	39
FIGURA 8. Teores de P remanescente, aos 133 (a) e 276 dias após a aplicação (b) de doses de $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores aos 133 dias (a) representam a média das duas fontes.....	41
FIGURA 9. Teores de P remanescente, aos 133 e 276 dias após a aplicação de doses de $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores médios das duas fontes e das três doses de $P_2O_5$ .....	43
FIGURA 10. Teores de K trocável no solo, aos 133 (a) e 276 dias após a aplicação (b) de doses de $K_2O$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores aos 276 dias (b) representam a média das duas fontes. Dados transformados para $\ln(x+1)$ .....	44
FIGURA 11. Teores de K trocável no solo, aos 133 e 276 dias após a aplicação de doses de $K_2O$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores médios das duas fontes e das três doses de $K_2O$ . Dados transformados para $\ln(x+1)$ .....	47

FIGURA 12. Teores de P na parte aérea total, na folha e no ponteiro da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores representam a média das duas fontes.....	48
FIGURA 13. Teores de K no ponteiro (a), colmo (b) e folha (c) da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de $K_2O$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores no colmo (b) e na folha (c) representam a média das duas fontes.....	51
FIGURA 14. Acúmulo de P na parte aérea total, no ponteiro e no colmo da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Média das duas fontes.....	55
FIGURA 15. Acúmulo de K na parte aérea total, no ponteiro, no colmo e na folha senescente da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Média das duas fontes. Dados de folhas senescentes transformados para $\ln(x+1)$ .	57
FIGURA 16. Acúmulo de fitomassa seca na parte aérea total e nas partes da cana-planta (colmo, folha senescente e ponteiro), variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses ( $kg\ ha^{-1}$ ) dos fertilizantes mineral (D1: 0, D2: 400, D3: 600 e D4: 800) e organomineral (D1: 0, D2: 800, D3: 1200 e D4: 1600). Média das duas fontes.....	60
FIGURA 17. Produção de colmos (a) e rendimento de açúcar (b) da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses ( $kg\ ha^{-1}$ ) dos fertilizantes mineral (D1: 0, D2: 400, D3: 600 e D4: 800) e organomineral (D1: 0, D2: 800, D3: 1200 e D4: 1600). Linhas tracejadas ilustram o cálculo do equivalente em fertilizante mineral (EqM).....	64
FIGURA 18. Variáveis tecnológicas da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses ( $kg\ ha^{-1}$ ) dos fertilizantes mineral (D1: 0, D2: 400, D3: 600 e D4: 800) e organomineral (D1: 0, D2: 800, D3: 1200 e D4: 1600): sólidos solúveis no caldo - Brix (a); sacarose contida na cana - Pol cana (b); sacarose contida no caldo - Pol caldo (c); fibra (d); pureza aparente do caldo (e) e açúcares redutores no caldo - AR (f).....	69
FIGURA 19. Detalhes da instalação do experimento: colunas de lixiviação apoiadas em suporte de madeira (a), garrafas plásticas para coleta da solução percolada (b), suporte de aço (c), tela de aço (d), manta acrílica (e), anel de PVC fixado no suporte de aço (f) e galões utilizados para armazenar a solução percolada (g).....	86
FIGURA 20. Teor de K trocável nas camadas do Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa (LVd1) e média (LVd2), após a aplicação de 1.146 mm de água. Em cada camada, barras com letras iguais não diferem entre si, pelo teste de	89

Tukey, a 0,05 de significância.....

FIGURA 21. Percentual de K lixiviado através das colunas de solo em relação ao total de K aplicado nos tratamentos que receberam adubação..... 92

FIGURA 22. Fertilizante organomineral (Geofert) e fertilizante mineral (KCl) em solução de nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ), evidenciando o efeito de liberação gradual de K, na forma de  $\text{K}_2\text{O}$ , em diferentes tempos após a adição dos fertilizantes: 30 s (a); 1 min (b); 2 min (c) e 4 min (d)..... 94

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Caracterização química das amostras do Latossolo Vermelho distrófico (LVd) utilizado no cultivo da cana-de-açúcar.....	27
TABELA 2. Caracterização física das amostras do Latossolo Vermelho distrófico (LVd) utilizado no cultivo da cana-de-açúcar.....	27
TABELA 3. Tratamentos aplicados à cana-planta.....	28
TABELA 4. Parâmetros físico-químicos do fertilizante organomineral utilizado no cultivo da cana-de-açúcar.....	29
TABELA 5. Teores de P disponível no solo, pelos extratores Mehlich-1 e resina aos 133 e 276 dias após a aplicação (DAA) de doses de $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral.....	40
TABELA 6. Teores de P remanescente, aos 133 e 276 dias após a aplicação (DAA) de doses de $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral.....	42
TABELA 7. Teores de K trocável no solo, aos 133 e 276 dias após a aplicação (DAA) de doses de $K_2O$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral.....	46
TABELA 8. Teores de P na parte aérea total e nas partes da cana-planta (folha, ponteiro, colmo e folha senescente), variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral.....	50
TABELA 9. Teores de K na parte aérea total e nas partes da cana-planta (folha, ponteiro, colmo e folha senescente), variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de $K_2O$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral.....	53
TABELA 10. Acúmulo de P na parte aérea total e nas partes da cana-planta (ponteiro, colmo e folha senescente), variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral.....	56
TABELA 11. Acúmulo de K na parte aérea total e nas partes da cana-planta (ponteiro, colmo e folha senescente), variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de $K_2O$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral.....	58
TABELA 12. Acúmulo de fitomassa seca total na parte aérea total e nas partes da cana-planta (colmo, folha senescente e ponteiro), variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses ( $kg\ ha^{-1}$ ) dos fertilizantes mineral (D1: 0, D2: 400, D3: 600 e D4: 800) e organomineral (D1: 0, D2: 800, D3: 1200 e D4: 1600).....	61

TABELA 13. Produção de colmos e rendimento de açúcar da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) dos fertilizantes mineral (D1: 0, D2: 400, D3: 600 e D4: 800) e organomineral (D1: 0, D2: 800, D3: 1200 e D4: 1600).....	65
TABELA 14. Doses de nutrientes proveniente do fertilizante organomineral (B) calculadas por meio das equações de Mitscherlich para atingir a mesma produção de colmos com a adubação mineral (A).....	66
TABELA 15. Variáveis tecnológicas da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) dos fertilizantes mineral (D1: 0, D2: 400, D3: 600 e D4: 800) e organomineral (D1: 0, D2: 800, D3: 1200 e D4: 1600).....	70
TABELA 16. Caracterização química do Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa (LVd1) e média (LVd2), utilizado no preenchimento das colunas de lixiviação.....	84
TABELA 17. Caracterização física do Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa (LVd1) e média (LVd2), utilizado no preenchimento das colunas de lixiviação.....	84
TABELA 18. Formulações e doses correspondentes dos fertilizantes utilizados no experimento.....	85
TABELA 19. Quantidade total de K na solução percolada considerando a textura do solo e o tipo de fertilizante, mineral e organomineral. Valores entre parênteses representam o percentual de K lixiviado através das colunas de lixiviação em relação ao total de K aplicado ( $1500 \text{ kg ha}^{-1}$ de $\text{K}_2\text{O}$ ou $3,91 \text{ g}$ de K por coluna).....	91
TABELA 20. Percentual de $\text{K}_2\text{O}$ solubilizado, proveniente dos fertilizantes mineral e organomineral, em função do tempo de contato do nutriente com a solução aquosa.....	93

## RESUMO

TEIXEIRA, WELLDY GONÇALVES. **Biodisponibilidade de fósforo e potássio provenientes de fertilizantes mineral e organomineral.** 2013. 98f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>.

Para avaliar a liberação de fósforo (P) e potássio (K) e sua disponibilidade para as plantas a partir de fertilizantes mineral e organomineral, foram realizados dois experimentos na Universidade Federal de Uberlândia, em Uberlândia, MG. O primeiro foi instalado em vasos plásticos de 200 L, cultivando-se mudas de cana-de-açúcar em Latossolo Vermelho distrófico, textura muito argilosa. Os tratamentos constaram de duas fontes e três doses de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, mais um tratamento adicional, sem adubação. As fontes foram: fertilizante mineral 4-20-20 e fertilizante organomineral 2-10-10 aplicadas, para efeito de comparação, em doses distintas para fornecer as mesmas quantidades de nutrientes. Aos 133 dias e 276 dias após a aplicação dos tratamentos (DAA), amostras de solo na camada de 0-0,2 m foram coletadas para determinação dos teores de P, P remanescente e K. A extração do P disponível foi feita por dois extratores: Mehlich-1 e resina trocadora de íons. As plantas foram colhidas aos 231 dias após o transplante das mudas para os vasos, avaliando-se as seguintes características: teor e acúmulo de P e K, acúmulo de fitomassa seca, produção de colmos, rendimento de açúcar e variáveis tecnológicas. Nas duas épocas de amostragem do solo, a resina apresentou maior capacidade de extração de P em relação ao Mehlich-1, que não detectou os teores de P disponível para a planta. As análises de P remanescente revelaram que, com o passar do tempo e com o fertilizante organomineral, ocorreu menor adsorção de P pelo solo. Este fertilizante foi mais eficiente em todas as doses aplicadas, podendo substituir o fertilizante mineral e apresentar até 15% a mais de eficiência na produção de colmos de cana-de-açúcar. No segundo experimento, avaliou-se a mobilidade do K no perfil do solo, em função da textura e da fonte do nutriente. O experimento foi instalado em colunas de lixiviação, utilizando-se dois solos (Latossolo Vermelho distrófico), sendo um de textura argilosa e, o outro, de textura média. Foram aplicadas as seguintes fontes, em dose equivalente a 1500 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O: (a) fertilizante mineral 20-5-20 com KCl solúvel; (b) fertilizante organomineral 16-1-16; (c) fertilizante organomineral 8-1-8, além de um tratamento controle, sem adubação. Durante 60 dias aplicou-se água em quantidade equivalente a 1.146 mm de precipitação pluvial. Ao final desse período, foram determinados os teores de K trocável em onze camadas de solo da coluna e a quantidade total de K na solução percolada. O fertilizante organomineral proporcionou maior teor de K trocável nas camadas superficiais dos solos. Nas camadas mais profundas, o teor de K trocável não diferiu entre os fertilizantes, com exceção de duas camadas no solo argiloso, em que o teor desse elemento foi maior com o fertilizante mineral. As perdas por lixiviação dependeram do tipo de fertilizante, com as maiores quantidades totais de K na solução percolada do tratamento que recebeu fertilizante mineral.

**Palavras-chave:** Cana-de-açúcar, lixiviação, nutrientes.

---

<sup>1</sup>Professor Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer - UFU



## ABSTRACT

TEIXEIRA, WELLDY GONÇALVES. **Phosphorus and potassium bioavailability from an organomineral fertilizer.** 2013. 98f. Dissertation (Master's degree in Agriculture / Soil Sciences) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>.

Phosphorus (P) and potassium (K) liberation and their availability to plants from an organomineral fertilizer were evaluated in two experiments at the Universidade Federal de Uberlândia, in Uberlândia, MG. The first one was done in 200-L plastic containers, cultivating sugar-cane seedlings in a Dystrustox. Treatments consisted of two sources and three doses of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O, plus an additional treatment, with no fertilizer. The sources were: mineral fertilizer 4-20-20 and organomineral fertilizer 2-10-10 applied, for comparison purposes, in two different doses to supply the same amount of nutrients. Soil samples of the top 0-0,2 m layer were collected 133 days and 276 days after treatment application (DAA) to determine the contents of P, remaining P and K. Extraction of available P was done with two extractors: Mehlich-1 and ion exchange resin. The plants were harvested 231 days after seedling transplanting to the containers, evaluating the following characteristics: content and accumulation of P and K, dry matter, stalk production, sugar yield and technological variables. Resin presented greater P extraction capacity in the two soil sampling dates in relation to Mehlich-1, which failed to detect available P content for plants. The analysis of remaining P revealed that, with time and with the organomineral fertilizer, less P adsorption occurred by the soil. This fertilizer was more effective in the doses applied, and can substitute the mineral fertilizer, presenting up to 15% greater efficacy in sugar-cane stalk production. Potassium mobility in the soil profile, as a function of soil texture and nutrient source, was evaluated in the second experiment. The test was done in leaching columns, using two soils (Dystrustox), a clayey texture and a medium one. The following sources were applied, in doses equivalent to 1500 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O: (a) mineral fertilizer 20-5-20 with soluble KCl; (b) organomineral fertilizer 16-1-16; (c) organomineral fertilizer 8-1-8, beside a control treatment, with no fertilization. Water was applied for 60 days in amount equivalent to 1.146 mm rainfall. At the end of this period, exchangeable K was determined in eleven soil layers of the column and also, the total amount of K in the leachate solution. Organomineral fertilizer resulted in greater amount of exchangeable K in top layers of both soils. Exchangeable K contents were not different among the fertilizers in deeper soil layers, except for two layers of the clayey soil, in which the contents of this element were greater with the mineral fertilizer. Losses by leaching depended on fertilizer type, with greater total amounts of K in the leachate solution in the treatment receiving mineral fertilizer.

**Keywords:** Sugar-cane, leachate, nutrients.

---

<sup>1</sup> Supervisor: Gaspar Henrique Korndörfer - UFU

## **CAPÍTULO I**

### **CONSIDERAÇÕES GERAIS**

## 1.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores agrícolas, com uma área plantada em torno de 65 milhões de hectares e produção de 995,4 milhões de toneladas (IBGE, 2010). Segundo o relatório de Projeções do Agronegócio no Brasil (2010/11 a 2020/21), publicado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2012), a área plantada com lavouras poderá aumentar sete milhões de hectares, com expansão concentrada nas culturas da soja e da cana-de-açúcar.

Em consequência desse aumento na produção, há uma demanda cada vez maior por fertilizantes, cuja utilização garante maior produtividade e permite que áreas menores sejam ocupadas para a obtenção de uma mesma produção. Atualmente, o Brasil importa cerca de 70% de sua demanda de fertilizantes, figurando como o quarto maior mercado consumidor de fertilizantes do mundo (REIS et al., 2010).

Um dos principais componentes na formação do custo de produção das culturas consiste na adubação, como consequência do elevado preço dos fertilizantes associado à baixa eficiência dos mesmos. Diante desse cenário, é necessário que a aplicação dos fertilizantes seja capaz de permitir o aumento na produtividade e obtenção do maior lucro, sem ter que aumentar a quantidade de nutrientes aplicada.

É notória a dependência brasileira por matérias-primas para fabricação dos fertilizantes minerais, já que a produção nacional não acompanhou a taxa de crescimento do consumo (PROFETA; BRAGA, 2012). Visando diminuir essa dependência e otimizar a utilização de fertilizantes, o País deve priorizar alternativas de fertilização dos solos que sejam econômicas e eficientes. Uma possibilidade é a utilização de resíduos orgânicos na produção de fertilizantes que possam ser aplicados nas culturas, em substituição ou complementação da adubação mineral.

São muitos os resíduos orgânicos de origens urbana, industrial e agrícola que podem ser usados na agricultura e, por conterem altos teores de matéria orgânica, contribuem para diversas propriedades químicas do solo, como aumento da capacidade de troca catiônica (CTC), maior complexação de elementos tóxicos e de micronutrientes, além de melhorar a estrutura, promover maior infiltração de água, aumentar a aeração e a atividade e diversidade dos microrganismos.

No entanto, devido à composição desbalanceada de nutrientes e ao alto teor de umidade de alguns resíduos, são necessárias aplicações de grandes quantidades para atingir a equivalência nutricional dos fertilizantes minerais. Consequentemente, o custo

com transporte e distribuição no solo torna-se o fator mais limitante para viabilizar economicamente a reciclagem agrícola desses resíduos. Além disso, a aplicação de altas doses de alguns resíduos, como os de origem animal, por exemplo, tem elevado potencial poluente para o solo, podendo comprometer a qualidade da água no ambiente.

Em 1982 foi incorporada na legislação brasileira a categoria de fertilizante organomineral, que consiste em produto resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos. Esse fertilizante permite o suprimento combinado de nutrientes minerais e matéria orgânica, proporcionando uma série de vantagens sobre a aplicação de fertilizantes minerais ou compostos orgânicos.

Pesquisas vêm sendo realizadas para avaliar os efeitos de fertilizantes organominerais em diversas culturas, como soja, trigo e aveia (WIETHÖLTER et al., 1994); melão (FERNANDES; TESTEZLAF, 2002); café (FERNANDES et al., 2007); milho (TIRITAN et al., 2010), batata (ZEBARTH et al., 2012). A disponibilidade de nutrientes no solo com o fertilizante organomineral também vem sendo estudada por alguns autores (BÜLL et al., 1999; SILVA et al., 2010; SCHIAVONI et al., 2011; STEINER et al., 2011).

Assim, realizou-se este trabalho com o objetivo de avaliar a biodisponibilidade de fósforo (P) e potássio (K) provenientes de fertilizantes mineral e organomineral.

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.2.1 Fertilizantes na agricultura brasileira

A agricultura brasileira passou por um grande desenvolvimento nos últimos 100 anos, obtendo aumentos significativos na produtividade de grande número de culturas (LOPES; GUILHERME, 2007). Atualmente, o Brasil é o terceiro maior produtor agrícola do mundo, superado apenas pelos Estados Unidos e pela União Européia. Em 1960, o País colheu 17,2 milhões de toneladas de grãos, em uma área pouco superior a 22 milhões de hectares, representando uma produtividade de 783 kg ha<sup>-1</sup>. Em 2010, a produtividade brasileira na colheita de grãos totalizou 3.173 kg ha<sup>-1</sup>, significando uma evolução de 305% em cinquenta anos. Entre 1990 e 2010, a produção conjunta das lavouras de cereais, leguminosas e oleaginosas aumentou a uma taxa de 4,9% a.a., enquanto a produtividade, em t ha<sup>-1</sup>, cresceu a uma taxa de 4,1% a.a. no mesmo período (IBGE, 2011).

O aumento da produção e da produtividade da maioria das culturas, principalmente aquelas consideradas de exportação, certamente tem como componente importante o aumento no consumo e o uso mais eficiente de fertilizantes minerais, (LOPES; GUILHERME, 2007), sendo este segundo fator o que, isoladamente, mais contribui para o aumento da produtividade agrícola (ISHERWOOD, 1998). A oferta total de fertilizantes no Brasil em 2012 atingiu mais de 24,8 milhões de toneladas, com cerca de 16,2 milhões de toneladas oriundas de importações e 8,0 milhões de toneladas produzidas no país, segundo dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), divulgados por Siqueira e Carneiro (2012). Este cenário reflete a elevada dependência externa do Brasil por esses insumos.

No acumulado de janeiro a outubro de 2012 em relação ao mesmo período de 2011, a produção brasileira de fertilizantes recuou 1,3% (SIQUEIRA; CARNEIRO, 2012). Importa-se atualmente cerca de 70% dos produtos usados na fabricação de adubos, o que eleva o Brasil à posição de quarto maior mercado consumidor de fertilizantes do mundo, ficando atrás da China, Índia e Estados Unidos (TAVARES; HABERLI, 2011). Entre 1994 e 2007, a taxa média de elevação da importação de fertilizantes foi de 9,83% ao ano, sendo que seu consumo aumentou à taxa de 6,32% no mesmo período (SAAB; PAULA, 2008).

O território brasileiro é constituído, na sua maior parte, por solos ácidos e pobres em nutrientes, como o P e o K. Para torná-los produtivos, são utilizadas grandes quantidades de fertilizantes e, em razão da alta dependência por importação, a demanda por fertilizantes apresenta um impacto considerável sobre os custos de produção, que representam de 10% a 30% dos custos totais. Segundo Lupinacci (2012), o volume de fertilizantes importado pelo Brasil está bem acima do que é importado por outros países com elevada produção de alimentos e, entre os grandes produtores agrícolas mundiais, o Brasil é o que está mais dependente da importação de adubos. Entre 2007 e 2010 foi necessário importar 63% do volume, para suprir as necessidades de fertilizantes no mercado brasileiro (TAVARES; HABERLI, 2011).

Essa dependência se explica pela baixa existência de recursos minerais em território nacional que venham a ser utilizados como matéria-prima, como gás natural, rocha fosfática e rocha potássica. Os fertilizantes nitrogenados são os que têm maiores perspectivas de aumento de oferta doméstica, por causa dos projetos de gás natural em curso no país. No entanto, restrições devido ao controle de distribuição do gás inviabilizam os investimentos das empresas do setor, fazendo com que as importações continuem elevadas atingindo, em 2010, 73% do consumo brasileiro, segundo a ANDA.

Os fertilizantes fosfatados são derivados da rocha fosfática, na forma de ácido fosfórico, que é obtido pela reação da rocha com ácido sulfúrico. Estados Unidos, Marrocos e Índia são os maiores produtores mundiais de rocha fosfática, enquanto Estados Unidos, China, Marrocos e Rússia detêm a produção de ácido sulfúrico (BRASIL, 2011). Embora existam no Brasil fontes de fosfato, a produção no País atinge somente 50% de sua necessidade devido às leis ambientais e precárias condições de infraestrutura, impedindo a exploração das jazidas.

Com relação aos fertilizantes potássicos, a situação é mais crítica, face a escassez das reservas no país e ao alto custo dos projetos para exploração do minério. Com isso, o Brasil tem importado a maior parte do fertilizante potássico utilizado na agricultura (92%). A produção ocorre em poucos países, onde reservas economicamente viáveis são encontradas, como no Canadá, Rússia e Bielorrússia. Juntos, esses três países são responsáveis por mais de 60% da produção e cerca de 70% das exportações mundiais do mineral (MINISTÉRIO DA FAZENDA, 2011).

Do ponto de vista do processo produtivo, nitrogênio (N), P e K são os nutrientes mais importantes. Os demais macro e micronutrientes, apesar da importância biológica, não têm expressão econômica na indústria de fertilizantes, nem valorização comercial

significativas, por serem utilizados em quantidades muito pequenas (DIAS; FERNANDES, 2006). Por essa razão, a formulação básica dos fertilizantes é a combinação dos três elementos químicos essenciais às plantas: N, P e K. Como importante componente da célula vegetal, o N frequentemente é fator primordial no aumento da produtividade agrícola, fazendo parte da molécula de clorofila e auxiliando nas reações de síntese protéica (TAIZ; ZEIGER, 2004). O P é responsável pelos processos vitais das plantas, está envolvido na transferência de energia que é necessária para a fotossíntese, para a translocação e outros processos metabólicos de relevância (ARAÚJO; MACHADO, 2006). O K ativa vários sistemas enzimáticos, regula a absorção de água e a translocação de nutrientes na planta (MEURER, 2006).

A simples aplicação de fertilizantes, contudo, não é suficiente para aumentar a fertilidade do solo; é preciso ter eficiência no uso dos mesmos. Alcarde, Guidolin e Lopes (1998) afirmam as respostas às doses crescentes de fertilizantes não são lineares e a eficiência da adubação consiste na obtenção dos maiores acréscimos de produtividade por quantidade de adubo empregada. O manejo da fertilidade dos solos, por meio do uso eficiente de corretivos e fertilizantes é responsável, dentre diversos outros fatores de produção, por cerca de 50% dos incrementos de produção e produtividade das culturas (LOPES; GUILHERME, 2007). Portanto, diante da forte dependência dos insumos importados, o Brasil deve buscar por alternativas que sejam eficientes para levar ao aumento da produtividade e que tragam sustentabilidade econômica.

### **1.2.2 Fertilidade dos solos brasileiros: Fósforo e Potássio**

Atualmente, cerca de 25% do território nacional são ocupados por Cerrado, havendo 139 milhões de hectares de terras aráveis dos quais, 54 milhões são cultivadas com pastagens; 21,6 milhões estão sob culturas agrícolas, sendo 85% com cultivos anuais e 15% com cultivos perenes; e 3,4 milhões com áreas reflorestadas (EMBRAPA CERRADOS, 2012).

As características dos solos de Cerrado são inadequadas para a agricultura em decorrência dos efeitos da acidez, associados geralmente à presença de alumínio e manganês em níveis tóxicos (SOUSA et al., 2007). Entretanto, a utilização de práticas como a correção da acidez e elevação da fertilidade permitem a obtenção de altas produtividades, fazendo da região dos Cerrados uma das principais regiões agrícolas do País.

### 1.2.2.1 Fósforo

O P é um nutriente que apresenta elevada interação com o solo. Essa particularidade, associada à sua deficiência em imensas áreas do território brasileiro, faz desse elemento o mais crítico nos programas de adubação nas últimas décadas (RAIJ, 2011). Nos solos da região do Cerrado, os teores de P são muito baixos. Associada a essa característica, a alta capacidade que esses solos têm para reter o nutriente na fase sólida constitui na principal limitação de qualquer produção agrícola rentável sem a aplicação de fertilizantes fosfatados (MARTINHÃO; SOUSA; LOBATO, 2004).

A elevada capacidade de fixação de P em solos intemperizados há muito é conhecida (LOPES; COX, 1977; NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). Segundo Raij (2011), os fertilizantes fosfatados adicionados ao solo dissolvem-se, migram para a solução do solo mas, em decorrência da baixa solubilidade dos compostos formados no solo e da forte tendência de adsorção, a maior parte do elemento fica retida na fase sólida como P lábil, passando gradativamente a P não lábil.

A retenção do P adicionado ao solo ocorre tanto pela precipitação em solução com formas iônicas de ferro (Fe), alumínio (Al) e cálcio (Ca), e mais significativamente pela sua adsorção pelos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, presentes em grandes quantidades em solos tropicais bastante intemperizados, sobretudo nos mais argilosos (NOVAIS; SMYTH, 1999). Dessa forma, em solos tropicais, as condições são favoráveis à fixação desse elemento, tanto por adsorção quanto por precipitação. Campello et al. (1994) verificaram que a reversibilidade de P não-lábil para lábil em solos com diferentes características foi muito pequena.

Ernani, Steckling e Bayer (2001) afirmaram que a disponibilidade de P a partir da aplicação de fertilizantes fosfatados solúveis depende da reação que controla o suprimento do nutriente à solução do solo (adsorção química ou precipitação), do pH ao redor do grânulo do fertilizante e do tipo de precipitado de P que predomina. Diante desses fatores que controlam a disponibilidade do nutriente para as plantas e da realidade dos solos brasileiros, necessário se faz o uso de tecnologias que aumentem a eficiência de uso do P para o manejo eficiente da adubação fosfatada. Segundo Beauclair (1984), a prática da adubação orgânica pode aumentar o teor de P no solo, devido a redução de fixação desse nutriente pelos óxidos amorfos (cristais de óxido de ferro e alumínio), pois atua bloqueando os sítios de fixação nesses minerais, o que resulta em aumento da disponibilidade desse nutriente às plantas.



### 1.2.2.2 Potássio

O K, depois do P, constitui o nutriente mais consumido como fertilizante pela agricultura brasileira, sendo o mais extraído pelas plantas, depois do N (RAIJ, 2011). Os teores em geral insuficientes de K que ocorrem nos solos brasileiros contrastam com as elevadas exigências do nutriente pelas culturas, o que tem levado ao grande aumento do consumo de fertilizantes potássicos na agricultura brasileira nos últimos anos (NACHTIGALL; RAIJ, 2005).

Considerando sua disponibilidade para as plantas, o K do solo pode ser classificado em quatro categorias, que seguem uma ordem crescente de disponibilidade: estrutural (mineral), não-trocável ou dificilmente disponível, trocável e em solução, que, somadas, fornecem o K total. Os teores trocáveis representam a reserva imediata de K para as plantas e, em solos muito intemperizados, constituem a reserva mais importante do nutriente disponível (RAIJ, 2011), os quais, por sua vez, podem ser absorvidos pelas plantas, adsorvidos às cargas negativas do solo ou perdidos por lixiviação.

A disponibilidade de K e a capacidade de suprimento desse nutriente pelo solo dependem de diversos fatores, como: presença de minerais primários e secundários, aplicação de fertilizantes, CTC do solo e ciclagem do nutriente pelas plantas (WERLE; GARCIA; ROSOLEM, 2008). No entanto, uma melhor avaliação da disponibilidade de K para as plantas implica no conhecimento não só dos fatores quantidade (K trocável) e intensidade (K solução), mas também da relação entre esses dois fatores que constitui o Poder Tampão de Potássio (PTK) do solo, ou seja, a capacidade que o solo tem em manter certa concentração de K na solução, quando da absorção pelas plantas ou de perdas ocorridas no solo (GOEDERT; SYER; COREY, 1975).

Em solos de baixa CTC, a lixiviação de K é um fenômeno importante, especialmente em áreas com elevada precipitação pluvial (ERNANI; ALMEIDA; SANTOS, 2007). Portanto, se aplicado em doses elevadas e de uma única vez, podem ocorrer perdas por lixiviação, além da salinização da região que recebe o fertilizante, o que pode causar toxicidade às raízes das plantas.

Devido à baixa reserva mineral de K nos solos e às perdas por lixiviação, é comum haver carência do nutriente quando o seu fornecimento na forma de fertilizante é insuficiente para atender à demanda das culturas, o que pode ser agravado dependendo da textura do solo e da precipitação pluvial. Considerando esses aspectos, aliados à dependência brasileira da importação de fertilizantes potássicos e a importância desse

nutriente para as plantas, verifica-se a relevância de pesquisas no sentido de fornecimento de K às plantas com menores perdas do nutriente pelas adubações.

### **1.2.3 Fertilização dos solos brasileiros: a busca por métodos alternativos**

A relevância do setor de fertilizantes minerais para a agricultura brasileira é nítida, pois a sua utilização tem sido importante para as cadeias produtivas agrícolas, gerando aumento da produtividade. O K tornou-se, no Brasil, o principal macronutriente consumido desde o início da década de 90, sendo a maior parte comercializada como cloreto de potássio (KCl); a principal fonte nitrogenada utilizada é a ureia, apesar das grandes perdas por volatilização quando aplicada em superfície ou sobre a palha; já o fertilizante fosfatado mais utilizado no País é o superfosfato simples (SS) que, além de fornecer P, também é fonte de Ca e enxofre (S) (OLIVEIRA et al., 2005).

No entanto, o elevado grau de importação tem feito com que a demanda por esses fertilizantes cause um impacto considerável sobre a balança comercial brasileira. Aliado a esses fatores econômicos e de disponibilidade de matérias-primas, os fertilizantes apresentam algumas desvantagens em seu comportamento nos solos tropicais brasileiros, que estão relacionados às altas temperaturas e precipitação pluviométrica. O N, na forma de ureia, apresenta grandes perdas por volatilização de amônia para a atmosfera (KIEHL, 1989). O K, na forma de cloreto, apresenta elevada mobilidade química e física por movimentação em solução e por erosão (BERTOL et al., 2007), com maiores agravantes em solos arenosos e de textura média (ROSOLEM; CALONEGO; FOLONI, 2005). Os fosfatos solúveis são parcialmente adsorvidos em óxidos e hidróxidos de Fe e Al, abundantes em solos tropicais (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Como relatado anteriormente, os solos brasileiros são, em geral, ácidos e pobres em nutrientes. Mesmo assim, aplica-se quantidade muito menor de fertilizantes do que a recomendada (OLIVEIRA et al., 2005), o que agrava ainda mais a situação do País quando se analisa sua dependência por fertilizantes. Entre as alternativas para redução da importação de matérias-primas utilizadas na fabricação de fertilizantes minerais, encontra-se o aproveitamento de resíduos orgânicos da agropecuária.

Os resíduos orgânicos recebem esta denominação em razão das elevadas quantidades de carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O) armazenadas em suas moléculas componentes, podendo ser classificados em produtos de origem animal,

vegetal, agroindustrial e industrial (SILVA, 2008). Independente dessa classificação, a origem da maior parte dos resíduos orgânicos está ligada à atividade urbana e ao processo de produção agropecuário ou industrial que, conforme aumentam, maior é a geração dos resíduos.

A América Latina produz mais de 500 mil toneladas por ano de subprodutos e resíduos agroindustriais, sendo o Brasil responsável por mais da metade dessa produção (SOUZA; SILVA, 2002). Um levantamento realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada (IPEA, 2012) revela que 291 milhões de toneladas de resíduos sólidos são gerados anualmente pelas agroindústrias, destacando-se a cana-de-açúcar como a cultura que mais gerou resíduos, totalizando 201 milhões de toneladas na forma de torta de filtro e bagaço. Para o setor da pecuária, foi estimada uma geração total 1,7 bilhões de toneladas ano<sup>-1</sup> de dejetos, considerando as principais criações animais (bovinos, suínos e aves). Caso o aproveitamento ou o descarte desses resíduos não seja feito de forma correta, certamente muitos impactos negativos ocorrerão ao meio ambiente.

Uma das formas adequadas de aproveitamento desses materiais se caracteriza como a utilização agrônômica, uma vez que os resíduos podem ser utilizados na fabricação de adubos orgânicos, na alimentação animal, como substrato para fermentações, como cobertura do solo e como matéria-prima para a agroindústria (GLÓRIA; RODELLA, 1992). Com o aumento do uso de resíduos orgânicos nas lavouras, Silva (2008) relatou ser possível reduzir a aplicação de fertilizantes minerais e melhorar a qualidade do solo, dada a sua atuação como condicionadores de solo. Além disso, o uso dessa matéria-prima para a produção de fertilizantes é um recurso estratégico que pode reduzir a dependência de fertilizantes minerais importados e viabilizar a sustentabilidade do crescimento da produção agrícola brasileira (IPEA, 2012).

Não há dúvidas de que o aproveitamento agrícola dos resíduos orgânicos constitui-se numa prática econômica e ambientalmente viável, devendo ser utilizada em detrimento do descarte. A utilização de resíduos na fertilização dos solos permite a recuperação de diversos elementos químicos, tais como N, P, K e elementos traço, além de contribuir, através da adição de matéria orgânica ao solo, com a melhoria da estrutura física e a da capacidade de absorção de água e de fornecimento de nutrientes para as plantas, aumentando a produção e melhorando a qualidade dos alimentos (IPEA, 2012).

São muitos os resíduos orgânicos de origens urbana, industrial e agrícola que podem ser usados na agricultura, podendo ser transformados em fertilizantes orgânicos de alto valor agregado. São exemplos: lodo de esgoto e de estações de tratamento de frigoríficos; esterco de origem animal; cama de frango; torta de filtro; vinhaça; bagaço de cana; casca de arroz; resíduos do processamento de frutos; entre outros.

Apesar das vantagens proporcionadas pelo uso de resíduos orgânicos, alguns desafios precisam ser superados, como o desequilíbrio de nutrientes frente às necessidades das culturas, a concentração de nutrientes relativamente baixa em comparação aos fertilizantes minerais, o grande volume de resíduos que encarece e dificulta o transporte e a distribuição de forma homogênea, o conhecimento técnico acerca da quantidade, época e modo de aplicação, além das preocupações ambientais (WESTERN; BICUDO, 2005).

A utilização, no solo, dos resíduos orgânicos deve obedecer critérios técnicos adequados, para evitar danos ao sistema solo-planta-animal, ou seja, atender as necessidades das culturas e não agredir o meio ambiente. Segundo Tedesco et al. (2008), a maioria dos resíduos de origem urbana, industrial e agrícola não deverão ser adicionados diretamente no solo, pois poderão causar impactos significativos no ambiente.

Resíduos das criações confinadas de aves e suínos, por exemplo, podem causar grandes impactos ambientais negativos devido ao seu alto potencial orgânico e elevado teor de nutrientes. Outro agravante, no caso dos dejetos de suínos, é a grande liberação de gases poluentes causadores do efeito estufa como o óxido nitroso, que contribui para o aquecimento global, além do descarte na forma líquida, demandando amplos sistemas de armazenamento e tratamento. Como muitas propriedades não têm infraestrutura necessária para armazenar, tratar e redistribuir os dejetos, a aplicação indiscriminada no solo resulta em contaminação ambiental.

A adição de materiais orgânicos é fundamental à qualidade do solo, caracterizando-se pela liberação gradativa de nutrientes, que reduz processos como lixiviação, fixação e volatilização (ZECH et al., 1997). Contudo, um fator a ser considerado na utilização de resíduos orgânicos na agricultura consiste no processo de mineralização, que depende da temperatura, umidade, textura e mineralogia do solo, além da composição química do material orgânico utilizado. Para que os nutrientes presentes nos resíduos orgânicos possam ser aproveitados pelas plantas, é necessário

que eles sejam mineralizados no solo, com exceção do K, que não faz parte da estrutura de compostos orgânicos e está prontamente disponível (GIACOMINI et al., 2003).

Assim, o manejo eficiente dos resíduos orgânicos para a adubação de cultivos agrícolas envolve o entendimento da dinâmica de mineralização dos nutrientes. Silva (2008) relata que a composição química e a velocidade de decomposição dos resíduos orgânicos determinam o que vai predominar no solo, se é a imobilização ou a mineralização. Em curto prazo, se a imobilização predominar sobre a mineralização, há um risco de haver deficiência de nutrientes, principalmente de N, para a cultura implantada em sequência à aplicação do resíduo.

Para evitar esse tipo de problema e diante da aplicação de grande quantidade de resíduos orgânicos necessária para atender as exigências nutricionais das plantas, resultando em elevados custos de transporte e aplicação, uma alternativa consiste na associação de fertilizantes minerais e orgânicos, constituindo uma formulação de fertilizante organomineral capaz de fornecer os nutrientes em sincronismo com a época de maior demanda das culturas.

#### **1.2.4 Fertilizante organomineral**

Na legislação brasileira, por meio da INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 23, DE 31 DE AGOSTO DE 2005, o fertilizante organomineral é definido como: “produto resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos”. No CAPÍTULO III da INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 25, DE 23 DE JULHO DE 2009, SEÇÃO V, Art. 8º, § 1º, são estabelecidas as atuais especificações, garantias e características dos fertilizantes organominerais sólidos para aplicação no solo. Segundo a referida IN, os fertilizantes organominerais sólidos deverão apresentar, no mínimo: carbono orgânico: 8%; CTC: 80 mmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>; macronutrientes primários isolados (N, P, K) ou em misturas (NP, NK, PK ou NPK): 10%; macronutrientes secundários: 5% e umidade máxima de 30%.

No Brasil, a fabricação de fertilizantes organominerais iniciou após sua incorporação na legislação brasileira, em 1982, mas na história da adubação, o emprego do fertilizante organomineral pode ser considerado recente, se comparado aos fertilizantes minerais, com cerca de 150 anos de experimentos (KIEHL, 2008). A cada ano, o mercado de produção de fertilizantes organominerais cresce em torno de 10%

(BENITES et al., 2010) e cada vez mais essa categoria de fertilizante tem sido empregada na agricultura brasileira.

Atualmente, a aplicação do fertilizante organomineral ao solo é feita sob duas formas: como uma formulação organomineral e como uma mistura de fertilizante mineral + orgânico (TEJADA; BENITEZ; GONZALEZ, 2005). A adição de fertilizantes minerais aos resíduos orgânicos reduz o impacto ambiental da atividade agropecuária, aumenta a fertilidade do solo e, ainda, reduz o uso de fertilizantes minerais, convertendo-se em uma série de ganhos para o produtor rural.

Quando comparado às fontes minerais ou compostos orgânicos, o fertilizante organomineral aumenta a interação planta-mineral por reduzir a adsorção de P (PARENT; KHIARI; PELLERIN, 2003), diminuir a transformação de  $P_2O_5$  em formas indisponíveis para a planta (IYAMUREMYE; DICK; BRAHAM, 1996; KHIARI; PARENT, 2005) e ativar a atividade de enraizamento precoce (LEE; BARTLETT, 1976).

Fernandes e Testezlaf (2002), avaliando a aplicação de fertilizante organomineral (biofertilizante) via água de irrigação, comparando-o com a fertirrigação convencional de adubos minerais na cultura do melão, observaram superioridade na produção de frutos com os produtos organominerais.

Tejada; Benitez e Gonzalez (2005), estudando as perdas por lixiviação de nutrientes de um solo tratado com fertilizante organomineral e combinação de fertilizante mineral + orgânico, verificaram que as perdas de N, P e K foram maiores no solo que recebeu a combinação dos fertilizantes. Os mesmos autores observaram que a aplicação do fertilizante organomineral resultou, no trigo, em aumento significativo no teor de proteína bruta, no número de grãos por espiga, no número de espigas por metro quadrado, no peso de 1000 grãos e no rendimento, comparativamente à combinação de fertilizante mineral + orgânico.

Em estudo que avaliou o efeito de dois sistemas de culturas, com e sem rotação de plantas de cobertura e associado a três fontes de adubação na disponibilidade de micronutrientes no solo, Steiner et al. (2011) verificaram aumento nos teores de cobre (Cu) e zinco (Zn) com adubação orgânica e organomineral, comparativamente à adubação mineral. Para compor o fertilizante organomineral, esses autores utilizaram formulação mineral associada a dejetos de suíno ou esterco de poedeira ou composto.

Zebarth et al. (2012) relataram que a adição de fertilizante mineral ao esterco durante a produção do fertilizante organomineral aumenta a concentração de nutrientes,

demandando menores taxas de aplicação no campo e que essas adições também aumentam a uniformidade nas concentrações e disponibilidade de nutrientes no produto final.

Além dos resultados positivos relatados anteriormente, Levrero (2009) citou os benefícios agrônômicos do fertilizante organomineral: melhor desenvolvimento radicular e retenção de água no solo; recuperação da flora microbiana; baixa propensão à erosão; menor acidificação do solo, com redução do uso de calcário; custo operacional mais baixo com aplicação conjunta do produto orgânico e do mineral.

Para Tejada; Benitez e Gonzalez (2005), a aplicação de um produto orgânico e um fertilizante mineral separadamente causa diversos problemas, como o alto custo de aplicação. No entanto, a aplicação combinada do fertilizante orgânico e mineral pode ser uma estratégia de manejo da fertilidade do solo em muitos países pois, além de aumentar o rendimento das culturas, tem-se maior efeito benéfico residual em relação ao uso de cada um dos fertilizantes, isoladamente (AKANDE et al., 2010). Nesse sentido, Kiehl (2008) afirmou que o fertilizante organomineral apresenta potencial químico reativo relativamente inferior ao fertilizante mineral, porém sua solubilização é gradativa no decorrer do período de desenvolvimento da cultura, quando sua eficiência agrônômica pode se tornar maior se comparado às fontes minerais solúveis.

Considerando que o fertilizante organomineral reúne uma série de atributos que conferem aumento na produção das culturas devido à ação da matéria orgânica favorecendo o melhor aproveitamento dos nutrientes minerais, nota-se que ainda há uma carência de estudos sobre a dinâmica de reação desse fertilizante nos solos, principalmente com relação à liberação de P e K e sua disponibilidade para as plantas.

## REFERÊNCIAS

- AKANDE, M. O.; et al. Response of Okra to Organic and Inorganic Fertilization. **Nature and Science**, [S.l.], v.8, n.11, 2010.
- ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. **Os adubos e a eficiência das adubações**, 3. ed. São Paulo: ANDA, 1998. 35 p. (Boletim Técnico, 3).
- ARAÚJO, A. P.; MACHADO, C. T. T. Fósforo. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 432 p.
- BEAUCLAIR, E. G. F. **Adubação verde e aplicação de matéria orgânica no cultivo da cana-de-açúcar**. In: REUNIÃO TÉCNICA AGRONÔMICA COPERSUCAR, 1984, São Paulo. São Paulo: Copersucar, 1984. p.40-48.
- BENITES, V.; et al. **Geração de Resíduos nos Sistemas de Produção de Suínos e Aves no Brasil**. 2010. Disponível em:  
<<http://www.cienciadosolo.com.br/tecnologia/18/geracao-de-residuos-nos-sistemas-de-producao-de-suinos-e-aves-no-brasil>>. Acesso em: 13 out. 2012.
- BERTOL, I.; et al. Aspectos financeiros relacionados às perdas de nutrientes por erosão hídrica em diferentes sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.133-142, 2007.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Brasil projeções do agronegócio 2011/2012 a 2021/2022**. Brasília: 2012.
- BRASIL. Ministério da Fazenda, Secretaria de Acompanhamento Econômico – SEAE - **Panorama do mercado de fertilizantes**, p.8-33, 2011.
- BÜLL, L. T.; et al. Eficiência agronômica de fertilizante fosfatado organo-mineral obtido através de compostagem com lixo urbano. **Cultura Agronômica**, Ilha Solteira, v.8, n.1, p.1-22, 1999.
- CAMPELLO, M.; et al. Avaliação da reversibilidade de fósforo não lábil para lábil em solos com diferentes características. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.18, n.2, p.157-165, 1994.
- DIAS, V. P.; FERNANDES, E. **Fertilizantes: uma visão global sintética**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.24, p.97-138, 2006.
- EMBRAPA CERRADOS, 2012. Disponível em:  
<<http://www.cpac.embrapa.br/unidade/apresentacao/>>. Acesso em: 23 jan. 2012.
- ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.551-594, 2007.



ERNANI, P. R.; STECKLING, C.; BAYER, C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.2, p.939-946, 2001.

FERNANDES, A. L. T.; et al. Avaliação do uso de fertilizantes organominerais e químicos na fertirrigação do cafeeiro irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.2, p.159-166, 2007.

FERNANDES, A. L. T.; TESTEZLAF, R. Fertirrigação na cultura do melão em ambiente protegido, utilizando-se fertilizantes organominerais e químicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.1, p.45-50, 2002.

GIACOMINI, S. J.; et al. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.38, p.1097-1104, 2003.

GLÓRIA, N. A. Uso agrônômico de resíduos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 22., 1992, Campinas. **Anais...** Campinas: Fundação Cargil, 1992, p.195-212.

GOEDERT, W. J.; SYER, J. K.; COREY, R. B. Relações quantidade - intensidade de potássio em solo do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.10, p.31-35, 1975.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estatísticas da produção agrícola**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/download/estatistica.shtm>> . Acesso em: 15 set. 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **LSPA – Levantamento Sistemático da Produção Agrícola do IBGE**. 2010.

IPEA - Comunicados do Ipea: **Plano Nacional de Resíduos Sólidos: diagnóstico dos resíduos urbanos, agrosilvopastoris e a questão dos catadores**. Brasília: IPEA, n.145, 2012.

ISHERWOOD, K. F. **Mineral fertilizer use and the environment**. International Fertilizer Industry Association, 1998.

IYAMUREMYE, E.; DICK, R. P.; BAHAM, J. Organic amendments and phosphorus dynamics: I. Phosphorus chemistry and sorption. **Soil Science**, Baltimore, v.161, p.436-443, 1996.

KHIARI, L.; PARENT, L. E. Phosphorus transformations in acid light-textured soils treated with dry swine manure. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.85, p.75-87, 2005.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes organominerais**. 2. ed. Piracicaba, Degaspari, 2008. 160 p.

- KIEHL, J. C. Distribuição e retenção da amônia no solo após a aplicação de uréia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, p.75-80, 1989.
- LEE, Y. S.; BARTLETT, R. J. Stimulation of plant growth by humic substances. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.40, p.479-576, 1976.
- LEVRERO, C. R. **Fertilizante organomineral: a serviço do mundo**. In: FÓRUM ABISOLO, 2009.
- LOPES, A. S.; COX, F. R. A survey of the fertility status of surface soils under cerrado vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, n.3, p.742-747, 1977.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: In: NOVAIS, R. F.; et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.
- LUPINACCI, F. **Estudo sobre a sazonalidade nas importações de fertilizantes no Brasil e dos valores de frete na rota Santos a Araçatuba**. Piracicaba, 2012. Trabalho de Iniciação Científica realizado no grupo ESALQ-LOG.
- MARTINHÃO, D.; SOUSA, G.; LOBATO, E. Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p.157-200. 2004.
- MEURER, E. J. Potássio. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 432 p.
- NACHTIGALL, G. R.; RAIJ, B. van. Análise e interpretação do potássio no solo. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 2005. p.93-118.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade de Viçosa, 1999, 399p.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.
- OLIVEIRA, R. P.; et al. Considerações sobre o uso do solo e a regionalização do balanço de potássio na agricultura brasileira. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Associação Brasileira da Potassa e do Fosfato, Piracicaba, 2005. 841 p.
- PARENT, L. E.; KHIARI, L.; PELLERIN, A. The P fertilization of potato: increasing agronomic efficiency and decreasing environmental risk. **Acta Horticulturae**, Leuven, v.627, p.35-41, 2003.

PROFETA, G. A.; BRAGA, M. J. Poder de Mercado na Indústria Brasileira de Fertilizantes NPK (04-14-08), no Período de 1993-2006. **RESR**, Piracicaba, v.49, n.04, p.837-856, 2011 – Impressa em Janeiro de 2012.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

REIS, G. L.; et al. Avaliação econômica da aplicação de fertilizantes Nitrogenados em pastagens destinadas a vacas em lactação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.3, p.730-738, 2010.

ROSOLEM, C. A.; et al. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, p.1033-1040, 2006.

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S. Potassium leaching from millet straw as affected by rainfall and potassium rates. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.36; p.1063-1074, 2005.

SAAB, A. A.; PAULA, R. de A. O mercado de fertilizantes no Brasil: diagnósticos e propostas de políticas. In: **Revista de Política Agrícola**, Ano XVII, n.2. Brasília: Secretaria Nacional de Política Agrícola, Companhia Nacional de Abastecimento, 2008. p.5-24.

SCHIAVONI, E. A.; et al. Influence of organic-mineral fertilization of an oxisol on soil chemical properties and *bracharia brizantha* production. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.2219-2226, 2011.

SILVA, C. A. Uso de resíduos orgânicos na agricultura. In: SANTOS, G. A.; et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metropole, 2008.

SILVA, R. M. O.; et al. Liberação de fósforo de fertilizantes organominerais e sua influência na fertilidade do solo. In: FERTBIO, 2010. **Anais...** Guarapari: SBCS, 2010. CD-ROM.

SIQUEIRA, K. B.; CARNEIRO, A. V. **Conjuntura do mercado agrícola**, 2012. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, ano 5, n.4, 2012.

SOUSA, D. M. G.; et al. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.205-274.

SOUZA, O.; SILVA, I. E. Resíduos e subprodutos agroindustriais. **Revista Veterinária In Foco**, Aracajú, 2002.

STEINER, F.; et al. Disponibilidade de micronutrientes no sistema plantio direto, na presença e ausência de plantas de cobertura submetido a diferentes fontes de fertilizantes. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v.4, n.1, p.28-37, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**, 3. ed, Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

- TAVARES, M. F. F.; HABERLI Jr, C. **O mercado de fertilizantes no Brasil e as influências mundiais**. ESPM: Central de Cases, 2011. 16 p.
- TEDESCO, M. J.; et al. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da material organic do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metropole, 2008.
- TEJADA, M.; BENITEZ, C.; GONZALEZ, J. L. Effects of Application of Two Organomineral Fertilizers on Nutrient Leaching Losses and Wheat Crop. **Agronomy Journal**, Madison, v.97, p.960-967, 2005.
- TIRITAN, C. S.; et al. Adubação fosfatada mineral e organomineral no desenvolvimento do milho. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v.6, n.1, p.08-14, 2010.
- WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.32, p.2297-2305, 2008.
- WESTERN, P. W.; BICUDO, J. R. Management considerations for organic waste use in agriculture. **Bioresource Technology**, Essex, London, v.96, n.2, p.215-221, 2005.
- WIETHÖLTER, S.; et al. Efeito de fertilizantes minerais e organominerais nos rendimentos de culturas e em fatores de fertilidade do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.9, n.5, p.713-724, 1994.
- ZEBARTH, B. J.; et al. Pelletized organo-mineral fertilizer product as a nitrogen source for potato Production. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.85, n.3, p.387-395, 2012.
- ZECH, W.; et al. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, n.3/4, p.117-161, 1997.

## **CAPÍTULO II**

### **FERTILIZANTE ORGANOMINERAL NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR**

## RESUMO

**TEIXEIRA, WELLDY GONÇALVES. Fertilizante organomineral na cultura da cana-de-açúcar.** 2013. 59f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>.

Para avaliar a eficiência de fertilizante organomineral em cana-de-açúcar e verificar a disponibilidade para a planta de P e K adicionados ao solo com essa fonte, foi instalado um experimento em vasos plásticos de 200 L preenchidos com 200 kg de um Latossolo Vermelho distrófico, textura muito argilosa, em área experimental da Universidade Federal de Uberlândia. O delineamento foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 2x3+1, com quatro repetições. Os tratamentos constaram da aplicação de duas fontes e três doses de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, mais um tratamento adicional, sem adubação. As fontes utilizadas foram: fertilizante mineral 4-20-20 e fertilizante organomineral 2-10-10 aplicadas, para efeito de comparação, em doses distintas para fornecer as mesmas quantidades de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O. Os fertilizantes foram incorporados em 100 kg de solo da porção superior de cada vaso e, em seguida, foram transplantadas três mudas da variedade IAC 95-5000. Aos 133 e 276 dias após a aplicação dos tratamentos (DAA), amostras de solo na camada de 0-0,2 m foram coletadas para determinação dos teores de P, P remanescente e K. O P disponível foi extraído pelos extratores Mehlich-1 e resina trocadora de íons. Aos 231 dias após o transplante, realizou-se a colheita de todas as plantas do vaso e foram avaliadas as seguintes características: teor de P e K na parte aérea total e nas partes da planta (folha + ponteiro + colmo + folha senescente), acúmulo de P, K e fitomassa seca na parte aérea total e nas partes da planta (ponteiro + colmo + folha senescente), produção de colmos, rendimento de açúcar e variáveis tecnológicas. Nas duas épocas de amostragem do solo, a resina apresentou maior capacidade de extração de P em relação ao Mehlich-1, que não detectou os teores de P disponível para a planta. As análises de P remanescente revelaram que, com o passar do tempo e com o fertilizante organomineral, ocorreu menor adsorção de P pelo solo. Na planta, independentemente das fontes, as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O promoveram aumento de: P (folha e ponteiro), K (folha), P acumulado (total, colmo e ponteiro), K acumulado e fitomassa seca (total, ponteiro, colmo e folha senescente). A produção de colmos e o rendimento de açúcar apresentaram aumentos decrescentes com o acréscimo das doses dos fertilizantes, com melhores resultados para o organomineral. Este fertilizante foi mais eficiente em todas as doses aplicadas, podendo substituir o fertilizante mineral e apresentar até 15% a mais de eficiência na produção de colmos de cana-de-açúcar.

**Palavras-chave:** Fertilização, *Saccharum* spp., fósforo, potássio.

---

<sup>1</sup>Professor Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer - UFU

## ABSTRACT

TEIXEIRA, WELLDY GONÇALVES. **Organomineral fertilizer in sugar-cane crop.** 2013. 59f. Dissertation (Master's degree in Agriculture / Soil Sciences) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>.

The efficacy of an organomineral fertilizer in sugar-cane and plant availability for P and K added to the soil with this source were evaluated in an experiment in 200-L plastic containers filled with 200 kg of a Dystrustox, at the experimental area of Universidade Federal de Uberlândia. The experimental design was randomized blocks as a 2x3+1 factorial, with four replications. Treatments consisted of two sources and three doses of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O, plus an additional treatment, with no fertilization. The sources used were: mineral fertilizer 4-20-20 and organomineral fertilizer 2-10-10 applied, for comparison purposes, in distinct doses to supply the same amounts of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O. The fertilizers were incorporated in 100 kg soil of the upper layer in each container and, subsequently, three sugar-cane seedlings variety IAC 95-5000 were transplanted. Soil samples of the top 0-0.2 m layer were collected 133 days and 276 days after treatment application (DAA) to determine the contents of P, remaining P and K. The extraction of available P was done with two extractors: Mehlich-1 and ion exchange resin. The plants were harvested 231 days after seedling transplanting to the containers, evaluating the following characteristics: content and accumulation of P and K in total shoot and in the parts of the plant (leaf + stalk tip + stalk + senescent leaves), accumulation of P, K and dry matter in total shoot and in the parts of the plant (stalk tip + stalk + senescent leaves), stalk production, sugar yield and technological variables. Resin presented greater P extraction capacity in the two soil sampling dates in relation to Mehlich-1, which failed to detect the P content available to the plant. The analysis of remaining P revealed that, with time and with the organomineral fertilizer, less P adsorption occurred by the soil. In the plant, regardless of sources, doses of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O increased: P (leaf and stalk tip), K (leaf), P accumulation (total shoot, stalk tip and stalk), K accumulation and dry matter (total shoot, stalk tip, stalk and senescent leaves). Stalk production and sugar yield presented decreasing increments as the fertilizer doses increased, with best results for the organomineral fertilizer. This fertilizer was more effective in all doses used, and can substitute the mineral fertilizer, presenting up to 15% greater efficacy in sugar-cane stalk production.

**Keywords:** Fertilization, *Saccharum* spp., phosphorus, potassium.

---

<sup>1</sup>Supervisor: Gaspar Henrique Korndörfer - UFU

## 2.1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) possui grande destaque na economia nacional, colocando o Brasil na posição de líder mundial na produção de açúcar, sendo também o maior produtor mundial de etanol de cana. As estimativas do 3º Levantamento da safra 2012/13, realizado pela Conab em dezembro de 2012, indicam que serão moídas cerca de 595,13 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Desse total, 50,4% serão destinados à produção de açúcar, enquanto o restante (49,6%) será utilizado para a produção de etanol.

Anualmente, a cana-de-açúcar consome cerca de 13% do total de fertilizantes minerais utilizados no Brasil, ocupando o segundo lugar em consumo de fertilizantes entre as culturas com cultivos em grandes extensões de áreas, ficando atrás apenas da soja. Considerada uma cultura de elevada capacidade de extração de nutrientes do solo, a cana-de-açúcar é muito exigente em N e K. Para produzir uma tonelada de cana, considerando-se colmo + folhas + palmito, as quantidades de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O extraídas são, respectivamente, 0,96 kg, 0,29 kg e 1,19 kg (MALAVOLTA; VITTO; OLIVEIRA, 1997).

Estudos recentes com cultivares de cana-de-açúcar mostram diferenças na ordem de extração dos nutrientes. Coleti et al. (2006), estudando as variedades RB83-5486 e SP81-3250, em dois Argissolos Vermelhos, constataram, para cana-planta, a seguinte ordem de extração: K > N > S > P > Mg > Ca. Tasso Junior et al. (2007), trabalhando com cinco variedades de cana de maturação precoce, mostraram que a extração de macronutrientes, tanto para colmos quanto para palha, ocorreu na seguinte ordem decrescente: K<sub>2</sub>O > N > SO<sub>4</sub> > MgO > CaO > P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, com as maiores extrações verificadas para K<sub>2</sub>O e N. Oliveira (2011), avaliando o estado nutricional da cana-de-açúcar, observou a seguinte ordem de extração: em cana-planta, K > N > Ca > S > Mg > Fe > P > Mn > Zn > B > Cu e em cana-soca, K > N > Ca > Mg > S > P = Fe > Mn > Zn > B > Cu.

Verifica-se, na maioria das pesquisas, que as principais extrações ocorrem para K e N, sendo de grande importância o manejo da adubação com esses dois nutrientes, visto que eles são absorvidos e exportados em maiores quantidades pela cana-de-açúcar (MALAVOLTA, 1981). Mesmo extraindo elevadas quantidades de N, a cana-planta apresenta normalmente baixas respostas à adubação nitrogenada, quando comparada à cana-soca, a qual responde a doses maiores, principalmente em solos argilosos



(ORLANDO FILHO et al., 1993). A explicação para essa questão é que a cana-planta utiliza outras fontes de N apresentando, com isso, baixa eficiência de utilização desse nutriente contido no fertilizante (ROSSETO; DIAS, 2005).

Diferentemente do N, a cana-de-açúcar responde de forma satisfatória ao emprego do K na adubação de plantio, sendo esse o macronutriente mais extraído pela planta (ROSSETO et al., 2010a). No entanto, deve-se considerar a CTC do solo que, se for baixa, o nutriente não é muito retido, além do efeito salino que pode ser causado pela aplicação de doses elevadas. Segundo Korndörfer, Ribeiro e Alcarde (1999), a dose de K pode variar desde 0 até 140 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O.

Em relação aos aspectos nutricionais, o K exerce função-chave na cana-de-açúcar, atuando como ativador enzimático e participando de muitos processos metabólicos relacionados com a fotossíntese (ROSSETO et al., 2010a). Esse nutriente possui importante ação na translocação de sacarose (RODRIGUES, 1995) e, por promover maior ganho de produtividade, o K também promove maior quantidade de sacarose por área cultivada (ROSSETO et al., 2010a). No entanto, o excesso não é desejável para a fabricação do açúcar, pois como é o maior constituinte das cinzas, estas, em alta concentração no caldo, dificultam a cristalização, reduzindo o rendimento industrial de açúcar (RODRIGUES, 1995).

O P, por sua vez, é o nutriente que as plantas requerem em menor quantidade. Mesmo assim, em cana-de-açúcar, o P assume grande importância na qualidade da matéria-prima, sendo que teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> acima de 0,3 g kg<sup>-1</sup> facilitam a clarificação do caldo e garantem melhor qualidade do produto final, o açúcar (KORNDÖRFER, 2004). ROSSETO et al. (2010b) afirmam que o P promove a formação inicial e o desenvolvimento da raiz, o crescimento e maior absorção e utilização de todos os demais nutrientes.

Nas adubações, o P possui baixo aproveitamento pela planta, devido à forte afinidade do ânion H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> pela superfície dos colóides, como os óxidos de Fe e Al, o que resulta em necessidade de doses muito mais elevadas. Korndörfer, Faria e Martins (1998) recomendam, para solos ácidos como os de Cerrado, a dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para maior retorno econômico, quando se considera a produção acumulada de cana-planta + cana-soca.

Reis Jr. e Monnerat (2002), avaliando o estado nutricional de lavouras de cana-de-açúcar, apontaram o K e o P como potenciais nutrientes limitantes à produção nessa cultura. Vale et al. (2011), avaliando a omissão de macronutrientes na nutrição e no

crescimento da cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva, verificaram, após onze semanas do transplante das plantas para a solução, que N e P foram os nutrientes mais limitantes para o crescimento das mesmas.

Diante da importância dos nutrientes para a cana-de-açúcar e do elevado custo com fertilizantes minerais para atender a demanda da planta, a combinação de nutrientes de origem mineral e orgânica, resultando nos fertilizantes organominerais, pode reduzir a dependência de nutrientes de base mineral e promover ganhos de produção para a cultura. Verifica-se que são incipientes os trabalhos que abordam o fornecimento de P e K com fertilizante organomineral em cana-de-açúcar e seus efeitos na disponibilidade desses nutrientes no solo, na produção e na qualidade tecnológica da cultura.

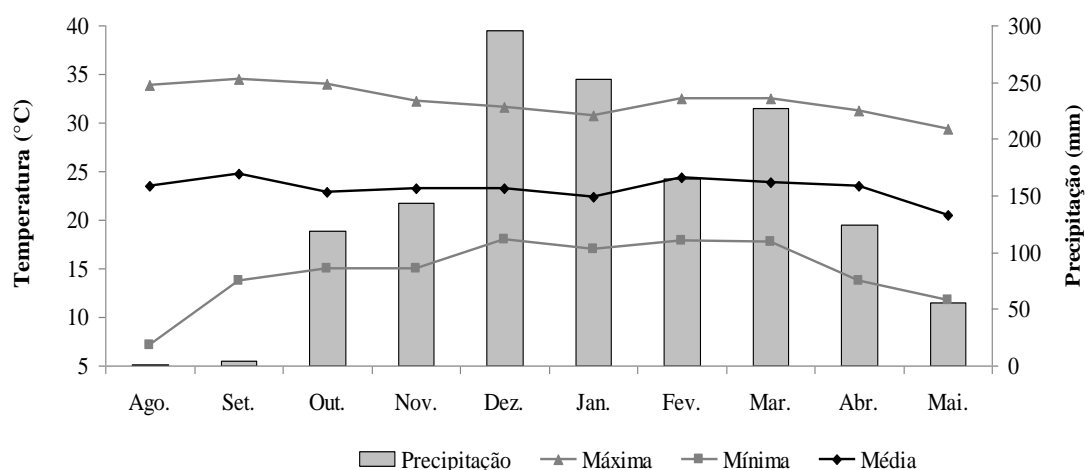
Por esta razão, realizou-se este trabalho com o objetivo de avaliar a eficiência agronômica de fertilizante organomineral em cana-de-açúcar e verificar a disponibilidade para a planta de P e K adicionados ao solo por esse fertilizante.

## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.2.1 Caracterização do ambiente experimental

O trabalho foi conduzido em área experimental da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), no período de 09/08/2011 a 28/03/2012, em Uberlândia, MG.

Os dados de precipitação acumulados e temperaturas médias durante a condução do experimento são apresentados na Figura 1. Os dados foram coletados pela Estação climatológica situada no Campus Santa Mônica (UFU), distante cerca de 5 km do local onde foi instalado o experimento. Esta estação climatológica faz parte da rede de estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), 5º Distrito de Meteorologia (5º DISME), órgão ligado ao Ministério da Agricultura.



**FIGURA 1.** Médias mensais de precipitação pluviométrica e temperatura (máxima, mínima e média) registradas durante o período experimental (agosto/2011 a maio/2012). Dados da estação climatológica localizada na Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica, em Uberlândia, MG.

### 2.2.2 Caracterização química e física do solo

A cana-de-açúcar, variedade IAC 95-5000, foi plantada em vasos plásticos de 200 L, preenchidos com aproximadamente 200 kg de um solo originalmente classificado como Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (EMBRAPA, 2006), de textura muito argilosa e mineralogia caulínica (CORRÊA; JACOMINE; KER, 2011). O solo foi coletado em torno de 5 m de profundidade em uma área de campo nativo, sem antecedentes de uso agrícola ou pecuário, na Fazenda Experimental do Glória, da

Universidade Federal de Uberlândia, em Uberlândia, MG. A caracterização química do solo antes da correção de sua acidez e a caracterização física constam nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

**TABELA 1.** Caracterização química das amostras do Latossolo Vermelho distrófico (LVd) utilizado no cultivo da cana-de-açúcar.

pH	P- res	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m	M.O.
	-mg dm <sup>-3</sup> -		-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----							--%--		g kg <sup>-1</sup>
4,8	1,5	52	0,3	0,1	0,0	2,0	0,53	0,53	2,5	21	0	9,0

pH – CaCl<sub>2</sub>; P - Extrator resina de troca catiônica; Ca, Mg e Al - Extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; K - Extrator Mehlich (HCl 0,05 N + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 N); t - CTC efetiva; T - CTC potencial (a pH 7,0); V - saturação por bases; m - saturação por alumínio (Embrapa, 1999). Mo – método colorimétrico.

**TABELA 2.** Caracterização física das amostras do Latossolo Vermelho distrófico (LVd) utilizado no cultivo da cana-de-açúcar.

Areia total	Silte	Argila
	-----g kg <sup>-1</sup> -----	
238	137	625

### 2.2.3 Caracterização da variedade

A variedade IAC 95-5000 (SP84-2066 x SP80-185) apresenta produção agrícola muito alta, porte muito ereto e ótima brotação de soqueira. Possui bom perfilhamento e fechamento de entrelinhas, não apresentando tombamento e florescimento e, ainda, apresentando resistência às principais doenças. O período de colheita recomendado varia de junho a outubro.

### 2.2.4 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados em esquema fatorial 2x3+1, com quatro repetições. Os tratamentos constaram da aplicação de duas fontes e três doses de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, mais um tratamento controle (tratamento adicional), que não recebeu adubação. As fontes foram: fertilizante mineral, formulação 4-20-20 e fertilizante organomineral, formulação 2-10-10, aplicadas, para efeito de comparação, em doses distintas para fornecer as mesmas quantidades de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O (TABELA 3).

**TABELA 3.** Tratamentos aplicados à cana-planta.

	Doses dos fertilizantes -----kg ha <sup>-1</sup>	Doses de N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O -----	Qtde do fertilizante g parcela <sup>-1</sup>
Controle	0	-	0
Mineral	400	16-80-80	40
Mineral	600	24-120-120	60
Mineral	800	32-160-160	80
Organomineral	800	16-80-80	80
Organomineral	1200	24-120-120	120
Organomineral	1600	32-160-160	160

### 2.2.5 Caracterização das fontes

O fertilizante mineral foi composto por uréia, superfosfato triplo (STP) e KCl como fontes de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente. No fertilizante organomineral, o fosfato monoamônico (MAP) foi utilizado como fonte de N e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, juntamente com o KCl, utilizado como fonte de K<sub>2</sub>O.

O fertilizante organomineral foi produzido pela empresa Geociclo Biotecnologia S/A, com sede em Uberlândia, MG, a partir de torta de filtro proveniente da Usina Jalles Machado S/A, situada em Goianésia, GO. A produção desse fertilizante envolveu, inicialmente, a compostagem do resíduo orgânico (torta de filtro) por meio de um processo aeróbio de decomposição controlada que durou, em média, 20 dias. Para reduzir o período de compostagem, foram utilizados coquetéis de nutrientes e micro-organismos (fungos e bactérias) como bioaceleradores do processo de decomposição, capazes de proporcionar, em poucos dias, a obtenção de um composto estabilizado. Após a obtenção do composto, foram adicionadas as fontes minerais visando o balanço dos nutrientes. Em seguida, o material foi homogeneizado e peletizado.

A caracterização físico-química do fertilizante organomineral utilizado neste estudo é apresentada na Tabela 4.

Os pellets produzidos possuem como uma das principais vantagens o elevado grau de dureza (8 kgf cm<sup>-2</sup>, medido em durômetro modelo 298 DGP, Ethiktechnology), o que significa alta resistência à quebra, impedindo a formação de partículas desuniformes. A proteção física exercida pela matéria orgânica, formando uma matriz orgânica porosa ao redor dos nutrientes, é outra vantagem do fertilizante organomineral utilizado no experimento, pois impede o contato direto dos nutrientes solúveis com o solo, evitando perdas por lixiviação e fixação.

**TABELA 4.** Parâmetros físico-químicos do fertilizante organomineral utilizado no cultivo da cana-de-açúcar.

DETERMINAÇÕES	BASE ÚMIDA	BASE SECA 65°-110°C
pH em CaCl <sub>2</sub>	5,52	-
Densidade (g cm <sup>-3</sup> )	0,8107	-
Umidade perdida entre 65 e 110°C (%)	13,90	-
Matéria Orgânica Total (combustão) (%)	29,91	34,74
Matéria Orgânica Compostável (%)	12,22	14,19
Matéria Org. Resistente à Compost. (%)	17,69	20,55
Carbono Orgânico (%)	9,36	10,87
Nitrogênio Total (%)	2,0	3,45
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) total (%)	10,96	12,73
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) sol. CNA(%)	10,0	12,33
Potássio (K <sub>2</sub> O) total (%)	10,0	12,0
Capacidade de Troca Catiônica (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	19,4	22,5
Relação C/N (C orgânico e N Total)	-	3/1

### 2.2.6 Instalação do experimento

Após a coleta e análise química do solo, foi realizada a correção de sua acidez, em cada vaso, com a aplicação de 142,6 g de CaCO<sub>3</sub> e 56 g de MgCO<sub>3</sub>, na tentativa de elevar os teores de Ca e Mg de acordo com as exigências da cultura da cana-de-açúcar ( $X = 3,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). Para a incubação do solo, que durou 67 dias, cada vaso recebeu uma quantidade de água equivalente a cerca de 70% da capacidade de campo, o que correspondeu aproximadamente a 20 L de água, a fim de se promover a reatividade dos corretivos adicionados.

Após o período de incubação, realizou-se a aplicação dos tratamentos, com incorporação dos fertilizantes na porção superior do vaso equivalente a 100 kg de solo. Juntamente com os tratamentos, aplicou-se 100 kg ha<sup>-1</sup> de um coquetel de micronutrientes (FTE BR-12), com a seguinte composição: 9% Zn; 7,1% Ca; 5,7% S; 2% Mn; 1,8% B; 0,8% Cu; 0,1% Mo (RAIJ et al., 1996).

Com 32 dias após a aplicação dos tratamentos, realizou-se o transplântio de três mudas de cana-de-açúcar para cada vaso, variedade IAC 95-5000, com aproximadamente 0,20 m de altura (FIGURA 2). As mudas foram fornecidas pelo

Centro de Cana/IAC, localizado em Ribeirão Preto, SP, aos 40 dias após o plantio das gemas.



**FIGURA 2.** Mudanças de cana-de-açúcar, variedade IAC 95-5000, após o transplante para vasos de 200 L.

### 2.2.7 Práticas culturais e condução do experimento

Aos 34 dias após o transplante das mudas, realizou-se a adubação de cobertura, com aplicação de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N sob a forma de sulfato de amônio (20% de N). Na fase inicial de desenvolvimento da cultura (três meses após o transplante), foram aplicados  $3 \text{ kg ha}^{-1}$  de boro (B), na forma de ácido bórico e  $150 \text{ g ha}^{-1}$  de molibdênio (Mo), na forma de molibdato de sódio, para correção das deficiências.

A umidade do solo foi mantida próximo de 70% da capacidade de campo, por meio de irrigações periódicas por gotejamento superficial, como mostra a Figura 3.



**FIGURA 3.** Vista da área experimental com sistema de irrigação por gotejamento superficial.

## 2.2.8 Avaliações experimentais

### 2.2.8.1. Variáveis de produção

Aos 231 dias após o transplante das mudas, realizou-se a colheita da cana-planta, manualmente, cortando-se todos os colmos de cada parcela rente ao solo. A parte aérea da planta foi subdividida em ponteiros, folhas, folhas senescentes e colmos, sendo as folhas constituídas pela primeira folha desenvolvida de cada planta, ou seja, com a lígula completamente exposta, denominada folha TVD (*Top Visible Dewlap*).

Após a subdivisão, os ponteiros e colmos foram pesados para obtenção da massa fresca por parcela e da produção (kg vaso<sup>-1</sup>), no caso dos colmos. Em seguida, subamostras do material vegetal fresco de ponteiros e colmos foram coletadas, pesadas, grosseiramente trituradas em forrageira e submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até peso constante.

Levando em consideração a massa fresca e a umidade existente, quantificou-se o acúmulo de fitomassa seca de ponteiros e colmos por parcela. As folhas senescentes tiveram sua fitomassa seca determinada diretamente por meio de pesagem do material vegetal imediatamente após a coleta, sendo selecionada uma subamostra para secagem em estufa e posterior análise química.

Para o ajuste da produção de colmos e rendimento de açúcar da cana-planta em função das doses dos fertilizantes, foi utilizado o modelo não-linear de Mitscherlich (eq. 1), que descreve a lei dos retornos decrescentes, a qual está bem elucidada em Pimentel-Gomes (1990).

$$y = A [1 - 10^{-c(x+b)}] \quad (1)$$

em que  $y$  representa a produção de colmos e/ou o rendimento de açúcar,  $A$  representa a produção e/ou rendimento máximo possível quando se aumenta indefinidamente a dose do fertilizante,  $c$  é o coeficiente de eficácia do nutriente,  $b$  é o teor do nutriente contido no solo em forma assimilável pelas plantas e  $x$  é a dose de fertilizante, em kg ha<sup>-1</sup>.

Para expressar o rendimento de açúcar (g vaso<sup>-1</sup>), multiplicou-se o teor de Pol da cana pela produção de colmos.



### **2.2.8.2 Variáveis tecnológicas**

Logo após o corte das plantas rente ao solo, os colmos foram enviados ao laboratório de análises tecnológicas da usina sucroalcooleira Delta, localizada em Volta Grande, MG, sendo triturados em forrageira. Posteriormente, efetuaram-se no colmo as análises tecnológicas de concentração de sólidos solúveis presentes no caldo (Brix), teor de sacarose expresso por Pol do caldo, teor de açúcares redutores no caldo (AR) e teor de fibra. De posse desses resultados, procedeu-se aos cálculos da pureza e teor de sacarose na cana expresso por Pol da cana. As análises tecnológicas seguiram a metodologia descrita por Glória e Rodella (1972) e Copersucar (1980).

### **2.2.8.3 Análise química do material vegetal**

Após a obtenção da fitomassa seca de ponteiros, folhas senescentes e colmos, as subamostras, incluindo as folhas (TVD), foram moídas em moinho tipo Willey para as determinações de P e K em cada parte da planta. Segundo a metodologia proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (2009), os nutrientes foram extraídos com solução digestora nitroperclórica ( $\text{HNO}_3$  e  $\text{HClO}_4$ ), sendo o P determinado por colorimetria e o K, por fotometria de chama.

Multiplicando o teor do nutriente ( $\text{g kg}^{-1}$ ) encontrado em cada subamostra pela matéria seca ( $\text{kg vaso}^{-1}$ ) produzida por cada parte da planta, obteve-se o acúmulo de cada nutriente ( $\text{g vaso}^{-1}$ ) nos ponteiros, folhas senescentes e colmos.

### **2.2.8.4 Análise química do solo**

Amostras de solo foram coletadas por meio de trado calador na camada de 0-0,2 m (FIGURA 4), em duas épocas durante o ciclo da cana-planta, 09/11/2011 e 02/04/2012, correspondentes a 133 dias e 276 dias após a aplicação dos tratamentos (DAA), respectivamente.

Efetuuou-se a amostragem do solo aleatoriamente em cada época, coletando-se três subamostras de solo por vaso, para compor uma amostra composta. Após a coleta, o solo das amostras foi seco em estufa de circulação forçada de ar a  $60^\circ\text{C}$ , peneirado em malha de 2 mm e armazenado para as análises de P e K. Foram determinados os teores de P, K e P remanescente.



**FIGURA 4.** Coleta de solo na camada de 0-0,2 cm com trado calador.

O P disponível foi extraído por resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001) e Mehlich-1, assim como o K trocável (EMBRAPA, 1999).

Para avaliar a capacidade de adsorção de P no solo, foi realizada a análise de P remanescente, que mede a quantidade de P que permanece em solução de equilíbrio em resposta a uma concentração de P adicionada ao solo. O P remanescente foi determinado através da agitação de 5 cm<sup>3</sup> de terra fina seca ao ar, por 1 h, com solução preparada com 50 mL de CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> contendo 60 mg L<sup>-1</sup> de P, segundo metodologia preconizada por Alvarez V. et al. (2000).

### **2.2.9 Equivalente em fertilizante mineral**

A eficiência agrônômica do fertilizante organomineral foi avaliada por meio do cálculo do equivalente em fertilizante mineral (EqM).

O EqM foi calculado da seguinte forma: nos modelos de Mitscherlich ajustados à produção de colmos da cana-planta com o fertilizante organomineral, substituiu-se na variável y a produção obtida com o fertilizante mineral. Dessa forma, calculou-se qual a dose equivalente de organomineral para obter a mesma produção de colmos que foi obtida com o fertilizante mineral.

### **2.2.10 Análises estatísticas**

Os dados obtidos foram inicialmente testados quanto às pressuposições de normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade entre as variâncias

(teste de Levene), utilizando o programa SPSS versão 17.0. Para atender aos pressupostos, apenas os dados de P e K no solo e K na folha senescente foram logaritimizados [ $\ln(x+1)$ ], além do P na folha senescente, transformado para raiz  $x+1$ .

Para comparação das fontes entre si (mineral e organomineral), foi aplicado o teste de Tukey e as médias dos tratamentos que receberam adubação foram comparadas à média do tratamento controle pelo teste de Dunnett, utilizando o programa ASSISTAT (SILVA; AZEVEDO, 2009). Modelos de regressão foram ajustados para avaliação das doses dos fertilizantes, por meio do programa SISVAR (FERREIRA, 2000).

O efeito do tempo sobre a disponibilidade de P e K no solo foi avaliado considerando o arranjo experimental de parcelas subdivididas no tempo. As parcelas foram constituídas por um fatorial  $2 \times 3 + 1$ , representado pelos dois fertilizantes (mineral e organomineral) e pelas três doses, além do tratamento controle. As subparcelas foram as duas épocas de coleta de solo (133 e 276 DAA).

À produção de colmos e ao rendimento de açúcar da cana-planta, foram ajustados modelos não-lineares de Mitscherlich para cada fonte, por meio do programa SAEG (2007).

Para estudar os teores de P no solo e na planta, foram utilizadas as doses de  $P_2O_5$  e para estudar os teores de K no solo e na planta, foram utilizadas as doses de  $K_2O$ , em razão das doses distintas dos fertilizantes para fornecer as mesmas quantidades de N,  $P_2O_5$  e  $K_2O$ . O acúmulo de fitomassa seca, a produção de colmos, o rendimento de açúcar e as variáveis tecnológicas foram estudados com base nas doses dos fertilizantes, representadas por D1, D2, D3 e D4 que corresponderam, respectivamente, a 0, 400, 600 e 800  $kg\ ha^{-1}$  do fertilizante mineral e 0, 800, 1200 e 1600  $kg\ ha^{-1}$  do fertilizante organomineral.

Todas as análises foram realizadas com  $\alpha = 0,05$  como valor de significância. Os gráficos foram construídos no programa SIGMAPLOT (2008).

## 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.3.1 Fósforo disponível no solo

A disponibilidade de P no solo, dada pelos teores de P extraídos por Mehlich-1 e resina, aumentou linearmente com o aumento das doses de  $P_2O_5$ , independentemente da fonte utilizada, aos 133 DAA. Observa-se que a resina apresentou maior inclinação da reta, com aumento de  $0,07 \text{ mg dm}^{-3}$  de P para cada  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  aplicado, enquanto na extração por Mehlich-1, cada  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  gerou incremento de  $0,03 \text{ mg dm}^{-3}$  de P (FIGURA 5).

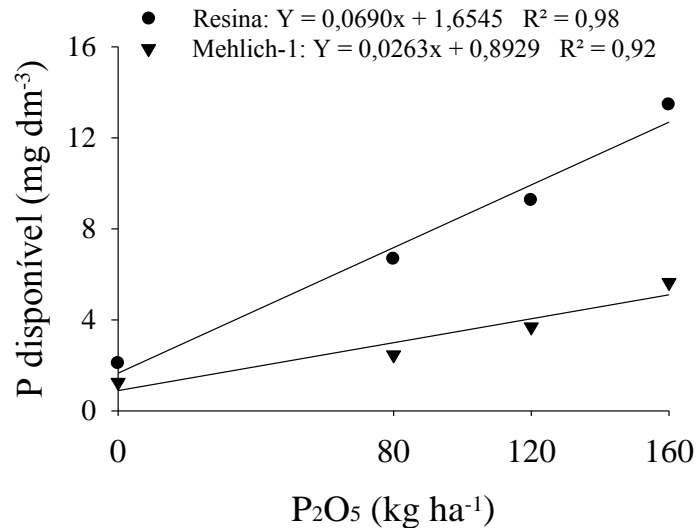
Considerando as equações de regressão para o P disponível pelos dois extratores aos 133 DAA, verifica-se boa capacidade preditiva dos modelos, cujos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) explicam 98% e 92% da variação da disponibilidade de P no solo em função das doses de  $P_2O_5$ , respectivamente, por resina e Mehlich-1 (FIGURA 5). Este resultado revela que a eficiência dos extratores foi semelhante em determinar a disponibilidade de P no solo na primeira época de amostragem.

Observa-se ainda que não houve diferença entre as fontes, o que revela que, aos 133 DAA, havia no solo teores similares de P disponível com a aplicação dos dois fertilizantes. Nessa época de amostragem, o efeito de liberação gradual de nutrientes proporcionado pela decomposição da matéria orgânica ainda não havia se manifestado e o P liberado do fertilizante organomineral provavelmente teve sua origem na fração mineral dessa fonte, representada pelo MAP que, por ser uma fonte solúvel, libera o P logo após sua aplicação no solo.

De forma análoga, o P proveniente do fertilizante mineral, cuja fonte de  $P_2O_5$  foi o STP, também foi liberado logo após sua adição ao solo e, com isso, as diferenças entre os fertilizantes foram atenuadas, face a maior solubilidade das fontes fosfatadas utilizadas para compor as formulações mineral e organomineral avaliadas neste estudo.

Quando fosfatos solúveis são adicionados ao solo, reagem com maior intensidade, incrementando rapidamente a fração de P disponível. No caso dos fertilizantes organominerais, a liberação de P ocorre mais lentamente em razão da decomposição da matéria orgânica necessária para transferir o nutriente presente na forma orgânica para a forma mineral. Por isso, o fertilizante organomineral comportou-se de modo semelhante ao mineral na primeira época de amostragem (133 DAA), quando havia matéria orgânica para ser mineralizada.

Lana et al. (2009), avaliando a disponibilidade de P com a aplicação de fertilizante organomineral e mineral em doses variando de 0 a 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, também observaram acréscimos lineares nos teores de P em um solo argiloso com a aplicação de ambas as fontes.



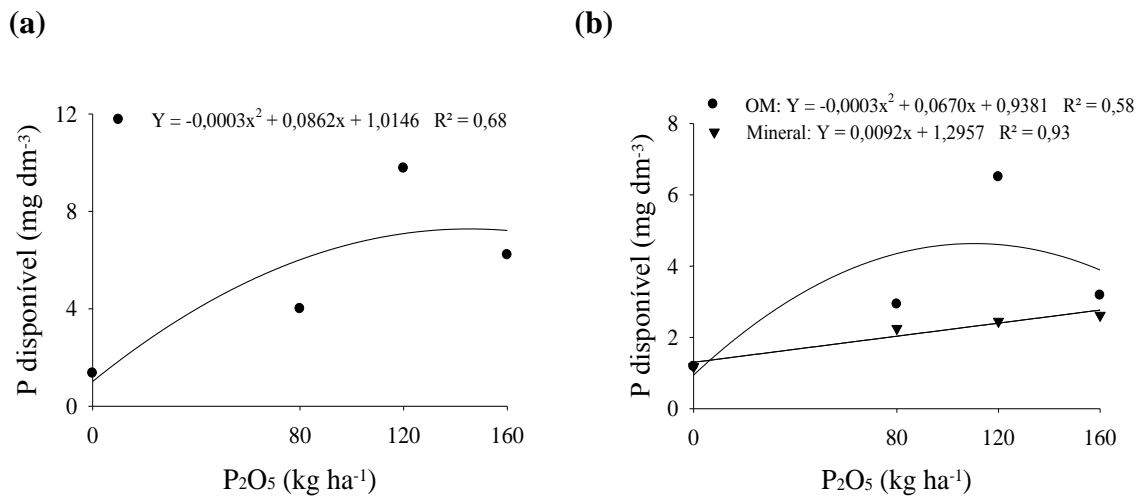
**FIGURA 5.** Teores de P disponível no solo pelos extratores resina e Mehlich-1, aos 133 dias após a aplicação de doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores médios das duas fontes. Dados transformados para ln (x+1).

Aos 276 DAA, a extração de P pela resina apresentou resposta quadrática ao aumento das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, independentemente da fonte, com o máximo teor de P disponível (7,2 mg dm<sup>-3</sup>) com a aplicação de 143 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (FIGURA 6a).

O extrator Mehlich-1, por outro lado, detectou diferenças entre as fontes quanto à disponibilidade de P aos 276 DAA. Houve interação entre doses e fontes de P, com aumento linear da disponibilidade desse elemento em função das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> com o fertilizante mineral, enquanto a disponibilidade de P com o fertilizante organomineral apresentou comportamento quadrático, sendo o máximo teor disponível (5,0 mg dm<sup>-3</sup>) obtido com a aplicação de 112 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (FIGURA 6b).

As respostas distintas detectadas por Mehlich-1 entre as fontes utilizadas neste experimento, com menor extração de P quando foi aplicado o fertilizante mineral aos 276 DAA, se devem à redução do P solúvel no solo, que foi fixado no início, logo após a aplicação dessa fonte. De outro lado, a maior extração de P observada com a aplicação do fertilizante organomineral aos 276 DAA revela o efeito da liberação gradual de nutrientes por essa fonte, com menor fixação do elemento no início e maior

disponibilidade no solo com o passar do tempo, à medida que ocorre a mineralização da matéria orgânica.



**FIGURA 6.** Teores de P disponível no solo pelos extratores resina (a) e Mehlich-1 (b), aos 276 dias após a aplicação de doses de  $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores disponíveis por resina representam a média das duas fontes. Dados transformados para  $\ln(x+1)$ .

A disponibilidade de P no solo pelos dois extratores em função do tempo, independentemente das fontes e doses de  $P_2O_5$  utilizadas, é apresentada na Figura 6. Verifica-se que a resina apresentou maior capacidade de extração de P em relação ao Mehlich-1 nas duas épocas de amostragem do solo, com os teores variando de 9,8  $mg \, dm^{-3}$ , aos 133 DAA, a 6,7  $mg \, dm^{-3}$ , aos 276 DAA, enquanto para Mehlich-1, os teores oscilaram entre 3,9 e 3,3  $mg \, dm^{-3}$ , de 133 a 276 DAA, respectivamente. Essa diferença pode estar relacionada à maior extração de P pela resina em relação ao Mehlich-1, quando são utilizados solos com altos teores de argila, como o solo utilizado neste experimento ( $625 \, g \, kg^{-1}$ ) (TABELA 2), o que também foi verificado por Rheinheimer et al. (2003), que afirmam que o método de extração de P é sensível à textura do solo.

Em solos argilosos, a quantidade de P extraída por Mehlich-1 é menor pois, com o aumento do teor de argila, a capacidade extrativa diminui devido ao consumo de íons  $H^+$  e sulfato do extrator pelos grupos funcionais não ocupados pelo P nos colóides inorgânicos e também pela readsorção de P aos colóides durante a extração (BAHIA FILHO et al., 1983; CAJUSTE; KUSSOU, 1974). Outro problema do extrator ácido é a superestimativa da disponibilidade de P em solos previamente adubados com fosfatos

naturais, apresentando resultados excessivamente altos (RAIJ; QUAGGIO; SILVA, 1986).

Assim, o elevado teor de argila associado ao efeito da calagem na correção do pH do solo utilizado neste experimento, atingindo pH em água de 6,6 (TABELA 1), explicam as maiores extrações de P pela resina, evidenciando a maior sensibilidade desse extrator em solos argilosos. O mesmo comportamento dos extratores também foi observado por Silva e Raij (1999), Miranda et al. (2002) e Bortolon; Schlindwein e Gianello (2009).

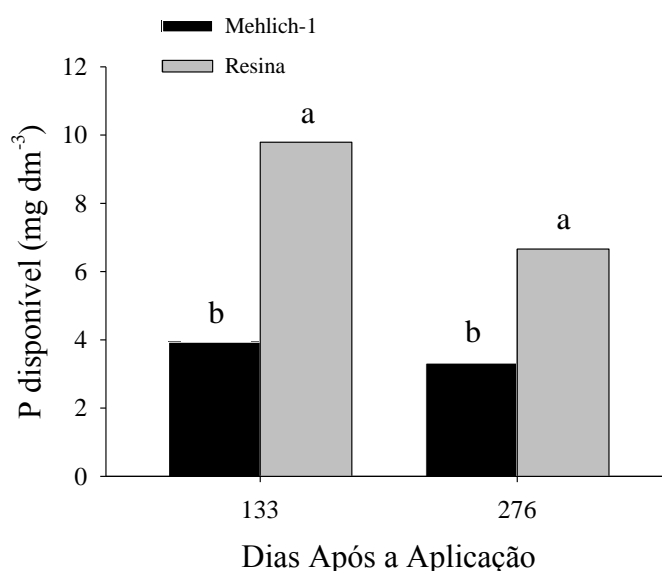
Da primeira para a segunda época de amostragem, observa-se uma redução de 32% nos teores de P extraídos pela resina, enquanto os teores extraídos por Mehlich-1 tiveram uma redução de apenas 15% (FIGURA 7). Este resultado também evidencia a menor extração de P pelo extrator ácido, o que leva ao destaque do método da resina, devendo ser recomendado em relação ao Mehlich-1 nas condições deste experimento. Pode ter ocorrido diminuição de fosfato lábil no solo, passando gradativamente a fosfato não-lábil com o passar do tempo (RAIJ, 2011), o que Novais e Smyth (1999) chamaram de “envelhecimento do fósforo” à medida que aumenta o tempo de equilíbrio das formas inicialmente solúveis de P com o solo.

Kamprath et al. (1980) citado por Raij (2004) relataram que o princípio de extração do Mehlich-1 é a dissolução ácida dos compostos fosfatados de fraca energia, dissolvendo predominantemente o P ligado ao Ca e quantidades menores de P ligado a Fe e Al, em função das características de solubilidade dos fosfatos. Porém, um efeito secundário de troca iônica nos sítios de adsorção também ocorre, no caso do íon sulfato pelo fosfato (SANTOS; GATIBONI, KAMINSKI, 2008), fazendo com que esse extrator não seja indicado para solos de regiões tropicais, ricos em óxidos de Fe e Al.

Raij (2004) relata que a maior parte dos extratores químicos retira P da fase sólida, sendo desejável um extrator que retire do solo apenas o P-lábil. Assim, na extração com solução ácida, há a dissolução de P-lábil pela ação dos íons presentes na composição da solução extratora, podendo ocorrer também a dissolução de compostos estáveis de P no solo que não contribuem para o P na solução, principalmente os fosfatos de Ca (RAIJ et al., 1996). Quanto à resina, o princípio de extração é a remoção contínua da solução pela troca com os íons bicarbonato ou cloreto, criando um gradiente de concentração que força a saída da superfície dos colóides, até que seja alcançado um equilíbrio eletroquímico entre o solo e a resina (SANTOS; GATIBONI, KAMINSKI, 2008). Além disso, a resina é um método que apresenta dinâmica de extração

semelhante à absorção pela raiz, sendo capaz de acessar apenas o P considerado lábil (RAIJ, 2004).

Corroborando com os menores teores de P extraídos por Mehlich-1 neste trabalho, Neto et al. (2009) verificaram que o extrator que mais extraiu P foi a resina, quando comparada a outros métodos de extração (Bray-1, Mehlich-1 e Mehlich-3) ao avaliarem diversos métodos em solos muito intemperizados e cultivados com cana-de-açúcar. Maior capacidade de extração de P pela resina em comparação ao Mehlich-1 também foi verificada por Mariotto (2009) que, ao aplicar dejetos de suíno em Latossolo Vermelho distroférico, verificou que o Mehlich-1 extraiu, em média, 50% dos teores extraídos pela resina.



**FIGURA 7.** Teores de P disponível no solo pelos extratores Mehlich-1 e resina, aos 133 e 276 dias após a aplicação de doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores médios das duas fontes e das três doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Dados transformados para ln (x+1).

Na Tabela 5, são apresentados os teores de P dos tratamentos que receberam as doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, comparativamente ao tratamento sem adubação (controle), além da comparação entre as fontes sem considerar o efeito do tratamento controle.

Observa-se diferença entre as fontes na disponibilidade de P às plantas com a utilização do extrator Mehlich-1 na avaliação realizada aos 276 DAA, em que o teor médio de P disponível com a aplicação do fertilizante organomineral foi 75% maior em relação ao fertilizante mineral. Com a resina, mesmo sem diferença estatística, o fertilizante organomineral também apresentou maior disponibilidade de P aos 276



DAA, o que evidencia que, quando se aplica um carregador orgânico associado à adubação fosfatada mineral, a matéria orgânica protege o P, inibindo as reações de fixação do elemento com os óxidos de Fe e Al (TIRITAN et al., 2010).

Vários resultados de pesquisa atribuem o aumento na disponibilidade de P em função da aplicação de matéria orgânica por meio da adsorção competitiva entre os ácidos orgânicos e o P, acarretando o bloqueio dos sítios de adsorção de fosfato no solo (ANDRADE et al., 2003; SOUZA et al., 2006; MATIAS et al., 2010). Ao aplicar P mineral associado com uma fonte orgânica, ocorre uma redução na fixação do P pelos compostos minerais do solo, elevando a disponibilidade do nutriente para as plantas, uma vez que os carregadores orgânicos possuem a capacidade de melhorar a solubilidade dos compostos de P no solo formados após a aplicação do fertilizante, disponibilizando gradualmente o P, comparado com a sua aplicação sem a associação com fontes orgânicas (TIRITAN et al., 2010).

Na comparação com o tratamento controle, os dois fertilizantes promoveram incremento dos teores de P disponível nas duas épocas de amostragem do solo (TABELA 5) e, de acordo com os critérios de Alvarez V. et al. (1999), os teores disponíveis de P variaram de baixo a médio nas duas épocas de avaliação do solo.

**TABELA 5.** Teores de P disponível no solo pelos extratores Mehlich-1 e resina, aos 133 e 276 dias após a aplicação (DAA) de doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, utilizando fertilizante mineral e organomineral.

DAA	Extrator	Fertilizante	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )				Média
			0	80	120	160	
-----mg dm <sup>-3</sup> -----							
133	Mehlich-1	Mineral	1,2	2,4	4,8*	6,3*	4,5 a
		Organomineral		2,6	2,6	5,0*	3,4 a
	Resina	Mineral	2,1	7,1*	10,3*	10,6*	9,3 a
		Organomineral		6,3*	8,2*	16,2*	10,2 a
276	Mehlich-1	Mineral	1,2	2,2 a	2,4* b	2,6* a	2,4
		Organomineral		2,9* a	6,5* a	3,2* a	4,2
	Resina	Mineral	1,3	3,8	8,3*	5,8*	6,0 a
		Organomineral		4,2*	11,3*	6,6*	7,3 a
133 DAA: Mehlich-1: DMS <sub>Dunnnett</sub> = 0,3; DMS <sub>Fonte</sub> = 0,1; CV = 28%							
Resina: DMS <sub>Dunnnett</sub> = 0,3; DMS <sub>Fonte</sub> = 0,1; CV = 16%							
276 DAA: Mehlich-1: DMS <sub>Dunnnett</sub> = 0,2; DMS <sub>Fonte</sub> = 0,1; CV = 17%							
Resina: DMS <sub>Dunnnett</sub> = 0,3; DMS <sub>Fonte</sub> = 0,1; CV = 18%							

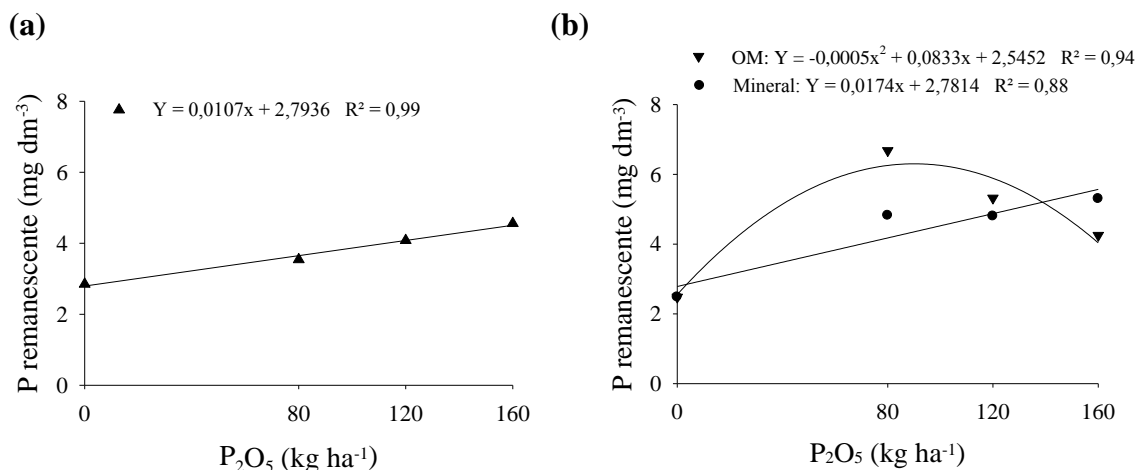
Médias seguidas por letras iguais na coluna, dentro de cada extrator, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 0,05 de significância; \* médias diferem do tratamento controle (sem adubação), pelo teste de Dunnnett, a 0,05 de significância. Dados transformados para ln (x+1).

### 2.3.2 Fósforo remanescente

Os fertilizantes mineral e organomineral não influenciaram a capacidade de adsorção do solo, observando-se aumento do P remanescente com o incremento das doses de  $P_2O_5$  aos 133 DDA (FIGURA 8a). Com o passar do tempo (276 DAA), as doses crescentes de  $P_2O_5$  com fertilizante organomineral aumentaram a capacidade de adsorção do solo, dada pela redução dos valores de P remanescente. Esse efeito não ocorreu com o fertilizante mineral, que apresentou acréscimo linear de P remanescente em função das doses de  $P_2O_5$  (FIGURA 8b).

Quando o fertilizante mineral foi aplicado ao solo, após sua dissolução, praticamente todo o P foi retido na fase sólida (MARTINHÃO; SOUSA; LOBATO, 2004), na forma de P-lábil, passando gradativamente a P não-lábil com o aumento do tempo de contato do nutriente com o solo. Assim, as reações de fixação de P foram favorecidas no início, aumentando a adsorção com o aumento das doses desse fertilizante, o que resultou em menor capacidade de adsorção de P na solução de equilíbrio.

Por outro lado, quando foi aplicado o fertilizante organomineral ocorreu, no início, menor adsorção do nutriente pelo solo em razão do efeito de proteção do P-fertilizante exercido pela matéria orgânica. À medida que a matéria orgânica foi sendo decomposta, o P foi sendo liberado, alterando a capacidade de adsorção do solo somente a partir de um período decorrido da aplicação desse fertilizante.



**FIGURA 8.** Teores de P remanescente, aos 133 (a) e 276 dias após a aplicação (b) de doses de  $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores aos 133 dias (a) representam a média das duas fontes.

Numa fase inicial, a matéria orgânica do fertilizante organomineral provavelmente não havia atingido a completa mineralização e, portanto, não alterou a capacidade de adsorção do solo, o que pode ser observado pelo comportamento semelhante das fontes em relação ao teor de P aos 133 DAA. Com o passar do tempo, em uma fase mais adianta de decomposição, a oxidação da matéria orgânica possivelmente resultou em redução do pH, acidificando o solo e aumentando a sua capacidade de adsorção.

Na Tabela 6, são apresentados os valores de P remanescente dos tratamentos que receberam adubação, comparativamente ao tratamento controle, além da comparação entre as fontes.

**TABELA 6.** Teores de P remanescente aos 133 e 276 dias após a aplicação (DAA) de doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, utilizando fertilizante mineral e organomineral.

DAA	Fertilizante	0	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )			Média
			80	120	160	
-----mg dm <sup>-3</sup> -----						
133	Mineral	2,8	3,4	3,6	3,9	3,6 a
	Organomineral		3,7	4,5	5,2*	4,5 a
276	Mineral	2,5	4,8 b	4,8 a	5,3 a	5,4
	Organomineral		6,7* a	5,3*a	4,2 a	5,0
133 DAA: DMS <sub>Dunnett</sub> = 2,4; DMS <sub>Fonte</sub> = 1,0; CV = 30%						
276 DAA: DMS <sub>Dunnett</sub> = 2,1; DMS <sub>Fonte</sub> = 0,9; CV = 22%						

Médias seguidas por letras iguais na coluna, dentro de cada época de avaliação (DAA), não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 0,05 de significância; \* médias diferem do tratamento controle (sem aplicação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), pelo teste de Dunnett, a 0,05 de significância.

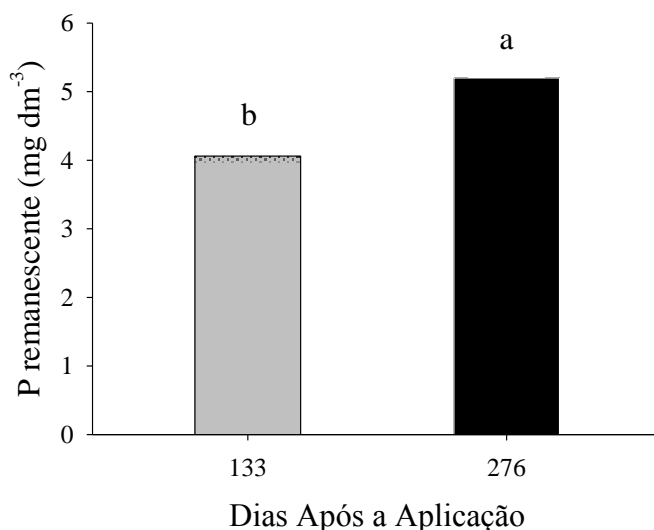
Aos 133 DAA, não houve diferença entre as fontes e, aos 276 DAA, verifica-se que a quantidade de P que permaneceu na solução de equilíbrio foi maior com a aplicação do fertilizante organomineral na dose de 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, quando comparado ao fertilizante mineral. Isso indica que somente na menor dose do fertilizante organomineral, a acidificação gerada pelo processo de mineralização não influenciou a capacidade de adsorção do solo, tendo em vista a menor quantidade de matéria orgânica para ser decomposta.

Na comparação com o tratamento controle, apenas o fertilizante organomineral proporcionou aumento no teor de P remanescente, indicando que no início (133 DAA), quando começa a decomposição da matéria orgânica, o primeiro efeito do processo de mineralização consiste na redução da adsorção de P, aumentando o teor de P remanescente na solução de equilíbrio, o que pode ser observado com a maior dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> fornecida por esta fonte. Com o passar do tempo, à medida que o processo de

mineralização avança e aumentam as doses do fertilizante, o solo sofre acidificação e o teor de P remanescente volta a diminuir como resultado da maior adsorção de P.

Os teores de P remanescente do solo utilizado neste estudo variaram de 3,4 a 6,7  $\text{mg dm}^{-3}$  em função das doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , apresentando disponibilidade de P muito baixa e sendo considerado um solo de alta retenção de P (ALVAREZ V. et al., 1999). Baixos teores de P remanescente eram esperados, uma vez que o solo utilizado neste experimento possui elevado teor de argila ( $625 \text{ g kg}^{-1}$ ) e, quanto mais argiloso e mais oxidico for o solo, maior é a sua superfície de adsorção de fosfatos, particularmente nos Latossolos (NOVAIS; SMYTH, 1999) e, como consequência, menores serão os teores de P remanescente.

Analisando o efeito do tempo sobre os teores de P remanescente, independentemente das fontes e doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  utilizadas, observa-se menor capacidade de adsorção do solo com o passar do tempo, o que pode ser verificado pelo aumento dos teores de P remanescente aos 276 DAA (FIGURA 9). Como são considerados os efeitos das duas fontes, provavelmente o fertilizante mineral está influenciando o resultado desta análise.



**FIGURA 9.** Teores de P remanescente, aos 133 e 276 dias após a aplicação de doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores médios das duas fontes e das três doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

### 2.3.3 Potássio trocável

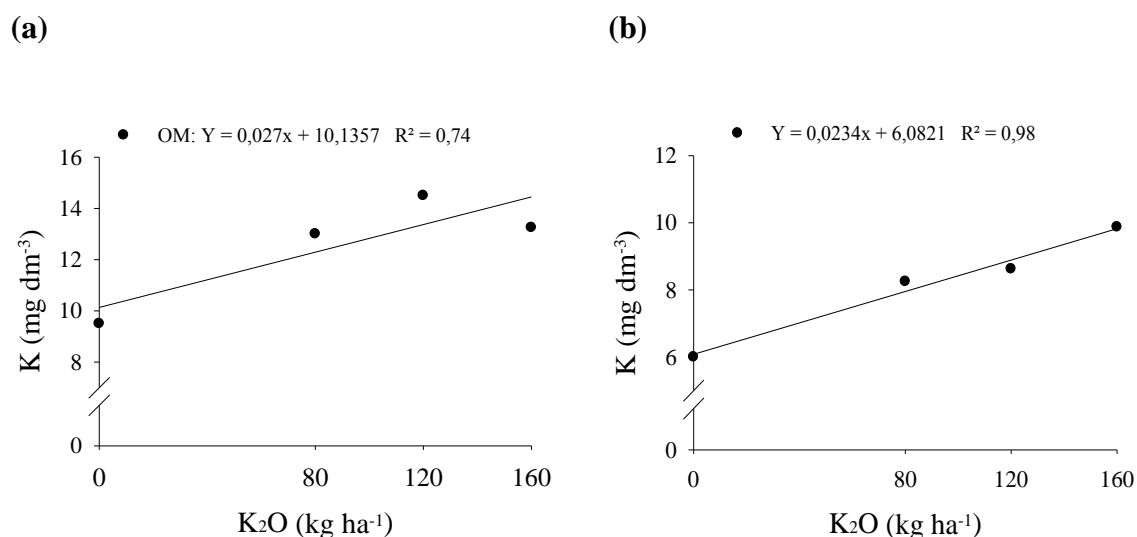
Os teores trocáveis de K no solo aumentaram linearmente com as doses de  $\text{K}_2\text{O}$  fornecidas pelos fertilizantes mineral e organomineral nas duas épocas de avaliação

(FIGURA 10). Na avaliação realizada aos 133 DAA, os modelos de regressão testados não se ajustaram aos teores trocáveis de K com a aplicação do fertilizante mineral. Para o fertilizante organomineral, houve resposta à aplicação das doses de  $K_2O$  aos 133 DAA, verificando-se um aumento de  $0,03 \text{ mg dm}^{-3}$  de K no solo para cada  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $K_2O$  aplicado (FIGURA 10a).

Na avaliação realizada aos 276 DAA, um menor acréscimo, porém significativo, foi observado para o os teores de K trocável no solo com o aumento das doses de  $K_2O$ , independentemente do fertilizante, de forma que cada  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $K_2O$  adicionado aumentou em  $0,02 \text{ mg dm}^{-3}$  o teor do nutriente no solo (FIGURA 10b).

Resultados semelhantes foram verificados por Almeida Jr. (2010) que, avaliando o efeito da associação de diferentes doses de fertilizante orgânico e mineral em cana-planta cultivada em vasos plásticos (10 L), obteve aumento dos teores trocáveis de K no solo com o incremento das doses, com os maiores teores de K no solo obtidos com a maior dose das duas fontes.

Trabalhando com doses de até  $195 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $K_2O$  em um Latossolo Vermelho distrófico argiloso com teores baixos de K trocável em soqueira de cana-de-açúcar, Flores et al. (2012) observaram efeito linear no teor de K no solo, atingindo o equivalente a  $70 \text{ mg dm}^{-3}$  na maior dose de K aplicada. Silva (2010) e Rossetto et al. (2004) também constataram que, após a aplicação de doses de K, o teor trocável no solo aumentou com ajuste linear.



**FIGURA 10.** Teores de K trocável no solo, aos 133 (a) e 276 dias após a aplicação (b) de doses de  $K_2O$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores aos 276 dias (b) representam a média das duas fontes. Dados transformados para  $\ln(x+1)$ .

Mesmo com o incremento proporcionado pelas doses de  $K_2O$ , o teor de K trocável nas duas épocas de avaliação está muito baixo, segundo as classes de fertilidade para manutenção estabelecidas por Alvarez V. et al. (1999), com teores variando de 8 a  $14,5 \text{ mg dm}^{-3}$ , na análise realizada aos 133 DDA, e de 8 a  $10 \text{ mg dm}^{-3}$ , quando a coleta ocorreu aos 276 DAA, o que pode ser resultado da extração pelas plantas e das perdas por lixiviação.

Um fator que deve ser considerado na avaliação da disponibilidade de K e que pode afetar a interpretação do K disponível pelo Mehlich-1 é a capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (SOCIEDADE..., 2004). Ernani, Almeida e Santos (2007) consideram que, para solo com CTC inferior a  $5,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , o valor adequado de K disponível no solo é  $45 \text{ mg dm}^{-3}$ , muito superior aos valores observados neste trabalho, considerando as duas épocas de avaliação (TABELA 7).

O solo utilizado neste experimento, mesmo com textura muito argilosa ( $625 \text{ g kg}^{-1}$  de argila), possui baixa capacidade para reter cátions em forma trocável, devido a baixa atividade das argilas sesquioxídicas, como indicado pela baixa CTC ( $2,85 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) (TABELA 1). Com isso, possivelmente a maior parte do K adicionado pelos fertilizantes foi para a solução do solo, sendo parte perdida por lixiviação e parte absorvida pela planta. Conforme Mielniczuk (1982), a CTC dos solos é componente determinante da relação K trocável/K da solução do solo, ou seja, para uma mesma quantidade de K total, menor será a quantidade de K na solução em solos com alta CTC, o que refletirá em menores perdas de K por lixiviação, menor retirada desnecessária de K pelas plantas e maior capacidade de armazenamento de K no solo.

Na comparação entre as fontes, os resultados da Tabela 7 mostram que, aos 133 DAA, a aplicação do fertilizante organomineral proporcionou um acréscimo médio de 18% no teor de K no solo em relação ao fertilizante mineral. Este resultado pode ser explicado pelo efeito de liberação gradual de nutrientes conferido pela fração orgânica do fertilizante organomineral, o que pode ter levado a uma menor liberação de K no início e, conseqüentemente, menor perda de K por lixiviação. Por se tratar de uma fonte solúvel em água, o fertilizante mineral foi dissolvido na solução do solo imediatamente após a aplicação e, com isso, o K foi liberado, favorecendo as perdas por lixiviação em curto prazo.

É bastante conhecido na literatura que, em solos de regiões tropicais, apesar de ocorrer naturalmente em baixos teores, a matéria orgânica apresenta a maior participação no valor da CTC do solo em detrimento da fração mineral. Segundo

Jenkinson (1988) citado por Rajj (2011), é nos grupamentos funcionais existentes nas cadeias orgânicas de ácidos húmicos e ácidos fúlvicos que está a origem das cargas elétricas negativas da matéria orgânica. Benites e Mendonça (1998), ao adicionarem esterco em um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico argiloso originalmente eletropositivo, verificaram o efeito do aumento de cargas elétricas negativas conferido pela matéria orgânica.

Aos 276 DAA, os teores trocáveis de K não diferiram entre os fertilizantes provavelmente em consequência do equilíbrio iônico estabelecido para o K no solo adicionado pelas duas fontes (TABELA 7). Com o tempo decorrido da aplicação do fertilizante organomineral, o K liberado por esta fonte foi sendo absorvido pela planta, gerando um equilíbrio no teor de K no solo fornecido pelos dois fertilizantes. Além disso, a elevada precipitação pluviométrica ocorrida no período entre as duas épocas de coleta do solo (133 e 276 DAA), ou seja, entre novembro/2011 e março/2012 (FIGURA 1), pode ter favorecido o aprofundamento do K no perfil, reduzindo os teores desse nutriente na camada superficial e favorecendo a ocorrência de lixiviação, o que pode ter atenuado a diferença entre as fontes.

**TABELA 7.** Teores de K trocável no solo, aos 133 e 276 dias após a aplicação (DAA) de doses de K<sub>2</sub>O, utilizando fertilizante mineral e organomineral.

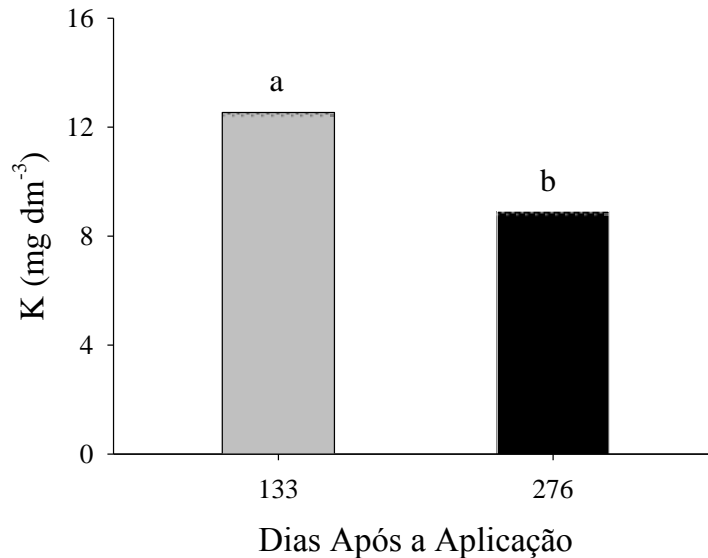
DAA	Fertilizante	Doses de K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> )			Média	
		0	80	120		160
-----mg dm <sup>-3</sup> -----						
133	Mineral	9,5	8,0	13,8*	12,8*	11,5 b
	Organomineral		13,0	14,5*	13,2*	
276	Mineral	6,0	8,2	8,0	9,8*	8,7 a
	Organomineral		8,2	9,2	10,0*	
133 DAA: DMS <sub>Dunnnett</sub> = 4,0; DMS <sub>Fonte</sub> = 2,5; CV = 5%						
276 DAA: DMS <sub>Dunnnett</sub> = 0,2; DMS <sub>Fonte</sub> = 0,1; CV = 9%						

Médias seguidas por letras iguais na coluna, dentro de cada época de avaliação (DAA), não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 0,05 de significância; \* médias diferem do tratamento controle (sem aplicação de K<sub>2</sub>O), pelo teste de Dunnnett, a 0,05 de significância. Dados transformados para ln (x+1).

Comparando os tratamentos que receberam aplicação de K<sub>2</sub>O com o tratamento controle, acréscimos nos teores trocáveis de K foram observados com as doses de 120 e 160 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, aos 133 DAA, enquanto aos 276 DAA, apenas a dose máxima aumentou o teor de K no solo, independentemente do fertilizante (TABELA 7). Vale ressaltar que a aplicação do fertilizante organomineral proporcionou maior equilíbrio do K no solo durante o ciclo da cana-planta, em função dos maiores teores do nutriente,

mesmo sem diferença significativa, observados nas duas épocas de avaliação com a aplicação desta fonte.

Com o aumento do tempo decorrido após a aplicação dos fertilizantes, verifica-se uma redução do K trocável no solo (FIGURA 11), evidenciando que o nutriente foi absorvido pelas plantas com o avanço do ciclo da cultura, que é exigente nesse nutriente, podendo também ter sido perdido por lixiviação.



**FIGURA 11.** Teores de K trocável no solo, aos 133 e 276 dias após a aplicação de doses de K<sub>2</sub>O, utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores médios das duas fontes e das três doses de K<sub>2</sub>O. Dados transformados para ln (x+1).

### 2.3.4 Teores de nutrientes na planta

#### 2.3.4.1 Fósforo

Os teores de P na parte aérea total, nas folhas e nos ponteiros da cana-planta variaram em função das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, independentemente da fonte utilizada. Observa-se aumento linear do teor de P nas folhas em razão das doses aplicadas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, com acréscimo de 0,0021 g kg<sup>-1</sup> de P para cada kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Na parte aérea total e nos ponteiros, a resposta às doses dos fertilizantes foi quadrática, observando-se os máximos teores de P (0,3 g kg<sup>-1</sup> e 1,0 g kg<sup>-1</sup>) com a aplicação de 95 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 110 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, respectivamente, na parte aérea total e nos ponteiros (FIGURA 12).

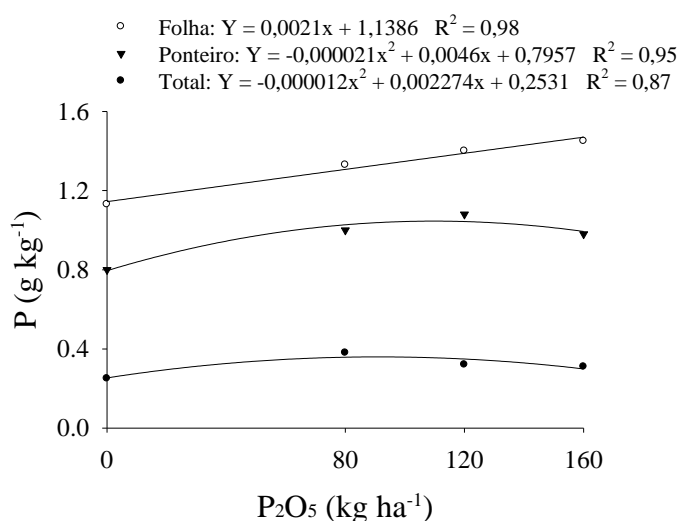
Nas demais partes da planta (colmos e folhas senescentes), os modelos de regressão testados não se ajustaram aos teores desse nutriente.



O aumento no teor de P foliar pode ser explicado pelo aumento da absorção desse nutriente pela planta como resposta à maior disponibilidade de P no solo verificada com o acréscimo das doses de  $P_2O_5$  (FIGURA 6). Todavia, este incremento foi pequeno, não sendo suficiente para atingir os teores adequados para uma planta bem suprida de P, que variam em torno de 1,5 a 3,0  $g\ kg^{-1}$  de P foliar, segundo Rajj et al. (1996).

Espironelo et al. (1986), avaliando os efeitos da adubação NPK nos teores de macronutrientes das folhas de cana-de-açúcar, cultivada em Latossolos e em solos Podzolizados, também não verificaram aumentos consistentes nos teores foliares de P como efeito da adubação fosfatada.

Neste trabalho, o teor foliar de P não aumentou consideravelmente com as doses. As baixas reservas de P no solo (TABELA 5), associadas ao elevado teor de argila, possivelmente atenuou a competição entre a planta e o solo pelo P adicionado como fertilizante, prejudicando e refletindo diretamente na absorção do nutriente pela planta.



**FIGURA 12.** Teores de P na parte aérea total, na folha e no ponteiro da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de  $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores representam a média das duas fontes.

Cabe ressaltar que a eficiência de utilização do P do fertilizante é baixa, sendo comuns utilizações pela cana de 10 a 15% do fertilizante aplicado (ROSSETO et al., 2010b), o que contrasta com a elevada quantidade normalmente adicionada ao solo em razão da intensa adsorção de P pelos solos intemperizados.

Além disso, a cana-soca possui maior capacidade de extrair P do solo do que a cana-planta, atribuindo-se esta capacidade ao fato de que parte do sistema radicular da cana-planta permanece no solo após o corte, contribuindo na exploração mais rápida do volume de solo (KORNDÖRFER; ALCARDE, 1992). Por esta razão, espera-se maior absorção de P pela cana-soca, principalmente com a aplicação do fertilizante organomineral que, por possuir solubilidade mais lenta, teria maior efeito residual e poderia fornecer mais P para as soqueiras.

Os teores de P nos ponteiros são similares aos teores encontrados por Neto (2008), que estudou a disponibilidade de P em Latossolo Amarelo distrófico e verificou teores de P que variaram de 0,5 a 0,7 g kg<sup>-1</sup> com a aplicação de doses de P variando de 0 a 255 kg ha<sup>-1</sup>. Neste trabalho, a redução dos teores de P nos ponteiros, esperada com doses superiores a 110 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, pode ter ocorrido devido a um efeito diluição, em que a demanda do nutriente aumentou como resultado do maior crescimento da planta proporcionado pelo aumento das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

A Tabela 8 apresenta os teores de P na parte aérea total e em cada componente da planta (folha, ponteiro, colmo e folha senescente). Na parte aérea total, nos colmos e nas folhas senescentes não foram observados aumentos nos teores de P com a aplicação dos tratamentos, comparativamente ao tratamento controle. Já as folhas e ponteiros apresentaram aumento no teor de P com a aplicação do fertilizante organomineral nas doses de 80 e 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, enquanto a fonte mineral proporcionou aumento no teor do nutriente nestas partes da planta quando foi aplicada nas maiores doses.

A maior disponibilidade de P pelo fertilizante organomineral nas menores doses provavelmente se deve ao menor efeito de fixação do P. O P contido no fertilizante organomineral está mais protegido, sendo liberado à medida que a matéria orgânica vai sendo decomposta. Como consequência, o P será menos fixado e maior teor torna-se disponível na solução, permitindo que haja maior absorção do nutriente pela planta. Por outro lado, o aumento do P verificado nas folhas e nos ponteiros com a aplicação do fertilizante mineral apenas nas maiores doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> revela a necessidade de maior quantidade e, conseqüentemente, maior gasto com fertilizantes para aumentar o teor do nutriente na planta, se comparado ao fertilizante organomineral.

Considerando a partição da planta em folha, ponteiro, colmo e folha senescente, os maiores teores de P foram observados nas folhas (TABELA 8) e os menores teores, nas folhas senescentes. Por possuir elevada mobilidade, o P é facilmente distribuído no floema, indo para as partes jovens da planta que estão em crescimento, como folhas e

ponteiros. Estes resultados concordam com Castro (2000), que afirma que a maior presença do P é detectada em tecidos meristemáticos, devido a participação desse nutriente em compostos ricos em energia, o que justifica seus maiores teores nas folhas da cana-de-açúcar, região de intensa atividade metabólica.

As folhas senescentes apresentam menor atividade metabólica, o que explica o menor teor de P nesse compartimento da planta. Neto (2008), avaliando a alocação de P para determinar sua extração e exportação pela cana-de-açúcar, também observou os menores teores de P nas folhas senescentes com relação aos outros componentes da planta (ponteiro, folha e colmo).

**TABELA 8.** Teores de P na parte aérea total e nas partes da cana-planta (folha, ponteiro, colmo e folha senescente), variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, utilizando fertilizante mineral e organomineral.

Parte da planta	Fertilizante	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )				Média
		0	80	120	160	
		----- g kg <sup>-1</sup> -----				
Total	Mineral	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3 a
	Organomineral	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3 a
Folha	Mineral	1,1	1,2	1,4	1,5*	1,3 a
	Organomineral	1,1	1,4*	1,4*	1,4	1,4 a
Ponteiro	Mineral	0,8	1,0	1,1*	1,0*	1,0 a
	Organomineral	0,8	1,0*	1,1*	0,9	1,0 a
Colmo	Mineral	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2 a
	Organomineral	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2 a
Folha senescente	Mineral	0,1	0,3	0,1	0,1	0,2 a
	Organomineral	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1 a

Total: DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,1; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,04; CV = 16%

Folha: DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,3; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,1; CV = 12%

Ponteiro: DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,3; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,1; CV = 9%

Colmo: DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,1; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,04; CV = 21%

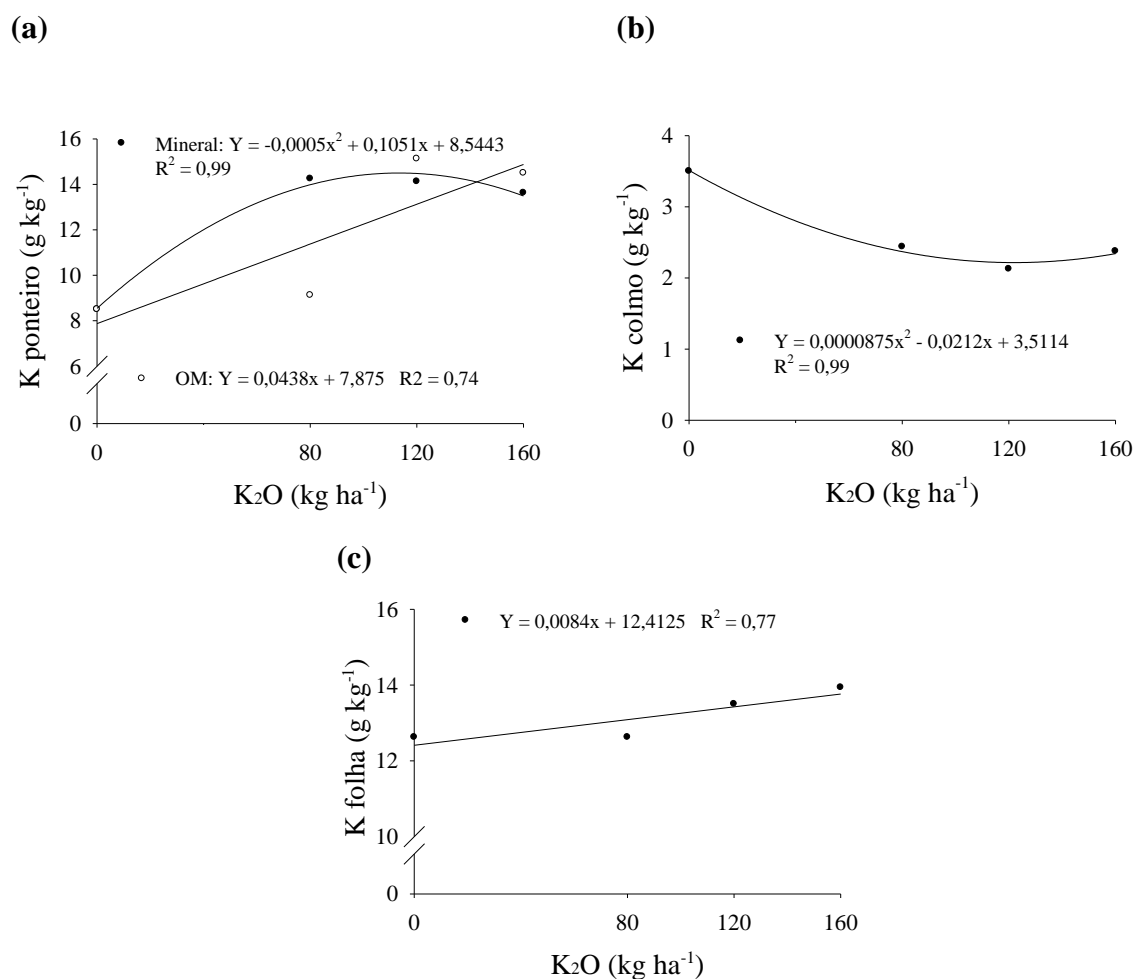
Folha senescente: DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,1; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,04; CV = 5%

Médias seguidas por letras iguais na coluna, dentro de cada parte da planta, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 0,05 de significância; \* médias diferem do tratamento controle (sem aplicação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), pelo teste de Dunnett, a 0,05 de significância. Dados de folhas senescentes transformados para raiz x+1.

### 2.3.4.2 Potássio

Os teores de K nos ponteiros e nas folhas da cana-de-açúcar aumentaram com as doses de K<sub>2</sub>O, enquanto os teores nos colmos sofreram decréscimo com o aumento das doses (FIGURA 13). Na parte aérea total e nas folhas senescentes, não houve efeito dos tratamentos sobre os teores de K.

No ponteiro, à medida que se aumentou a dose de  $K_2O$ , a fonte do nutriente alterou o teor de K. Com a aplicação do fertilizante mineral, o teor de K aumentou até a dose aproximada de  $105 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $K_2O$ , a partir da qual ocorreu um decréscimo, possivelmente devido à um efeito diluição. Quanto ao fertilizante organomineral, não houve decréscimo nos teores de K com o aumento das doses, observando-se  $0,04 \text{ g kg}^{-1}$  de K no ponteiro para cada  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $K_2O$  aplicado (FIGURA 13a).



**FIGURA 13.** Teores de K no ponteiro (a), colmo (b) e folha (c) da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de  $K_2O$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Teores no colmo (b) e na folha (c) representam a média das duas fontes.

No colmo, o decréscimo no teor de K com as doses de  $K_2O$  possivelmente se deve à maior produção de matéria seca deste compartimento em resposta à adição das doses de  $K_2O$ , que acarretou em maior demanda na absorção do nutriente do solo, indicando também a ocorrência de um efeito diluição. Além disso, houve redistribuição do K do colmo para as outras partes da planta com maior atividade metabólica. O menor

teor de K no colmo ( $2,2 \text{ g kg}^{-1}$ ) foi verificado com a dose de  $121 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  (FIGURA 13b).

O incremento da adubação potássica ocasionou aumento linear do teor de K na folha, com acréscimo de  $0,008 \text{ g kg}^{-1}$  de K para cada  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  aplicado (FIGURA 13c). Verifica-se que este acréscimo foi baixo e mesmo que o modelo ajustado apresente rejeição da hipótese nula (valor F significativo), as doses aplicadas explicam pouco o aumento no teor foliar de K, observando-se baixa resposta da cultura à adição dos fertilizantes. O baixo teor de K no solo verificado nas duas épocas de avaliação (133 e 276 DAA) associado à baixa capacidade de retenção de nutrientes do solo utilizado neste experimento possivelmente explicam o efeito pouco expressivo das doses de  $\text{K}_2\text{O}$  em aumentar o teor de K nas folhas da cana-planta.

Segundo Meurer (2006), a absorção dos nutrientes é função da demanda pela planta e da capacidade de suprimento do solo. Relacionando a demanda da planta e a capacidade de suprimento do solo, Wiethölter (2007) relatou que a quantidade total de K que pode ser absorvida pela planta depende da capacidade de reposição da solução do solo pela fase sólida. Assim, a absorção de K pela planta será alta se o solo tiver alta capacidade de suprimento do nutriente e se a demanda da planta for alta. Entretanto, mesmo sendo alta a demanda da planta, se a capacidade de suprimento do solo for baixa, a taxa de absorção não poderá ser elevada (WIETHÖLTER, 2007).

Na Tabela 9, são apresentados os teores de K na parte aérea total e nas partes da cana-planta (folha, ponteiro, colmo e folha senescente). Os teores de K na folha, oscilando entre  $11,5$  e  $14,1 \text{ g kg}^{-1}$ , independente das doses de  $\text{K}_2\text{O}$  e dos fertilizantes aplicados, encontram-se dentro da faixa preconizada por Raij et al. (1996), que varia de  $10$  a  $16 \text{ g kg}^{-1}$ . Observa-se que, mesmo no tratamento sem adubação, o teor foliar de K é similar aos teores nas folhas das plantas que receberam adubação, atingido os valores adequados para uma planta bem suprida de K.

Em estudo com doses de  $\text{K}_2\text{O}$  em cultivo comercial de cana-de-açúcar, utilizando como fonte o KCl, Otto, Vitti e Luz (2010) observaram teores foliares de K semelhantes aos obtidos neste trabalho, acima de  $11 \text{ g kg}^{-1}$  com aplicação única no plantio de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ . Por outro lado, Almeida Jr. et al. (2011), associando doses de torta de filtro e fertilizante mineral em cana-de-açúcar cultivada em vasos plásticos (10 L), observaram aumento dos teores foliares de K, atingindo valores acima da faixa considerada adequada para a cultura. Teores de K inferiores aos obtidos neste trabalho foram observados por Pancelli (2011), que aplicou doses de KCl de até  $195 \text{ kg}$

ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O em primeira soqueira de cana-de-açúcar e encontrou valores variando de 4 a 6 e de 2 a 3 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, na folha e no colmo.

No que se refere à partição do nutriente na planta, a maior parte do K absorvido foi observada nos ponteiros e nas folhas da cana-de-açúcar, enquanto as folhas senescentes e os colmos apresentaram os menores teores (TABELA 9). Corroborando com os resultados deste trabalho, Bebé (2011), ao avaliar o efeito de doses de vinhaça sobre a dinâmica de nutrientes em cana-planta, observou nos ponteiros o maior teor de K, seguido da folha e do colmo.

**TABELA 9.** Teores de K na parte aérea total e nas partes da cana-planta (folha, ponteiro, colmo e folha senescente), variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de K<sub>2</sub>O, utilizando fertilizante mineral e organomineral.

Parte da planta	Fertilizante	Doses de K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> )				Média
		0	80	120	160	
		----- g kg <sup>-1</sup> -----				
Total	Mineral		4,1	3,8	4,2	4,0 a
	Organomineral	3,7	3,7	4,2	4,6	4,2 a
Folha	Mineral		11,5	13,4	13,8	12,9 a
	Organomineral	12,6	13,8	13,6	14,1	13,8 a
Ponteiro	Mineral		14,2* a	14,1* a	13,6* a	14,0
	Organomineral	8,5	9,1 b	15,1* a	14,5* a	12,9
Colmo	Mineral		2,1*	1,9*	2,0*	2,0 b
	Organomineral	3,5	2,8	2,4*	2,8	2,6 a
Folha senescente	Mineral		2,9	1,5	2,5	2,4 a
	Organomineral	1,8	2,4	2,6	2,5	2,5 a

Total: DMS<sub>Dunnnett</sub> = 1,1; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,5; CV = 14%

Folha: DMS<sub>Dunnnett</sub> = 2,0; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,9; CV = 8%

Ponteiro: DMS<sub>Dunnnett</sub> = 3,2; DMS<sub>Tukey</sub> = 1,4; CV = 13%

Colmo: DMS<sub>Dunnnett</sub> = 1,0; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,4; CV = 21%

Folha senescente: DMS<sub>Dunnnett</sub> = 0,3; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,1; CV = 31%

Médias seguidas por letras iguais, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna dentro de cada parte da planta, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 0,05 de significância; \* médias diferem do tratamento controle (sem aplicação de K<sub>2</sub>O), pelo teste de Dunnnett, a 0,05 de significância. Dados de folhas senescentes transformados para ln (x+1).

Segundo Malavolta (2006), quase todo o K da planta está em forma solúvel, o que permite entender a relativa facilidade da sua redistribuição, de órgãos mais velhos para os mais novos. Logo, por ser um elemento altamente móvel na planta, o K possivelmente foi redistribuído no floema, o que explica a sua predominância nos órgãos mais jovens, como ponteiros e folhas, com elevada demanda desse nutriente. Mengel et al. (1987) citado por Meurer (2006) relataram que os órgãos das plantas preferencialmente supridos pelo floema são as folhas novas, os tecidos meristemáticos e os frutos frescos, os quais apresentam, conseqüentemente, alta concentração em K.

Na comparação com o tratamento controle, observa-se aumento do teor de K no ponteiro e decréscimo no colmo com a adição das doses de  $K_2O$ , enquanto na parte aérea total, nas folhas e nas folhas senescentes, não houve aumento no teor desse nutriente com o acréscimo das doses de  $K_2O$  (TABELA 9).

No colmo, o teor de K foi maior com o fertilizante organomineral, comparativamente ao fertilizante mineral, observando-se um acréscimo de 30% ( $0,6 \text{ g kg}^{-1}$  de K) com a aplicação dessa fonte. Entretanto, a adubação potássica diminuiu o teor de K nessa parte da planta com relação ao tratamento controle, o que pode ser explicado pelo efeito diluição, além da redistribuição do nutriente para as partes mais jovens da planta, que vão se comportar como dreno. Segundo Maia et al. (2005), todos os fatores que proporcionarem mudanças diferenciadas nos valores das taxas de crescimento e absorção dos nutrientes resultarão em diferentes concentrações do nutriente no tecido vegetal.

### **2.3.5 Acúmulo de nutrientes e fitomassa seca na planta**

#### **2.3.5.1 Fósforo**

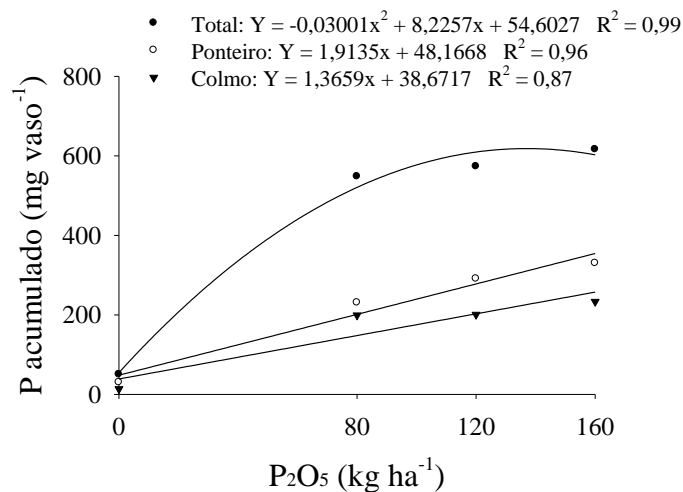
Alterações no acúmulo de P na parte aérea total, nos colmos e nos ponteiros da cana-planta foram observadas somente em função das doses de  $P_2O_5$ , independentemente da fonte utilizada (FIGURA 14). Nas folhas senescentes, o P acumulado seguiu a mesma tendência do teor de P, não se ajustando a nenhum modelo de regressão testado. Cada  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  aplicado resultou no aumento de 1,9 e 1,4  $\text{mg vaso}^{-1}$  de P acumulado nos ponteiros e nos colmos, respectivamente, enquanto na parte aérea total, o máximo acúmulo de P ( $618,26 \text{ mg vaso}^{-1}$ ) é esperado com a aplicação de  $137 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$ .

O acúmulo de nutrientes é calculado em função da produção de matéria seca e do teor de nutriente em cada parte da planta. Neste trabalho, o colmo apresentou menor teor de P em relação ao ponteiro (TABELA 8), o que refletiu diretamente no acúmulo do nutriente, observando-se menor acúmulo de P também no colmo (FIGURA 14), apesar da maior quantidade de fitomassa seca produzida por essa parte da planta em relação às demais partes (FIGURA 16; TABELA 12).

Este resultado pode ter ocorrido em razão da menor quantidade de nutrientes presentes no colmo no momento da colheita, pois a cana-de-açúcar estava em

crescimento vegetativo e os nutrientes estavam sendo translocados para as partes jovens da planta, que apresentam alta atividade metabólica. Além disso, o maior acúmulo de fitomassa seca no colmo em relação ao ponteiro pode ter provocado maior demanda pela absorção do nutriente. Segundo Dillewijn (1952), o maior conteúdo de P em cana-de-açúcar ocorre nos centros de maior atividade da planta, como regiões de crescimento e assimilação de carbono. Dessa maneira, quanto mais velhos os tecidos, menores serão os acúmulos de P, o que foi verificado neste trabalho.

Clements (1955) citado por Neto (2008) apresentou a seguinte ordem decrescente da quantidade de P em cana-de-açúcar: tecidos meristemáticos, colmos em alongação, folhas jovens, folhas velhas e colmo maduro. Oliveira et al. (2011), avaliando o acúmulo de nutrientes em diferentes variedades de cana-de-açúcar, observaram os maiores acúmulos de P no colmo apenas nas fases fenológicas iniciais.



**FIGURA 14.** Acúmulo de P na parte aérea total, no ponteiro e no colmo da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, utilizando fertilizante mineral e organomineral. Média das duas fontes.

Na comparação com o controle, todos os tratamentos aumentaram o P acumulado na parte aérea total, no ponteiro e no colmo, com exceção das folhas senescentes, em que somente a aplicação de 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> com as duas fontes e 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> com o fertilizante mineral resultaram em aumento do P acumulado. Considerando o acúmulo de P na parte aérea total e no colmo, sem efeito do tratamento controle, a cana-planta acumulou mais P com a aplicação do fertilizante organomineral, mesmo sem diferença significativa (TABELA 10).



O acúmulo de P pelos componentes da parte aérea revelou a importância dos ponteiros na absorção e retirada do nutriente do solo. O ponteiro foi o componente da planta que mais contribuiu para o acúmulo total de P, representando cerca de 50% do P acumulado na parte aérea total da cana-planta. Essa informação evidencia a importância do estoque de nutrientes que está presente em partes não exportáveis da planta, ou seja, que retornarão ao solo e contribuirão para a ciclagem de nutrientes no próximo ciclo vegetativo pela decomposição do resíduo vegetal.

**TABELA 10.** Acúmulo de P na parte aérea total e nas partes da cana-planta (ponteiro, colmo e folha senescente), variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> utilizando fertilizante mineral e organomineral.

Parte da planta	Fertilizante	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )				Média
		0	80	120	160	
----- mg vaso <sup>-1</sup> -----						
Total	Mineral	50,1	466,1*	548,5*	626,5*	547,1 a
	Organomineral		529,2*	597,7*	605,7*	577,5 a
Ponteiro	Mineral	30,3	196,8*	290,4*	364,5*	283,9 a
	Organomineral		264,2*	291,2*	295,4*	283,6 a
Colmo	Mineral	13,6	166,47*	181,6*	223,7*	190,6 a
	Organomineral		231,50*	219,8*	242,5*	231,3 a
Folha senescente	Mineral	6,1	102,9*	76,6*	38,4	72,6 a
	Organomineral		33,5	86,8*	67,8	62,6 a

Total: DMS<sub>Dunnnett</sub> = 280; DMS<sub>Tukey</sub> = 120; CV = 29%

Ponteiro: DMS<sub>Dunnnett</sub> = 141,8; DMS<sub>Tukey</sub> = 60,8; CV = 29%

Colmo: DMS<sub>Dunnnett</sub> = 136,5; DMS<sub>Tukey</sub> = 58,5; CV = 37%

Folha senescente: DMS<sub>Dunnnett</sub> = 5,5; DMS<sub>Tukey</sub> = 2,4; CV = 40%

Médias seguidas por letras iguais na coluna, dentro de cada parte da planta, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 0,05 de significância; \* médias diferem do tratamento controle (sem aplicação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), pelo teste de Dunnnett, a 0,05 de significância. Dados de folha senescente transformados para raiz x+1.

Confirmando a importância do estoque de nutrientes que permanece no solo após a extração pelas plantas, Canellas et al. (2003) observaram aumento significativo no conteúdo de P disponível em um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar onde a queima do canavial não era efetuada antes da colheita durante longo tempo.

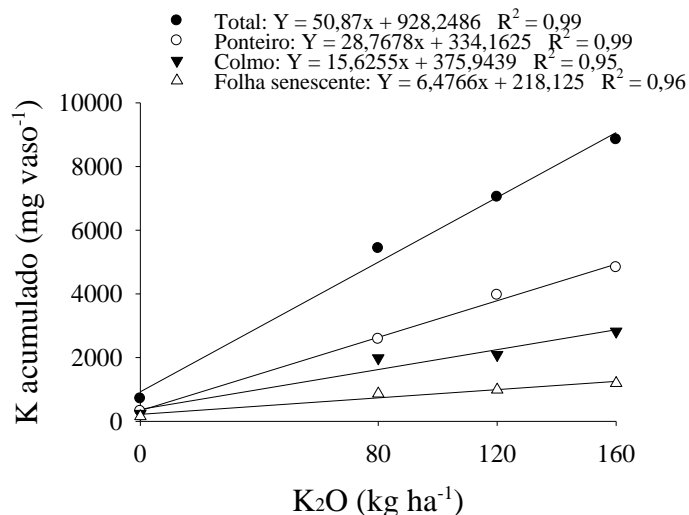
Por outro lado, fica destacado o baixo acúmulo do P pelas folhas senescentes em relação aos outros dois componentes (ponteiros e colmos), indicando que esse nutriente é muito móvel na planta, sendo translocado para partes de maior necessidade. De acordo com Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), até 60% do P pode ser conduzido através do floema a outras partes da planta à medida que a folha envelhece, especialmente aos órgãos novos e aos frutos em desenvolvimento, fazendo baixar o teor do elemento nas folhas.

### 2.3.5.2 Potássio

Na Figura 15, é apresentado o resultado do acúmulo de K total e em cada componente da parte aérea da cana-planta, que aumentou linearmente com as doses de  $K_2O$ , independentemente do fertilizante aplicado. Cada  $kg\ ha^{-1}$  de  $K_2O$  proporcionou um acréscimo no acúmulo total, ponteiro, colmo e folha senescente, em torno de 51, 29, 16 e 6  $mg\ vaso^{-1}$ , respectivamente. Avaliando o comportamento do acúmulo de K pela cana-planta, por componente da parte aérea, foi possível constatar diferença entre as partes estudadas.

As quantidades de K acumuladas no ponteiro foram superiores às verificadas nas demais partes da planta, representando 53% do nutriente acumulado em toda a parte aérea (TABELA 11). O alto teor de K no ponteiro como consequência da mobilidade na planta e da demanda desse nutriente pelos órgãos jovens fez com que o ponteiro contribuísse em maior quantidade para o acúmulo total de K.

No colmo, mesmo apresentando redução do teor de K com as doses de  $K_2O$  (FIGURA 13), o acréscimo na produção de fitomassa seca foi o responsável pelo aumento do acúmulo desse nutriente, que correspondeu a 32% do total acumulado pela planta (TABELA 11). O mesmo resultado foi verificado na folha senescente, cujo aumento do K acumulado foi devido ao acúmulo de fitomassa seca que também aumentou com as doses dos fertilizantes.



**FIGURA 15.** Acúmulo de K na parte aérea total, no ponteiro, no colmo e na folha senescente da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de  $P_2O_5$ , utilizando fertilizante mineral e organomineral. Média das duas fontes. Dados de folhas senescentes transformados para  $\ln(x+1)$ .

Resultados diferentes foram obtidos por Bebé (2011) que, aplicando doses de um fertilizante orgânico, observou maior acúmulo de K pelo colmo em relação às folhas e ponteiros durante todo o ciclo da cana-de-açúcar, o que ocorreu em função do maior acúmulo de matéria seca por esta parte da planta. Rosseto et al. (2010a), a partir de dados experimentais do IAC, revelaram que a maior parte do K absorvido concentra-se nos colmos.

Dessa forma, é possível que o acúmulo de K tenha sido maior no colmo em algum momento do ciclo de produção da cana-planta, o que pode ter coincidido com uma maior concentração do nutriente nessa parte da planta antes da redistribuição para as partes jovens. Dados que corroboram essa possibilidade foram apresentados por Orlando Filho (1983), que observou redução de K no colmo com o decorrer do desenvolvimento da cana-planta, especificamente dos 14 aos 16 meses.

Na Tabela 11, observa-se que a aplicação de todas as doses de K<sub>2</sub>O aumentou o acúmulo de K total e em todas as partes da planta em relação ao tratamento sem adubação.

**TABELA 11.** Acúmulo de K na parte aérea total e nas partes da cana-planta (ponteiro, colmo e folha senescente), variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses de K<sub>2</sub>O, utilizando fertilizante mineral e organomineral.

Parte da planta	Fertilizante	Doses de K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> )				Média
		0	80	120	160	
		----- mg vaso <sup>-1</sup> -----				
Total	Mineral		5589*	6135*	8585*	6770 a
	Organomineral	710	5270*	7946*	9106*	7441 a
Ponteiro	Mineral		2859*	3784*	4994*	3879 a
	Organomineral	316	2307*	4142*	4667*	3705 a
Colmo	Mineral		1745*	1595*	2288*	1876 b
	Organomineral	238	2221*	2580*	3352*	2718 a
Folha senescente	Mineral		985*	757*	1302*	1015 a
	Organomineral	156	742*	1224*	1086*	1018 a

Total: DMS<sub>Dunnett</sub> = 2356; DMS<sub>Tukey</sub> = 1009; CV = 19%

Ponteiro: DMS<sub>Dunnett</sub> = 1942; DMS<sub>Tukey</sub> = 832; CV = 29%

Colmo: DMS<sub>Dunnett</sub> = 1210; DMS<sub>Tukey</sub> = 518; CV = 30%

Folha senescente: DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,5; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,2; CV = 9%

Médias seguidas por letras iguais na coluna, dentro de cada parte da planta, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 0,05 de significância; \* médias diferem do tratamento controle (sem aplicação de K<sub>2</sub>O), pelo teste de Dunnett, a 0,05 de significância. Dados de folhas senescentes transformados para ln (x+1).

No colmo, o acúmulo médio de K com o fertilizante organomineral foi maior em relação à fonte mineral, apresentando 842 mg vaso<sup>-1</sup> a mais do nutriente acumulado, o que equivaleu a 45% de aumento. Este resultado seguiu a mesma tendência do teor de K

(TABELA 9) e do acúmulo de fitomassa seca (TABELA 12) no colmo, que também foram maiores com o fertilizante organomineral, mesmo que o aumento de K acumulado no colmo com o organomineral não tenha sido significativo.

Os maiores incrementos proporcionados pelo fertilizante organomineral para o teor e o acúmulo de K no colmo, bem como para a produção de fitomassa seca nesse componente da planta, revelam a eficiência dessa fonte no suprimento de K para a cana-de-açúcar. O aumento das cargas elétricas negativas no solo possivelmente promovido pela fração orgânica do fertilizante organomineral, que mantém o K adsorvido no complexo de troca e diminui sua perda por lixiviação, associado à liberação gradual de nutrientes que ocorre à medida que a matéria orgânica vai sendo decomposta, podem explicar a eficiência do fertilizante organomineral observada neste estudo.

### **2.3.5.3 Fitomassa seca**

O acúmulo de fitomassa seca de colmos, ponteiros, folhas senescentes e da parte aérea total das plantas aumentou em função das doses dos fertilizantes, independentemente da fonte utilizada (FIGURA 16). O acúmulo de fitomassa ajustou-se ao modelo linear, esperando-se um aumento de 11,4, 6,9, 1,9 e 2,6 g vaso<sup>-1</sup> na fitomassa seca total, de colmos, de ponteiros e de folhas senescentes, respectivamente, para cada kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante aplicado.

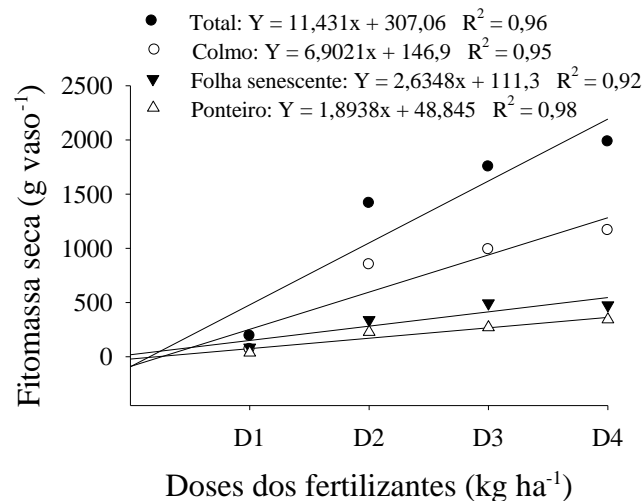
Considerando a compartimentação do acúmulo de fitomassa seca nas partes da planta, os colmos representaram 58%, os ponteiros, 16% e as folhas senescentes, 26%, em média, observando-se maior influência dos colmos no acúmulo de fitomassa seca total (TABELA 12). No período inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar, observou-se que a maior parte da massa de matéria fresca da planta deveu-se ao crescimento de folhas e ponteiros. Com o avanço do ciclo da cultura, a fitomassa fresca de folhas e ponteiros diminuiu, dando lugar ao crescimento de colmos. Espera-se, de fato, uma inversão da fitomassa seca acumulada pelo colmo, que supera o acúmulo de fitomassa seca das folhas após um tempo posterior ao plantio, mantendo-se superior até o final do ciclo da cultura.

Oliveira et al. (2010), trabalhando com onze variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena, observaram que no final do ciclo da cultura, o acúmulo de fitomassa seca do colmo foi superior ao da folha + ponteiro. Maior quantidade de massa seca no colmo em relação às outras partes da planta (ponteiros e folhas

senescentes) no momento da colheita também foi verificada por Faroni (2008), que obteve entre 60 e 65% da massa seca total da planta representada pelos colmos, 12 a 14% representada pelos ponteiros e cerca de 23 a 25% da parte aérea representada pelas folhas secas.

Vale ressaltar que o corte das plantas aos 231 dias após o transplântio das mudas para os vasos ocorreu devido ao início de tombamento sofrido pelas plantas em razão da limitação do crescimento imposta pelos recipientes de cultivo (vasos de 200 L). Isso demonstra que o acúmulo de fitomassa seca possivelmente não havia cessado quando as plantas foram colhidas.

A cana-de-açúcar apresenta intenso crescimento vegetativo nos períodos em que predominam temperaturas elevadas, precipitação pluvial e radiação solar, sendo necessário que haja uma deficiência térmica ou hídrica para que a planta entre em maturação (DELGADO; CESAR, 1977). Como prevaleceram condições de alta umidade do solo e altas temperaturas próximo ao momento da colheita (FIGURA 1), provavelmente a planta encontrava-se em crescimento vegetativo, o que pode ter sido a causa do seu tombamento.



**FIGURA 16.** Acúmulo de fitomassa seca na parte aérea total e nas partes da cana-planta (colmo, folha senescente e ponteiro), variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses (kg ha<sup>-1</sup>) dos fertilizantes mineral (D1: 0, D2: 400, D3: 600 e D4: 800) e organomineral (D1: 0, D2: 800, D3: 1200 e D4: 1600). Média das duas fontes.

Na análise de contrastes pelo teste de Dunnett, todos os tratamentos proporcionaram acréscimo da fitomassa seca acumulada na parte aérea total e nas diferentes partes da planta (TABELA 12). Os resultados revelam o efeito positivo da

aplicação dos nutrientes (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O) na cana-de-açúcar, observando-se que na ausência de adubação (controle), a produtividade, em termos de massa vegetal, foi sensivelmente afetada.

A diferença no acúmulo de fitomassa seca ocorreu entre o controle e a aplicação dos tratamentos, porém, não houve diferença entre as fontes, mostrando que o fertilizante organomineral teve eficiência similar ao mineral quando se avaliou a fitomassa seca acumulada no primeiro corte da cana-de-açúcar. Mesmo sem ter sido observada diferença significativa entre as fontes, a maior média de fitomassa seca acumulada na parte aérea total e no colmo da cana-planta foi verificada com a aplicação do fertilizante organomineral, com incremento em torno de 5% (87 g vaso<sup>-1</sup>) e 12% (116 g vaso<sup>-1</sup>) no acúmulo de fitomassa seca, respectivamente, na parte aérea total e no colmo (TABELA 12).

**TABELA 12.** Acúmulo de fitomassa seca total na parte aérea total e nas partes da cana-planta (colmo, folha senescente e ponteiro), variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses (kg ha<sup>-1</sup>) dos fertilizantes mineral (D1: 0, D2: 400, D3: 600 e D4: 800) e organomineral (D1: 0, D2: 800, D3: 1200 e D4: 1600).

Parte da planta	Fertilizante	Doses dos fertilizantes (kg ha <sup>-1</sup> )				Média
		D1	D2	D3	D4	
		----- g vaso <sup>-1</sup> -----				
Total	Mineral		1380,1*	1643,1*	1998,6*	1673,9 a
	Organomineral	191,2	1452,9*	1860,9*	1968,6*	1760,8 a
Colmo	Mineral		832,4*	879,1*	1118,5*	943,3 a
	Organomineral	68,1	867,1*	1098,9*	1212,8*	1059,6 a
Folha senescente	Mineral		343,8*	496,2*	515,0*	451,7 a
	Organomineral	86,2	335,0*	490,0*	435,0*	420,0 a
Ponteiro	Mineral		204,0*	267,7*	365,1*	279,0 a
	Organomineral	36,9	250,8*	272,0*	320,8*	281,2 a

MSPA: DMS<sub>Dunnett</sub> = 525,3; DMS<sub>Tukey</sub> = 225,1; CV = 18%

Colmo: DMS<sub>Dunnett</sub> = 413,9; DMS<sub>Tukey</sub> = 117,3; CV = 24%

Folha senescente: DMS<sub>Dunnett</sub> = 163,2; DMS<sub>Tukey</sub> = 69,9; CV = 21%

Ponteiro: DMS<sub>Dunnett</sub> = 133,6; DMS<sub>Tukey</sub> = 57,2; CV = 27%

Médias seguidas por letras iguais na coluna, dentro de cada parte da planta, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 0,05 de significância; \* médias diferem do tratamento controle (sem adubação), pelo teste de Dunnett, a 0,05 de significância.

Um dos fatores que explica este resultado é a maior disponibilidade de nutrientes, como P e K, na solução do solo quando foi aplicado o fertilizante organomineral. A importância da adubação é um assunto consagrado nas pesquisas com cana-de-açúcar e segundo a ANDA (2008), essa cultura consome aproximadamente 13% do total de fertilizantes utilizados anualmente no Brasil.

Dessa forma, o fertilizante organomineral mostra-se como uma alternativa viável para substituição total ou parcial da adubação mineral convencional, representando ainda importante reciclagem de matéria orgânica e nutrientes com o aproveitamento de resíduos oriundos de diversas cadeias de produção.

### 2.3.6 Produção de colmos e rendimento de açúcar

Os modelos de Mitscherlich ajustados à produção de colmos (eq. 2 e 3) e ao rendimento de açúcar (eq. 4 e 5) da cana-planta na época da colheita foram:

$$\text{Organomineral} \quad y = 5,06002 (1 - 10^{-0,00618 (x + 5,01641)}) \quad R^2 = 0,92 \quad (2)$$

$$\text{Mineral} \quad y = 4,96292 (1 - 10^{-0,00563 (x + 5,54368)}) \quad R^2 = 0,98 \quad (3)$$

$$\text{Organomineral} \quad y = 677,30778 (1 - 10^{-0,00517 (x + 5,09835)}) \quad R^2 = 0,91 \quad (4)$$

$$\text{Mineral} \quad y = 656,61284 (1 - 10^{-0,00486 (x + 5,43907)}) \quad R^2 = 0,98 \quad (5)$$

sendo y a produção de colmos ou o rendimento de açúcar obtidos com a aplicação do fertilizante e x, a dose do fertilizante aplicada.

Observa-se que a adição das doses crescentes dos fertilizantes resultou em acréscimos menores, tanto na produção de colmos como no rendimento de açúcar (FIGURA 17). Dessa forma, as curvas ajustadas podem ser divididas em duas fases: na primeira, ocorreu um crescimento acentuado dos valores estimados em resposta à adubação, quando foi aplicada a dose mais baixa dos fertilizantes e na segunda, o crescimento foi menor com o aumento das doses.

Este comportamento da curva de resposta pode ser explicado pela lei dos incrementos decrescentes, proposta por Mitscherlich em 1909. Segundo essa lei, a aplicação de doses sucessivas de um nutriente deficiente no solo resulta em um rápido aumento de produtividade no início, seguido de incrementos cada vez menores de produção, até não haver mais respostas à adição do nutriente (MALAVOLTA, 1980).

Como a adubação é um importante fator da produtividade da cana-de-açúcar, o incremento maior de produção em relação ao tratamento controle observado com a menor dose de fertilizante pode ser explicado pela adição, na forma de  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , respectivamente, de P e K, que são elementos essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Orlando Filho, Macedo e Tokeshi (1994) destacaram que a falta de qualquer macro ou micronutriente no solo ou no fertilizante faz com que haja

uma redução na produtividade da cana e, conseqüentemente, reflete no rendimento de açúcar.

Pela análise do ajuste dado pela eq. (2), é possível inferir que a produção de colmos correspondeu a 4,2 kg vaso<sup>-1</sup> no tratamento que recebeu a dose intermediária do fertilizante organomineral (D3: 1200 kg ha<sup>-1</sup>). Com a aplicação do fertilizante mineral na dose correspondente de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O (600 kg ha<sup>-1</sup>), as plantas produziram menos, obtendo-se 4,0 kg vaso<sup>-1</sup> segundo a eq. (3).

A diferença entre os fertilizantes aplicados é pouco expressiva, com aumento na produção de colmos de 200 g vaso<sup>-1</sup> com o fertilizante organomineral em relação ao mineral, o correspondente a um acréscimo de 5% (FIGURA 17a). No entanto, essa diferença foi significativa e o melhor resultado do fertilizante organomineral se deve possivelmente à maior eficiência de aproveitamento dos nutrientes quando em mistura com a matéria orgânica.

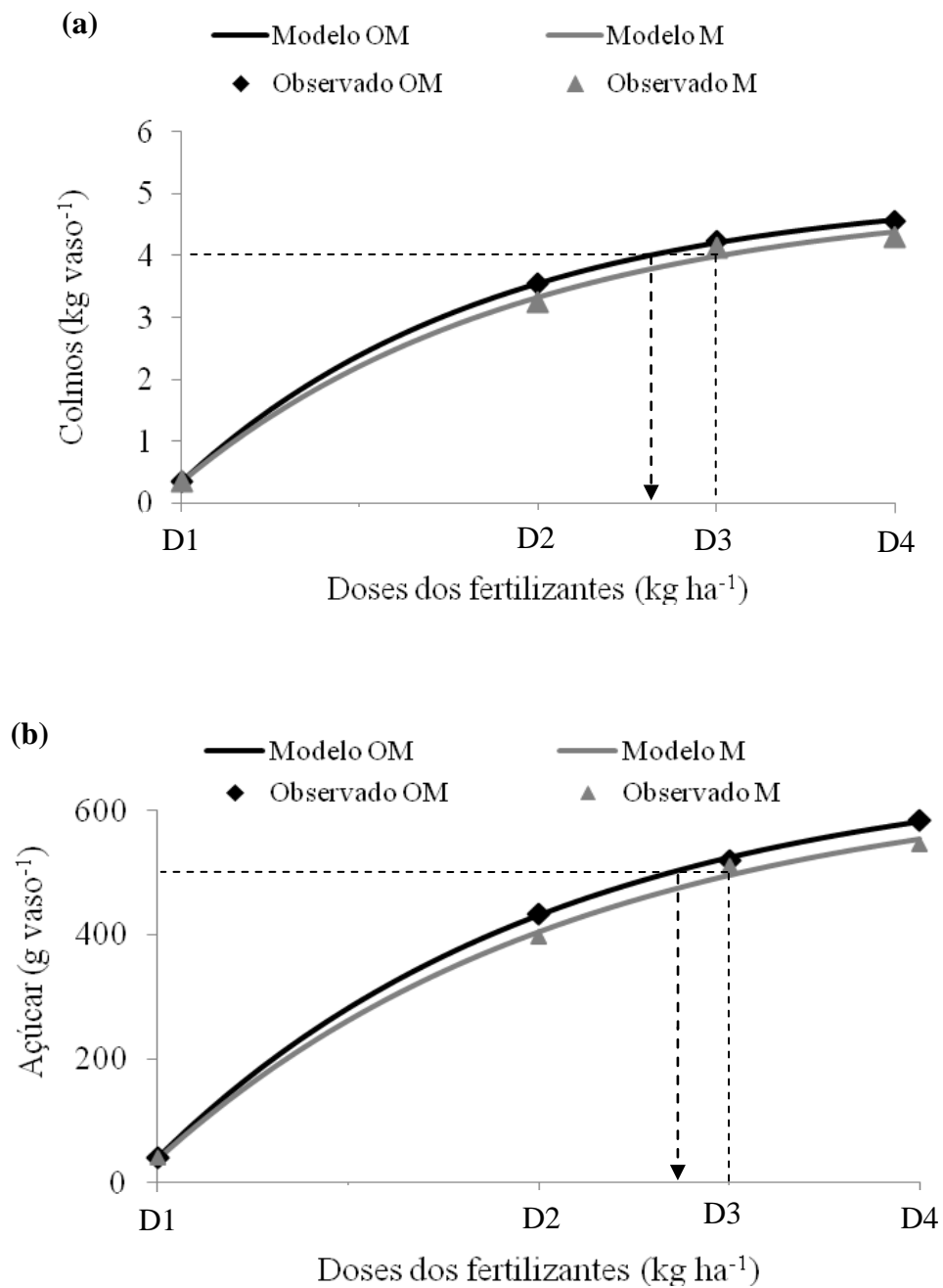
Vale ressaltar que a limitação do crescimento radicular imposta pelos recipientes de cultivo, em que as raízes ficaram confinadas no volume de solo dos vasos e, conseqüentemente, tiveram o crescimento limitado, pode ter atenuado a diferença entre as fontes. Se o crescimento das plantas não tivesse sido limitado por essa barreira física, possivelmente as diferenças entre as fontes seriam mais acentuadas.

Os dados de perfilhamento e altura do colmo no momento da colheita comprovam a limitação dos vasos sobre o desenvolvimento das plantas. Em média, foram observadas 4,5 plantas em cada vaso e colmos com 1,9 m de altura, em todos os tratamentos que receberam adubação, independentemente de qual fertilizante foi aplicado. Possivelmente, a competição entre perfilhos pelos fatores de crescimento, como luz, espaço, água e nutrientes, aumentou com o avanço do desenvolvimento da cultura, refletindo-se na morte de perfilhos e na paralisação da resposta aos tratamentos, atingindo um equilíbrio no final do ciclo.

Para o rendimento de açúcar, o efeito da aplicação dos fertilizantes foi similar à produção de colmos, com pequena diferença, porém significativa, entre os fertilizantes (FIGURA 17b). Verifica-se que o aumento em rendimento de açúcar decorreu da maior produção de colmos por vaso em resposta à aplicação das doses dos fertilizantes. Analisando o ajuste fornecido pela eq. (4), a aplicação da dose intermediária de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O (D3) resultou no rendimento de açúcar estimado em 525 g vaso<sup>-1</sup>, quando se aplicou o fertilizante organomineral, enquanto o mineral proporcionou rendimento 6%



menor ( $495 \text{ g vaso}^{-1}$ ), o que correspondeu a um decréscimo de  $30 \text{ g vaso}^{-1}$ , de acordo com a eq. (5).



**FIGURA 17.** Produção de colmos (a) e rendimento de açúcar (b) da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) dos fertilizantes mineral (D1: 0, D2: 400, D3: 600 e D4: 800) e organomineral (D1: 0, D2: 800, D3: 1200 e D4: 1600). Linhas tracejadas ilustram o cálculo do equivalente em fertilizante mineral (EqM).

Na Tabela 13, são apresentados os resultados de produção de colmos e rendimento de açúcar obtidos com cada dose aplicada em relação ao tratamento controle e a comparação das fontes entre si.

**TABELA 13.** Produção de colmos e rendimento de açúcar da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) dos fertilizantes mineral (D1: 0, D2: 400, D3: 600 e D4: 800) e organomineral (D1: 0, D2: 800, D3: 1200 e D4: 1600).

Característica	Fertilizante	Doses dos fertilizantes ( $\text{kg ha}^{-1}$ )				Média
		D1	D2	D3	D4	
-----kg vaso <sup>-1</sup> -----						
Prod. de colmos	Mineral		3,2*	4,1*	4,3*	3,9 a
	Organomineral	0,4	3,5*	4,2*	4,6*	4,1 a
-----g vaso <sup>-1</sup> -----						
Rend. de açúcar	Mineral		395,5*	511,6*	545,8*	484,3 a
	Organomineral	39,6	434,1*	519,1*	584,9*	512,7 a
Prod. de Colmos: $\text{DMS}_{\text{Dunnett}} = 1,0$ ; $\text{DMS}_{\text{Fonte}} = 0,4$ ; CV = 14%						
Rend. de Açúcar: $\text{DMS}_{\text{Dunnett}} = 126,6$ ; $\text{DMS}_{\text{Fonte}} = 54,2$ ; CV = 15%						

Médias seguidas por letras iguais na coluna, dentro de cada característica, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 0,05 de significância; \* médias diferem do tratamento controle (sem adubação), pelo teste de Dunnett, a 0,05 de significância.

Na comparação dos tratamentos que receberam aplicação dos fertilizantes com o tratamento controle, verificou-se efeito positivo da adubação sobre a produção de colmos e rendimento de açúcar da cana-planta, independentemente do fertilizante (TABELA 13). Observou-se em média, logo com a menor dose (D2), um aumento de  $2,95 \text{ g vaso}^{-1}$  na produção de colmos em relação à ausência de adubação (D1). Da terceira (D3) para a segunda dose (D2), o acréscimo foi de apenas 24% ( $0,8 \text{ g vaso}^{-1}$ ) e de 7% ( $0,3 \text{ g vaso}^{-1}$ ) da quarta (D4) para a terceira dose (D3). Essas observações confirmam os incrementos cada vez menores obtidos com o aumento das doses dos fertilizantes.

### 2.3.7 Equivalente em fertilizante mineral

Utilizando a eq. (2), calculou-se qual dose de fertilizante organomineral seria necessária para obter a mesma produção de colmos que foi obtida com a utilização do fertilizante mineral. O EqM calculado para cada uma das doses do fertilizante mineral e a dose equivalente de nutrientes são apresentados na Tabela 14. Verifica-se que o fertilizante organomineral foi superior ao mineral em todas as doses aplicadas, apresentando índices de 112%, 113% e 115% de EqM.

Os resultados indicam que a aplicação de 14-70-70 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, de N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O com o fertilizante organomineral permite substituir a adubação mineral (16-80-80 de N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) e obter uma eficiência 12% maior. Da mesma forma, para as doses 24-120-120 e 31-160-160 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, de N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O, o fertilizante organomineral substitui o mineral e apresenta 13 e 15% a mais de eficiência.

Estes resultados evidenciam que o fertilizante organomineral pôde ser usado no cultivo de cana-de-açúcar em vasos com alta eficiência, proporcionando economia no uso de fertilizante mineral e incremento na produção de colmos. Em trabalho realizado com fertilizante organomineral a partir de resíduos da indústria alcooleira, Santos et al. (2008) verificaram ser possível a substituição de parte do adubo mineral pela torta de filtro, reduzindo os custos da adubação fosfatada para a cana-planta. Na cultura da batata, a aplicação de 200 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> com fertilizante organomineral mostrou-se mais eficiente na produtividade em comparação a outras fontes fosfatadas (superfosfato triplo e termofosfato Yoorim) (BERTANI, 1998).

**TABELA 14.** Doses de nutrientes proveniente do fertilizante organomineral (B) calculadas por meio das equações de Mitscherlich para atingir a mesma produção de colmos com a adubação mineral (A).

Produção de colmos kg vaso <sup>-1</sup>	Doses de nutrientes (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)		EqM
	Mineral (A)	Organomineral (B)	
	kg ha <sup>-1</sup>		—%—
3,3	16-80-80	14-70-70	112
4,0	24-120-120	21-104-104	113
4,4	31-160-160	27-136-136	115

A resposta da cultura ao fertilizante organomineral foi maior quanto maior a dose aplicada, ou seja, o aumento das doses aumentou a eficiência da fonte testada neste estudo, o que pode ser explicado pelo aumento da eficiência nutricional proporcionada por essa fonte. Para Cooke (1987), a eficiência nutricional é definida como o aumento de produtividade por unidade de nutriente aplicado.

Neste estudo, observou-se que a disponibilidade de P no solo diminuiu na presença da maior dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em razão da adsorção do nutriente. No caso do K, houve pouco acréscimo de uma dose para outra mas, em geral, os teores trocáveis foram baixos em todas as doses aplicadas de K<sub>2</sub>O. Diante do baixo teor de K no solo e da baixa disponibilidade de P na maior dose de fertilizante aplicada, possivelmente a planta aperfeiçoou sua utilização e tornou-se mais eficiente com a aplicação do fertilizante

organomineral. Essa eficiência possivelmente se deve à presença da matéria orgânica, que, por sua vez, aumenta a eficiência de aproveitamento dos nutrientes pela planta.

Gullo (2007), avaliando o uso de um produto organomineral à base de ácido húmico em cana-de-açúcar, observou resposta de produtividade inversamente proporcional à quantidade de adubo utilizado. Neto (2008), aplicando doses de P em diferentes solos, também observou melhor eficiência da cana-de-açúcar no solo com menor disponibilidade de nutrientes. Este autor verificou que, para a mesma produtividade, o conteúdo total de P foi 2,5 vezes maior no solo com condição menos restritiva ao P comparado ao solo com maior capacidade de adsorção, o que revela a maior eficiência da planta pela otimização do uso do nutriente.

Os níveis crescentes de um nutriente fazem com que a eficiência nutricional diminua (FAGERIA, 1998). Entretanto, o mesmo autor considera que o maior lucro é obtido com a alta produtividade, o que significa que a melhor eficiência nutricional é aquela obtida sob o nível de nutriente adequado em que a produtividade máxima foi alcançada. Neste caso, considera-se que a maior dose do fertilizante organomineral foi a que resultou na maior eficiência nutricional por promover os maiores valores para a produção de colmos e rendimento de açúcar, que são características de grande importância na qualidade da cana-de-açúcar.

### **2.3.8 Variáveis tecnológicas**

A aplicação das doses dos fertilizantes afetou a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Independentemente da fonte, observa-se aumento linear para o Brix, Pol cana, Pol caldo e Pureza com as doses aplicadas. Para Fibra e AR, os fertilizantes provocaram redução com o aumento da dose (FIGURA 18).

Neste trabalho, os teores variaram de 16,6 a 17,8% para Brix, de 12,1 a 12,8% para pol da cana, de 14,2 a 15,1% para pol do caldo, de 11,5 a 11,8% para fibra, de 82,2 a 84,3% para pureza e de 0,7 a 0,6% para AR nos tratamentos que receberam aplicação dos fertilizantes (TABELA 15).

Os resultados obtidos mostram que a variedade em estudo apresentou teores de Brix próximos ao valor mínimo considerado ideal para uma cana madura, que deve ser 18% no início e durante o decorrer da safra (COPERSUCAR, 1980). O teor mínimo de 18% de Brix foi alcançado apenas com a dose máxima de fertilizante,

verificando-se que as plantas cultivadas com as menores doses não apresentavam teor de sólidos solúveis ideal para a colheita (FIGURA 18a).

Com relação aos teores de pol da cana (FIGURA 18b) e pol do caldo (FIGURA 18c), os valores encontrados também estão próximos aos valores mínimos adequados para uma cana madura em início de safra, que são 13% de pol na cana e 15,3% de pol no caldo (BRIEGER, 1968).

Os teores de fibra reduziram sensivelmente à medida que se aumentou as doses dos fertilizantes, indicando que, para cada 100 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante aplicado, espera-se uma retração média de 0,31% no teor de fibra (FIGURA 18d). Todavia, esses teores encontram-se acima dos níveis ideais estabelecidos por Fernandes (2000), que devem variar de 10 a 11% para uma matéria-prima adequada para industrialização.

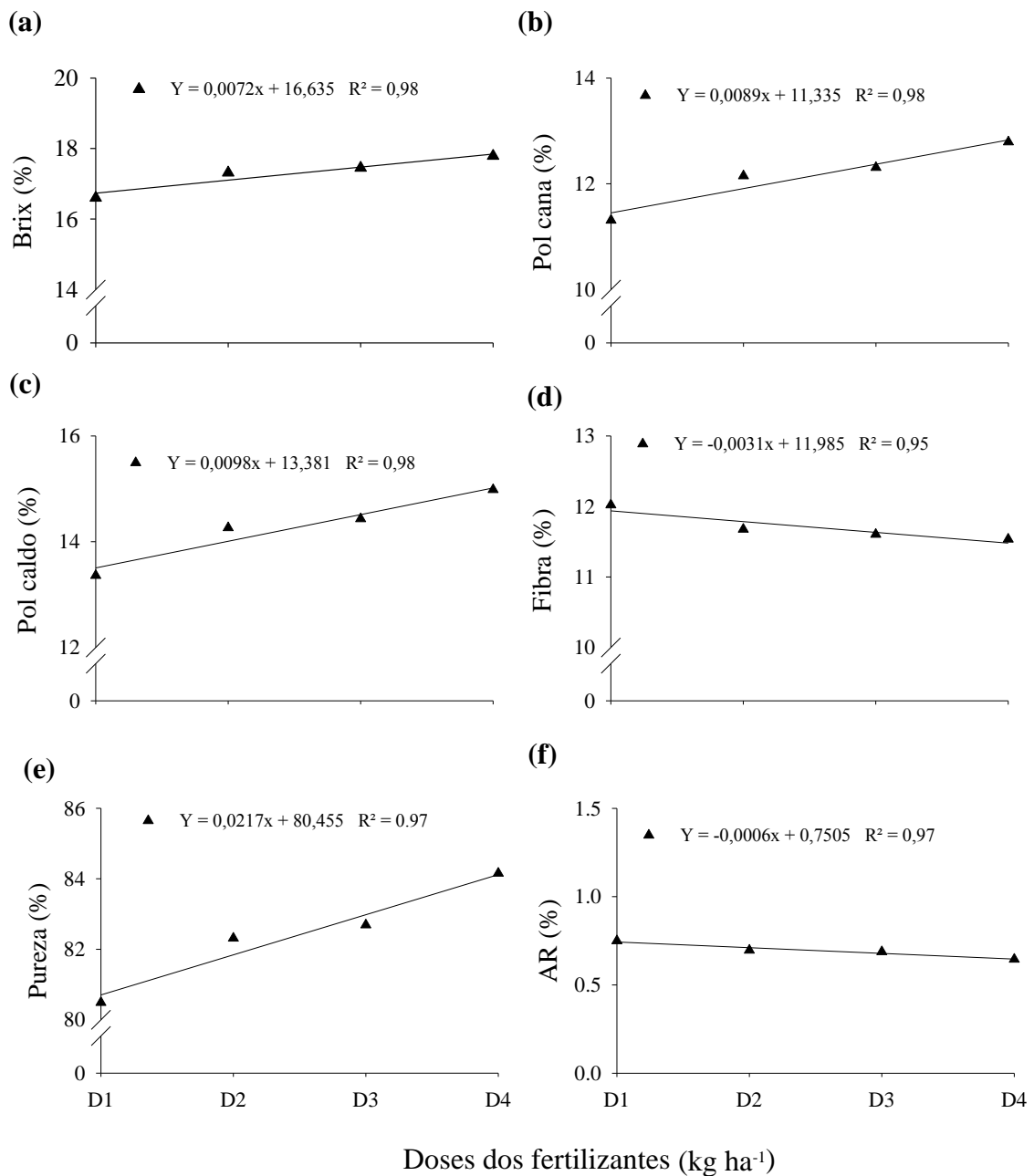
A pureza, que consiste no percentual de sacarose contida nos sólidos solúveis do caldo, apresentou um incremento esperado de 2,17% para cada 100 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante aplicado (FIGURA 18e). Neste estudo, a cana-de-açúcar apresentou pureza média, de acordo com os critérios de César e Silva (1993), que relatam que a variedade é considerada rica quando a pureza do caldo é superior a 85%, média com pureza superior a 82% e pobre com pureza inferior a esse valor.

Os teores de AR diminuíram linearmente com as doses de fertilizante, indicando que, para cada 100 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante que se adiciona, espera-se uma redução de 0,06%. Neste estudo, foram encontrados teores de AR dentro do limite estabelecido por Brieger (1968) de, no máximo, 1% para uma cana madura. Entretanto, os teores variando de 0,7 a 0,6% são maiores em relação aos teores normalmente obtidos por diversos autores no momento da colheita, ou seja, em torno de 0,4% (GALDIANO, 2008; OLIVEIRA et al., 2009; OTTO, VITTI e LUZ, 2010).

De acordo com Lavanholi (2007), a maturação é de fundamental importância para a cana-de-açúcar, uma vez que os teores de sacarose são mais elevados quando a planta está em plena maturação. Um dos fatores determinantes do teor de sacarose nos colmos consiste na época de colheita da planta, uma vez que as condições ambientais desfavoráveis ao crescimento vegetativo influenciam fortemente o acúmulo de sacarose (MURARO et al., 2009).

Neste trabalho, a cana-de-açúcar colhida em março/2012, aos 231 dias após o transplântio das mudas para os vasos, não sofreu período de restrição hídrica, o que pode ter prejudicado o acúmulo de sacarose. Além disso, a elevada precipitação

verificada no período antecedente à colheita certamente contribuiu com o desenvolvimento vegetativo da planta, impedindo a maturação.



**FIGURA 18.** Variáveis tecnológicas da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses (kg ha<sup>-1</sup>) dos fertilizantes mineral (D1: 0, D2: 400, D3: 600 e D4: 800) e organomineral (D1: 0, D2: 800, D3: 1200 e D4: 1600): sólidos solúveis no caldo - Brix (a); sacarose contida na cana - Pol cana (b); sacarose contida no caldo - Pol caldo (c); fibra (d); pureza aparente do caldo (e) e açúcares redutores no caldo - AR (f).

Com relação aos fertilizantes, os efeitos similares sobre as características tecnológicas confirmam a igualdade na eficiência dos mesmos sobre a qualidade da matéria-prima de cana-de-açúcar (TABELA 15).

**TABELA 15.** Variáveis tecnológicas da cana-planta, variedade IAC 95-5000, em função da aplicação de doses ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) dos fertilizantes mineral (D1: 0, D2: 400, D3: 600 e D4: 800) e organomineral (D1: 0, D2: 800, D3: 1200 e D4: 1600).

Variável	Fertilizante	Doses dos fertilizantes ( $\text{kg ha}^{-1}$ )				Média
		D1	D2	D3	D4	
Brix (%)	Mineral		17,4	17,4	17,7	17,5 a
	Organomineral	16,6	17,2	17,4	17,8*	
Pol cana (%)	Mineral		12,2	12,4	12,7*	12,4 a
	Organomineral	11,3	12,1	12,2	12,8*	
Pol caldo (%)	Mineral		14,3	14,5	14,9*	14,6 a
	Organomineral	13,4	14,2	14,4	15,1*	
Fibra (%)	Mineral		11,8	11,6	11,5	11,6 a
	Organomineral	12,0	11,5	11,5	11,6	
Pureza (%)	Mineral		82,2	83,2	84,0*	83,1 a
	Organomineral	80,5	82,4	82,2	84,3*	
AR (%)	Mineral		0,7	0,7	0,6*	0,7 a
	Organomineral	0,7	0,7	0,7	0,6*	

$CV_{\text{BRIX}} = 3\%$ ;  $CV_{\text{Pol cana}} = 5\%$ ;  $CV_{\text{Pol caldo}} = 5\%$ ;  $CV_{\text{Fibra}} = 2\%$ ;  $CV_{\text{Pureza}} = 2\%$ ;  $CV_{\text{AR}} = 6\%$

Médias seguidas por letras iguais na coluna, dentro de cada variável, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 0,05 de significância; \* médias diferem do tratamento controle (sem adubação), pelo teste de Dunnett, a 0,05 de significância.

## 2.4 CONCLUSÕES

1. Os teores no solo de P, K e P remanescente aumentaram com o acréscimo das doses de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  fornecidas pelos fertilizantes.
2. A resina trocadora de íons apresentou, nas duas épocas de amostragem, maior capacidade de extração de P em relação ao Mehlich-1 que, por sua vez, não detectou os reais teores de P disponível para a planta.
3. A análise de P remanescente revelou maior capacidade de adsorção de P com o passar do tempo e com a aplicação do fertilizante organomineral.
4. Na planta, independentemente das fontes, as doses de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  promoveram aumento de: P (folha e ponteiro), K (folha), P acumulado (total, colmo e ponteiro), K acumulado e fitomassa seca (total, ponteiro, colmo e folha senescente).
5. O fertilizante organomineral mostrou-se mais eficiente em todas as doses aplicadas, podendo substituir o fertilizante mineral e apresentar até 15% a mais de eficiência na produção de colmos de cana-de-açúcar.



## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA JR., A. B.; et al. Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.10, p.1004 - 1013, 2011.
- ALMEIDA JR., A. B. **Adubação orgânica em cana-de-açúcar: efeitos no solo e na planta**. 2010. 58f. Dissertação. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010.
- ALVAREZ V., V. H.; et al. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.25, p.27-33, 2000 (Boletim Informativo).
- ALVAREZ V., V. H.; et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p.25-32. 1999.
- ALVAREZ, V., V. H.; FONSECA, D. M. Definição de doses de fósforo para a determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios de casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, n.1, p.49-55, 1990.
- ANDA - ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. Anuário Estatístico do Setor de Fertilizantes. São Paulo, 2008.
- ANDRADE, F. V.; et al. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1003-1011, 2003.
- BAHIA FILHO, A. F. C.; et al. Sensibilidade de extratores químicos à capacidade tampão de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.7, p.243-249, 1983.
- BEBÉ, F. V. **Atributos agroindustriais, nutricionais e de fertilidade do solo em cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça**. 2011. 86f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2011.
- BENITES, V. M.; MENDONÇA, E. S. Propriedades eletroquímicas de um solo eletropositivo influenciadas pela adição de diferentes fontes de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.215-221, 1998.
- BERTANI, R. M. A. **Eficiência agrônômica de fosfatos na cultura da batata (*Solanum tuberosum* ssp *tuberosum*)**. 1998. 113f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1998.
- BORTOLON, L.; SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C. Métodos de extração de fósforo e potássio no solo sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.8, 2009.

- BÜLL, L. T.; et al. Eficiência agronômica de fertilizante fosfatado organo-mineral obtido através de compostagem com lixo urbano. **Cultura Agronômica**, Ilha Solteira, v.8, n.1, p.1-22, 1999.
- BRIEGER, F. O. Início da safra. Como determinar a maturação. **Boletim Informativo Copereste**, v.4, p.1-3, 1968.
- CAJUSTE, L. J.; KUSSOW, W. R. Use and limitations of the North Carolina method to predict available phosphorus in some oxisols. **Tropical Agriculture**, Trinidad, v.51, p.246-252, 1974.
- CANELLAS, L. P.; et al. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhico e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n.27, p.935-944, 2003.
- CASTRO, P. R. C. Aplicações da fisiologia vegetal no sistema de produção da cana-de-açúcar. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL DE FISILOGIA DE CANA-DE-ACUCAR, 2000, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Stab: Açúcar, Álcool e Subprodutos, p.1-9, 2000.
- CÉSAR, M. A. A.; SILVA, F. C. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a indústria sucroalcooleira**. Piracicaba: Departamento Editorial [do] Centro Acadêmico Luiz de Queiroz. p.39, 1993.
- COLETI, J. T.; et al. Remoção de macronutrientes pela cana-planta e cana-soca, em Argissolos, variedade RB835486 e SP813250. **Stab: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.24, n.5, p.32-36, 2006.
- COOKE, G. W. Maximizing fertilizer efficiency by overcoming constraints to crop growth. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.10, p.1357-1369, 1987.
- COPERSUCAR. **Amostragem e análise da cana-de-açúcar**. São Paulo, 1980. 37 p.
- CORRÊA, G. F.; JACOMINE, P. K. T.; KER, J. C. (Orgs.). Reunião técnica itinerante de classificação e correlação de solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011. Uberlândia. **Guia de Campo**. Uberlândia: UFU, 2011. p. 99.
- DELGADO, A. A.; CESAR, M. A. A. **Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana**. Sertãozinho: Anni. 3.v. 1977.
- DILLEWIJN, C. V. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica, 371 p. 1952.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 399 p.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. **Embrapa Informação Tecnológica**. Brasília, DF, 2009. 627 p.

- ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.551-594, 2007.
- ESPIRONELO, A.; et al. Efeitos da adubação NPK nos teores de macronutrientes das folhas de cana-de-açúcar (cana-soca). **Bragantia**, Campinas, v.45, n.2, 1986.
- FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, p.6-16, 1998.
- FARONI, C. E. **Eficiência agrônômica das adubações nitrogenadas de plantio e após o primeiro corte avaliada na primeira soca da cana-de-açúcar**. 2008. 191f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: Um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, Lavras, v.6, p.36-41, 2000.
- FERNANDES, A. C. Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar. **Stab: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.11, p.55-65, 2000.
- FLORES, R. A.; et al. Potássio no desenvolvimento inicial da soqueira de cana crua. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.42, n.1, p. 106-111, 2012.
- GALDIANO, L. C. **Qualidade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) submetida à aplicação de maturadores químicos em final de safra**. 2008. 53f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2008.
- GLÓRIA, N. A.; RODELLA, A. A. Métodos de análise quantitativa inorgânica em caldo de cana de açúcar: vinhaça e melaço I: determinação de cálcio, magnésio, potássio, enxofre e fósforo em um mesmo extrato. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, Piracicaba, v.29, p.5-17, 1972.
- GULLO, M. J. M. **Uso de condicionador de solo a base de ácido húmico na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 2007. 60f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- KORNDÖRFER, G. H.; OLIVEIRA, L. A. O potássio na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, p.469-490, 2005.
- KORNDÖRFER, G. H. Fósforo na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p.290-306. 2004.
- KORNDÖRFER, G. H.; RIBEIRO, A. C.; ANDRADE, L. A. Cana-de-açúcar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendações**

**para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação.** Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, p.285-288, 1999.

KORNDÖRFER, G. H.; FARIA, R. J.; MARTINS, M. Efeito do fósforo na produção da cana-de-ano cana-soca cultivada em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.10, p.1667-1673, 1998 (Notas Científicas).

KORNDÖRFER, G. H.; ALCARDE, J. C. Acúmulo e teor de fósforo em folhas de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.16, p.212-222, 1992.

LANA, M. C.; et al. Disponibilidade de fósforo e desenvolvimento do algodoeiro cv. IPR 120 em função de fontes de fósforo em diferentes solos. **Synergismus Scientífica UFTPR**, v.4, n.1, 2009.

LANA, R. M. Q.; et al. Parcelamento da adubação potássica na cana-planta. **Stab: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.23, p.28-31, 2004.

LAVANHOLI, M. G. D. P. Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de açúcar e álcool. In: DINARDO-MIRANDA, L. L. D.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, p.697-722, 2010.

MAIA, C. E.; et al. Teores foliares de nutrientes em meloeiro irrigado com águas de diferentes salinidades. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, (Suplemento), p.292-295, 2005.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 238 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MALAVOLTA, E. Importância da adubação na qualidade dos produtos: função dos nutrientes na planta. In: SÁ, M. E.; BUZZETI, S. (Ed.). **Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas**. São Paulo: Ícone, p.19-44, 1994.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3.ed. São Paulo: Ceres, 1981, 596 p.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980. 254 p.

MARIOTTO, J. R. **Fósforo microbiano e extraível em latossolo com adição de dejetos suíno sob plantio direto de milho**. 2009. 49f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2009.

MATIAS, G. C. S. **Eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados em solos com diferentes capacidades de adsorção de fósforo e teores de matéria orgânica**. 2010. 175f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

- MEURER, E. J. Potássio. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 432 p.
- MIELNICZUK, J. Avaliação da resposta das culturas ao potássio em ensaios de longa duração - experiências brasileiras. In: YAMADA, T.; et I. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1982. 556 p.
- MIRANDA, L. N.; et al. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.11, p.1621-1627, 2002.
- MURARO, G. B. Efeito da idade de corte sobre a composição bromatológica e as características da silagem de cana-de-açúcar plantada em dois espaçamentos e três idades de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.38, n.8, p.1525-1531, 2009.
- NETO, D. E. S.; et al. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, p.840-848, 2009.
- NETO, D. E. S. **Avaliação da disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação fosfatada para cana-planta em solos do Estado de Pernambuco**. 2008. 106f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.
- OLIVEIRA, E. C. A. **Balço nutricional da cana-de-açúcar relacionado a adubação nitrogenada**. 2011. 215f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- OLIVEIRA, E. C. A.; et al. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.42, n.3, p.579-588, 2011.
- OLIVEIRA, E. C. A.; et al. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande**, v.14, n.9, p.951-960, 2010.
- OLIVEIRA, E. L.; et al. Uso de vinhaça de alambique e nitrogênio em cana-de-açúcar irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, n.11, p.1398-1403, 2009.
- ORLANDO FIHO, J.; MACEDO, N.; TOKESHI, H. **Seja o doutor do seu canavial**. Informações Agronômica, n.67, p.1-17, 1994 (POTAFÓS: Encarte Técnico).
- ORLANDO FILHO, J. Calagem e adubação da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M. S.; OLIVEIRA, E.A.M. (Ed.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ, p.133-146, 1993.

- ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: [ s.n.], 1983. 369 p.
- OTTO, R.; VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.1137-1145, 2010.
- PANCELLI, M. A. **Nutrição potássica e produção da soqueira de cana-de-açúcar no sistema de cana crua**. 2011. 39f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2011.
- PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**, 13. ed. São Paulo, Nobel, 1990.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.
- RAIJ, B. van. Métodos de diagnose de fósforo no solo em uso no Brasil. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, p.563-587, 2004.
- RAIJ, B. van.; et al. **Análise Química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas-SP, Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285 p.
- RAIJ, B. van.; et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas, São Paulo: Instituto Agrônomo; Fundação IAC, 1996 (Boletim 100).
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A.; SILVA, N. M. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.17, n.5, p.547-566, 1986.
- REIS JR., R. A.; MONNERAT, P. H. Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em campos dos Goyatacazes, RJ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.2, p.367-372, 2002.
- RHEINHEIMER, D. S.; et al. Dessorção de fósforo em sistemas de manejo de solo avaliado por extrações sucessivas com resina trocadora de ânions. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.33, n.6, p.1053-1059, 2003.
- RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu: Instituto de Biociência, 101 p, 1995. Apostila.
- ROSSETO, R.; et al. Potássio. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C.M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo. p.289-312, 2010a.

- ROSSETO, R. R.; et al. Fósforo. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, p.271-288, 2010b.
- ROSSETO, R.; DIAS, F. L. F. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar**: indagações e reflexões. *Informações Agrônomicas*, n.110, p.6-11, 2005 (POTAFÓS: Encarte Técnico).
- ROSSETTO, R.; et al. Calagem para cana-de-açúcar e sua interação com doses de potássio. **Bragantia**, Campinas, v.63, n.1, p.105-119, 2004.
- ROSOLEM, C. A.; NAKAGAWA, J. Residual and annual potassic fertilization for soybeans. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.59, p.143-149, 2001.
- SAEG - **Sistema para Análises Estatísticas**, Versão 9.1: Fundação Arthur Bernardes. Viçosa: UFV, p.301, 2007.
- SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.2, p.576-586, 2008.
- SANTOS, D. H.; et al. Desenvolvimento de fertilizante organo-mineral a partir de resíduos da indústria sucroalcooleira para adubação de cana-planta. In: FERTBIO 2008. Desafios para o uso do solo com eficiência e qualidade ambiental. Londrina, 2008. **Anais...** Londrina, 2008. CD ROM.
- SIGMAPLOT. 2008. **For windows, version 11.0**. Systat Software, 2008.
- SILVA, T. M. R. **Nutrição potássica na primeira soqueira de cana-de-açúcar cultivada em sistema de colheita sem despalha a fogo**. 58f. TCC (Graduação em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.
- SILVA, F. A. S. E.; AZEVEDO, C. A. V. Principal Components Analysis in the Software Assistat-Statistical Attendance. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7, Reno-NV-USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.
- SILVA, F. C.; RAIJ, B. van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.2, p.267-288, 1999.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO – NÚCLEO REGIONAL SUL. Comissão de química e fertilidade do solo dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10. ed. Porto Alegre, 2004, 400 p.
- SOUZA, R. F.; et al. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.30, p.975-983, 2006.

TASSO JUNIOR, L. C.; et al. Extração de macronutrientes em cinco variedades de cana-de-Açúcar cultivadas na região centro-norte do estado de São Paulo. **Stab: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.25, n.6, 2007.

TIRITAN, C. S.; et al. Adubação fosfatada mineral e organomineral no desenvolvimento do milho. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v.6, n.1, p.08-14, 2010.

VALE, D. W.; et al. Omissão de macronutrientes na nutrição e no crescimento da cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.6, n.2, p.189-196, 2011.

WIETHÖLTER, S. Bases teóricas e experimentais de fatores relacionados com a disponibilidade de potássio do solo às plantas usando trigo como referência. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.1011-1021, 2007.



## **CAPÍTULO III**

### **LIXIVIAÇÃO DE POTÁSSIO EM FUNÇÃO DA TEXTURA DO SOLO E DO TIPO DE FERTILIZANTE (MINERAL E ORGANOMINERAL)**

## RESUMO

TEIXEIRA, WELLDY GONÇALVES. **Lixiviação de potássio em função da textura do solo e do tipo de fertilizante (mineral e organomineral)**. 2013. 18f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>.

Os fertilizantes adicionados ao solo apresentam comportamentos distintos quanto à solubilização de seus constituintes, o que influencia diretamente a mobilidade dos elementos químicos no perfil do solo. Assim, foi realizado este trabalho com o objetivo de avaliar a dinâmica de movimentação do K no perfil do solo, em função da textura do solo e da fonte do nutriente, utilizando dois tipos de fertilizantes: mineral e organomineral. O experimento foi conduzido em casa-de-vegetação do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em 2011. A mobilidade do K foi avaliada em colunas de lixiviação confeccionadas a partir de tubo de PVC, utilizando amostras de dois solos (Latosolo Vermelho distrófico), sendo um de textura argilosa e o outro, de textura média, coletadas em áreas com vegetação nativa que não receberam fertilizantes ou corretivos da acidez. O delineamento experimental foi em esquema fatorial (4x2) inteiramente casualizado (DIC) com três repetições, em dois solos com diferentes texturas. Foram aplicados os seguintes tratamentos, em dose equivalente a 1500 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O: (a) fertilizante mineral 20-5-20 com KCl solúvel; (b) fertilizante organomineral 16-1-16; (c) fertilizante organomineral 8-1-8; (d) controle, sem adubação. Durante 60 dias foi aplicada, diariamente, água em quantidade equivalente a 1.146 mm de precipitação pluvial. Ao final desse período, foram determinados os teores de K trocável em onze camadas de solo e a quantidade total de K na solução percolada. Os tratamentos que receberam fertilizante organomineral proporcionaram maior teor de K trocável nas camadas superficiais dos solos. Nas camadas mais profundas, o teor de K trocável não diferiu entre os fertilizantes, com exceção de duas camadas (25-30 cm e 30-40 cm) no solo argiloso, em que o teor desse elemento foi maior com o fertilizante mineral. Na comparação entre solos, o solo de textura média apresentou maior teor de K trocável, com distribuição mais uniforme em todas as camadas em relação ao solo argiloso. As perdas por lixiviação de K dependeram do tipo de fertilizante, com as maiores quantidades totais de K na solução percolada do tratamento que recebeu fertilizante mineral.

**Palavras-chave:** K trocável, colunas de lixiviação, solução percolada.

---

<sup>1</sup>Professor Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer - UFU

## ABSTRACT

TEIXEIRA, WELLDY GONÇALVES. **Potassium leaching as a function of soil texture and fertilizer type (mineral or organomineral)**. 2013. 18f. Dissertation (Master's degree in Agriculture/Soil Sciences) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>.

Fertilizers added to the soil present distinct behavior due to the solubility of their components, directly affecting the mobility of chemical elements through the soil profile. Therefore, this study evaluated the dynamics of K movement in the soil profile, as a function of soil texture and nutrient source, using two types of fertilizers: mineral and organomineral. The experiment was done in a greenhouse at the Institute of Agricultura Sciences, of Universidade Federal de Uberlândia (UFU), in 2011. Potassium mobility was evaluated in leaching columns made of PVC tubes, containing samples of two soils (Dystrustox), a clayey texture and a medium one, collected in areas of native vegetation that did not receive any fertilizer or soil acidity correctives. The experimental design was completely randomized, as a 4x2 factorial, with three replications, in two different texture soils. The following treatments were applied, in dose equivalent to 1500 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O: (a) mineral fertilizer 20-5-20 with soluble KCl; (b) organomineral fertilizer 16-1-16; (c) organomineral fertilizer 8-1-8; (d) control, with no fertilization. Water was applied for 60 days in amount equivalent to 1.146 mm rainfall. At the end of this period, exchangeable K was determined in eleven soil layers of the column and also, the total amount of K in the leachate solution. Organomineral fertilizer resulted in greater amount of exchangeable K in top layers of both soils. Exchangeable K contents were not different among the fertilizers in deeper soil layers, except for two layers (25-30 cm and 30-40 cm) of the clayey soil, in which the contents of this element were greater with the mineral fertilizer. Comparing both soils, the soil with medium texture presented greater contents of exchangeable K, with more uniform distribution in all layers in relation to the clayey soil. Losses by leaching depended on fertilizer type, with greater total amounts of K in the leachate solution in the treatment receiving mineral fertilizer.

**Keywords:** Exchangeable K, leaching columns, leachate solution.

---

<sup>1</sup> Supervisor: Gaspar Henrique Korndörfer - UFU

### 3.1 INTRODUÇÃO

O K é um dos nutrientes mais abundantes nos solos, porém, a maior parte encontra-se na estrutura dos minerais primários e secundários e apenas uma pequena fração encontra-se em formas disponíveis às plantas (ERNANI; ALMEIDA; SANTOS, 2007). Segundo Raij (2011), entre os fatores que mais afetam a disponibilidade de K no solo, a quantidade de água que percola no perfil e a relação desse elemento com Ca e Mg merecem destaque.

Por ser um nutriente bastante móvel no solo, quantidades significativas de K podem ser perdidas por lixiviação. Quaggio (1986) definiu a lixiviação como o movimento dos co-íons para as camadas mais profundas do solo, fora do alcance do sistema radicular, por meio de um fluxo descendente de água. Esse processo é um dos principais mecanismos de retirada de nutrientes do perfil do solo, através da água de percolação que substitui as bases por  $H^+$  e  $Al^{3+}$ , contribuindo de maneira significativa para a acidificação do solo (MARIA et al., 1993).

O tipo de solo também influencia a lixiviação de K, uma vez que a quantidade final do nutriente perdida depende do teor disponível no solo que está relacionado à textura (MALAVOLTA, 1985). Com relação às perdas, Raij (1981) afirma que o risco de lixiviação desse elemento é maior nos solos arenosos e com baixo teor de matéria orgânica. Neto (2008) mostrou que a percolação dos íons está diretamente relacionada com o tipo de solo, sendo os íons  $K^+$  e  $NO_3^-$  retidos com maior intensidade no argiloso em relação ao arenoso.

Quando os fertilizantes são adicionados ao solo, eles apresentam comportamentos distintos quanto à solubilização de seus constituintes, o que influencia diretamente a mobilidade dos elementos químicos no perfil do solo. Fertilizantes potássicos minerais, por serem solúveis em água, dissolvem-se na solução do solo imediatamente após a aplicação (ERNANI; ALMEIDA; SANTOS, 2007), favorecendo as perdas de nutrientes em curto prazo, enquanto fertilizantes organominerais podem ser uma fonte de nutrientes por mais tempo, face a presença da matéria orgânica, o que teria um efeito benéfico sobre as perdas por lixiviação de K.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a dinâmica de movimentação do K no perfil do solo, em função da textura do solo e da fonte do nutriente, utilizando os fertilizantes mineral e organomineral.

## 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.2.1 Localização e caracterização experimental

O experimento foi realizado em casa-de-vegetação do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), em 2011. Utilizaram-se amostras de um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura argilosa, (LVd1) coletado na Fazenda Experimental do Glória e de um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura média (LVd2), coletado na Fazenda Experimental Água Limpa, ambas da Universidade Federal de Uberlândia, em Uberlândia, MG. As amostras foram coletadas na camada superficial (0 a 0,2 m), em áreas com vegetação nativa que não receberam fertilizantes ou corretivos da acidez. Após a coleta, as amostras foram passadas em peneira com malha de 2 mm de abertura e caracterizadas química e fisicamente (TABELAS 16 e 17).

**TABELA 16.** Caracterização química do Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa (LVd1) e média (LVd2), utilizado no preenchimento das colunas de lixiviação.

Solo <sup>1</sup>	pH	P	K	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca	Mg	H+Al	T	V	m	K/T	M.O.
				mg dm <sup>-3</sup>			cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>		%			g kg <sup>-1</sup>
LVd1	3,9	8,9	15	4	0,4	0,1	0,2	2,5	21	27	2	15
LVd2	5,3	4,2	64	3	1,3	0,6	1,6	3,7	56	0	4	17

<sup>1</sup> LVd1: Latossolo vermelho distrófico, textura argilosa; LVd2: Latossolo vermelho distrófico, textura média. pH - CaCl<sub>2</sub>; P - Extração por resina trocadora de íons; Ca, Mg e Al - Extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; K - Extrator Mehlich (HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 05 mol L<sup>-1</sup>); t - CTC efetiva; T - CTC potencial (a pH 7,0); V - saturação por bases; m - saturação por alumínio (Embrapa, 1999). M.O. - matéria orgânica (método colorimétrico).

**TABELA 17.** Caracterização física do Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa (LVd1) e média (LVd2), utilizado no preenchimento das colunas de lixiviação.

Solo <sup>1</sup>	Areia total	Silte	Argila
		g kg <sup>-1</sup>	
LVd1	546	54	400
LVd2	750	12	238

<sup>1</sup> LVd1: Latossolo vermelho distrófico, textura argilosa; LVd2: Latossolo vermelho distrófico, textura média.

### 3.2.2. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em esquema fatorial (4x2) inteiramente casualizado (DIC), com quatro tratamentos em dois solos com diferentes texturas, em três repetições, totalizando 24 parcelas experimentais. Foram aplicados os seguintes

tratamentos: (a) fertilizante mineral, formulação 20-5-20 com KCl solúvel; (b) fertilizante organomineral, formulação 16-1-16; (c) fertilizante organomineral, formulação 8-1-8, além de um tratamento controle, sem adubação. Os fertilizantes foram aplicados em dose equivalente a 1500 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, correspondendo a 3,91 g coluna<sup>-1</sup> de K, sendo incorporados ao solo até a profundidade de 5 cm (TABELA 18).

**TABELA 18.** Formulações e doses correspondentes dos fertilizantes utilizados no experimento.

Fertilizante	Formulação	Doses do fertilizante	
		kg ha <sup>-1</sup>	g coluna <sup>-1*</sup>
Mineral	20-5-20	7500	23,6
Organomineral	16-1-16	9375	29,4
Organomineral	8-1-8	18750	58,9

\*Calculado com base na área de circunferência da coluna de lixiviação ( $\pi * R^2 = 3,14 * 0,102 = 0,0314 \text{m}^2$ ).

### 3.2.3 Instalação e condução do experimento

A parcela experimental foi composta por uma coluna de lixiviação, confeccionada a partir de tubo de PVC, com 80 cm de altura e 20 cm de diâmetro. Cada coluna foi constituída por 11 anéis de PVC, sendo seis anéis de 5 cm de altura e cinco anéis de 10 cm de altura, sobrepostos e vedados com fita adesiva. Acima de cada coluna foi colocado mais um anel de 5 cm de altura para facilitar a adição de água.

As colunas foram colocadas dentro de um suporte de aço apoiado em estrutura de madeira, de forma que ficassem suspensas do chão a uma altura de 20 cm. Na base de cada coluna, dentro do suporte de aço, foram colocadas tela de aço, manta acrílica e papel de filtro para impedir o escoamento de partículas coloidais juntamente com a solução percolada. Uma mangueira foi fixada na parte inferior do suporte de aço a fim de drenar a solução percolada para o interior das garrafas plásticas (FIGURA 19).

Após a transferência do solo para as colunas, iniciaram-se as adições de água (600 mL dia<sup>-1</sup>), por um período de 60 dias, equivalente a uma precipitação pluvial de 1.146 mm (36 L/0,0314 m<sup>2</sup>) ao término desse período. A solução percolada foi recolhida em garrafas plásticas conectadas ao dreno de cada coluna de lixiviação, a cada dois dias e armazenada em galões de 50 L para determinação do volume final percolado e do K lixiviado. A quantidade total de K na solução percolada foi estimada em função do volume total percolado (L) e a correspondente concentração de K na solução percolada (mg dm<sup>-3</sup>) de cada tratamento.



**FIGURA 19.** Detalhes da instalação do experimento: colunas de lixiviação apoiadas em suporte de madeira (a), garrafas plásticas para coleta da solução percolada (b), suporte de aço (c), tela de aço (d), manta acrílica (e), anel de PVC fixado no suporte de aço (f) e galões utilizados para armazenar a solução percolada (g).

Concluída a percolação da água, as colunas foram desmontadas, separando-se os anéis individualmente, de cima para baixo, com o objetivo de obter amostras de onze camadas, ou seja, 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25, 25-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-70 e 70-80 cm. O solo dentro das delimitações de cada anel foi seco em estufa com circulação forçada de ar, a 60°C, passado em peneira com malha de 2 mm e posteriormente determinado quanto aos teores de K trocável extraído por resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001).

### 3.2.4 Análises estatísticas

As quantidades totais de K lixiviado foram analisadas, ao final do experimento, estatisticamente por meio de análise de variância e quando F significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey. Os teores de K trocável nas diferentes camadas dos solos foram avaliados considerando o arranjo experimental de parcelas subdivididas, com os tratamentos (fontes e doses de K) distribuídos nas parcelas e as camadas, nas subparcelas.

O valor percentual de K proveniente do fertilizante e que foi perdido por lixiviação foi calculado de acordo com a eq. (6).

$$\text{K lixiviado} = \frac{\text{K lixiviado do fertilizante} - \text{K lixiviado do controle}}{\text{K fornecido pela adubação}} \times 100 \quad (6)$$

Todas as análises foram realizadas por meio do programa SISVAR (FERREIRA, 2000), com  $\alpha = 0,05$  como valor de significância e para a construção dos gráficos, foi utilizado o programa SIGMAPLOT (2008).



### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.3.1 Potássio no solo

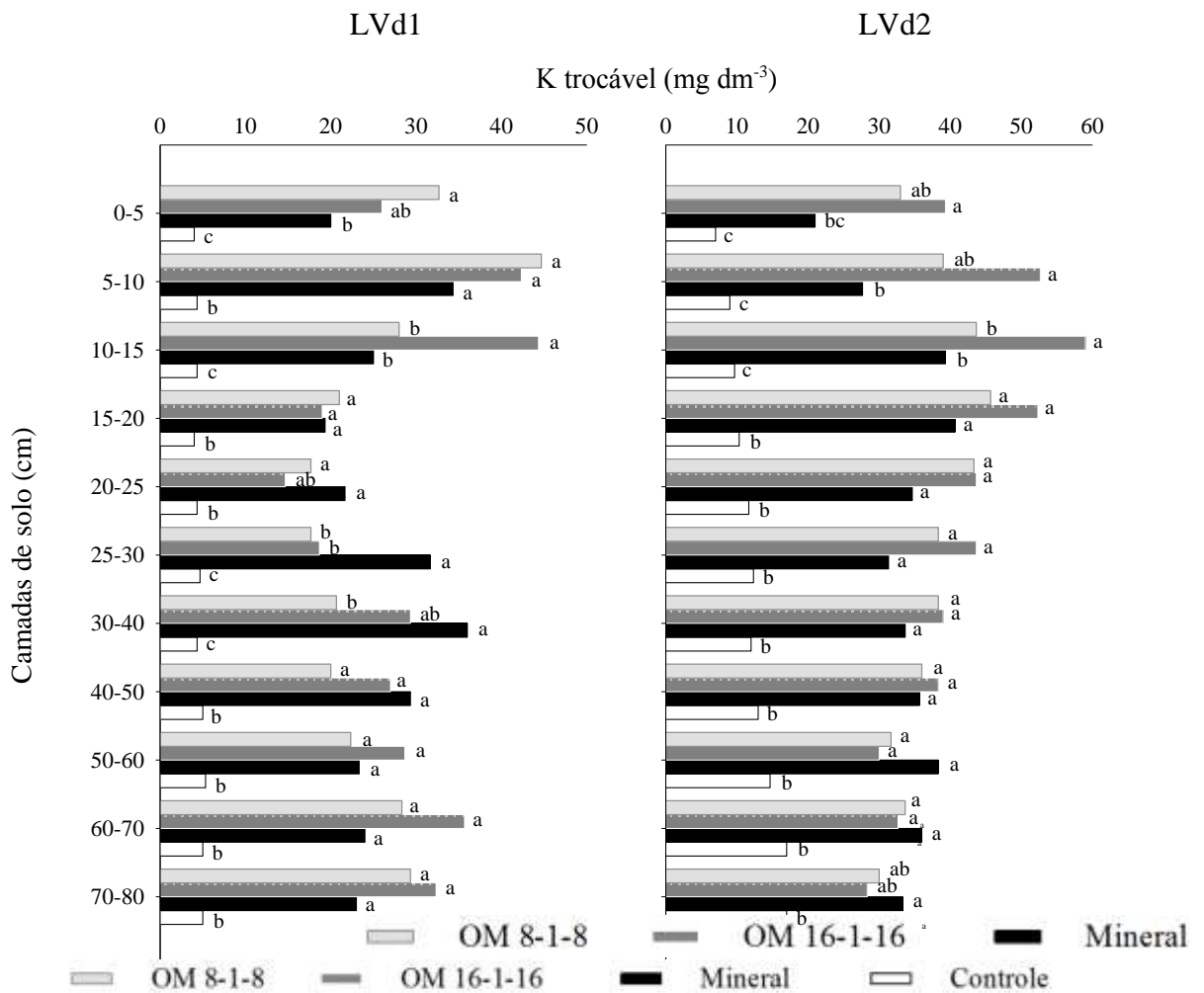
A distribuição do K após a aplicação de água simulando chuva de 1.146 mm, em função da adição de 1500 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O em dois solos e com diferentes fontes, é apresentada na Figura 20. Em todas as camadas, o tratamento controle apresentou os menores teores de K trocável. No solo argiloso, os teores trocáveis de K desse tratamento permaneceram constantes ao longo de toda a profundidade da coluna, apresentando, em média, 4,6 mg dm<sup>-3</sup>. Já no solo de textura média, observa-se aumento do teor de K trocável até a camada mais profunda (70-80 cm), passando de 7 para 17 mg dm<sup>-3</sup>. O teor inicial de K (64 mg dm<sup>-3</sup>) observado no solo de textura média possivelmente explica o seu aprofundamento até a camada mais profunda no tratamento controle, como resultado do transporte do nutriente em função da quantidade de água que percolou no perfil.

Na comparação entre as camadas, verifica-se que houve maior teor de K trocável nas camadas de 0-5 cm até 10-15 cm no solo argiloso, com decréscimo até a camada de 20-25 cm e posterior acréscimo até a camada mais profunda. No solo de textura média, a distribuição desse elemento foi mais uniforme ao longo de toda a coluna de solo, apresentando maiores quantidades de K trocável, possivelmente em função do elevado teor inicial desse elemento no solo (64 mg dm<sup>-3</sup>) (TABELA 16).

A forma de suprimento de K<sub>2</sub>O, a partir das diferentes fontes, exerceu influência na mobilidade do nutriente nas camadas mais superficiais. Observa-se que o maior teor de K trocável que predominou nas camadas de 0-5 cm até 10-15 cm, nos dois solos, foi observado nos tratamentos que receberam os fertilizantes organominerais. Nas camadas mais profundas, o teor de K trocável não diferiu entre os fertilizantes, com exceção de duas camadas (25-30 cm e 30-40 cm) no solo argiloso, em que o teor desse elemento foi maior com o fertilizante mineral (FIGURA 20).

O maior teor de K trocável nas camadas superficiais dos solos que receberam adubação organomineral, comparativamente aos solos que receberam adubação mineral, pode ser atribuído, em parte, à maior quantidade de cargas negativas conferida pela carga orgânica do fertilizante organomineral aplicado em superfície e, portanto, à maior retenção do elemento nessas camadas. O moderado acréscimo do K trocável quando foi

aplicado o fertilizante mineral evidencia o deslocamento desse nutriente para as camadas mais profundas.



**FIGURA 20.** Teor de K trocável nas camadas do Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa (LVd1) e média (LVd2), após a aplicação de 1.146 mm de água. Em cada camada, barras com letras iguais não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 0,05 de significância.

Após a adição de grande quantidade de K ( $1500 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ ) pelas fontes, ocorreu considerável aumento do K solúvel nos solos. Com o passar do tempo, possivelmente um declínio do K solúvel em função da lixiviação do K e do equilíbrio estabelecido entre a fase sólida e a solução do solo tenha ocorrido, o que pode ter modificado o padrão de concentração do nutriente nas camadas dos solos.

Por essa razão, acredita-se que o tratamento que recebeu o fertilizante mineral teve maiores teores de K nas camadas superficiais no início do experimento e, com as adições diárias de 600 mL de água durante 60 dias, o nutriente aplicado por essa fonte foi lixiviado, face a sua característica de alta solubilidade. De outro lado, os tratamentos

que receberam o fertilizante organomineral proporcionaram maior teor de K no solo após um tempo decorrido de sua aplicação, tendo em vista sua característica de liberação lenta em função da proteção química e física conferida pela matéria orgânica.

Isso indica que, embora o teor de K trocável nas camadas mais profundas dos dois solos tenha sido similar em todos os tratamentos que receberam adição das doses de  $K_2O$ , o impacto sobre o deslocamento do nutriente foi diferente com o tempo e, possivelmente, as diferenças entre as fontes teriam sido observadas em camadas mais profundas, caso a avaliação fosse feita com menos tempo após a adubação. No entanto, mesmo em avaliação realizada 60 dias após a adição das fontes, observou-se predomínio do K em camadas superficiais com a aplicação dos fertilizantes organominerais (FIGURA 19).

Acredita-se que uma parte do K proveniente do fertilizante organomineral, por estar associado à matéria orgânica, estaria disponível para lixiviação apenas depois que o equilíbrio tivesse sido alcançado entre o solo e o fertilizante, ou seja, após um tempo de contato do fertilizante com o solo, o que levaria mais tempo do que a dissolução do fertilizante mineral na superfície do solo.

O efeito sobre a mobilidade do K observado com os fertilizantes organominerais é de grande importância para o desenvolvimento vegetal, porque o nutriente estaria ao alcance da maior parte do sistema radicular, uma vez que as raízes das culturas anuais se concentram nos 20 cm superficiais. Além disso, a adição de K sobre a superfície dos solos, pelo fertilizante organomineral, provavelmente não limitaria o crescimento das plantas em cultivos que demandam maior período de tempo, face a maior disponibilidade do nutriente no solo observada com essa fonte aos 60 dias após a aplicação.

Alfaro, Jarvis e Gregory (2004), avaliando o efeito de fontes potássicas sobre a lixiviação, verificaram as maiores perdas de K ente 6 e 16 dias após a aplicação das fontes, na seguinte ordem: fertilizante inorgânico (F) > mistura de K aplicado como fertilizante inorgânico e fertilizante orgânico (F+S) > fertilizante orgânico (S). Esses autores também verificaram que o tratamento F teve concentrações superiores de K no início do experimento, enquanto os tratamentos F+S e S superaram as concentrações de K do tratamento F no final do período experimental, atribuindo esses resultados ao efeito do tempo sobre a lixiviação de K. Moreti et al. (2007) observaram melhoria nos atributos químicos de um Latossolo Vermelho, dentre eles o teor de K, com adubação

orgânica associada à metade da adubação mineral em comparação à adubação mineral isolada.

### 3.3.2 Potássio na solução percolada

Os fertilizantes influenciaram a lixiviação do K, uma vez que nos dois solos as médias dos tratamentos que receberam adição das doses de K<sub>2</sub>O foram superiores às do tratamento controle. Entre as fontes, as quantidades totais de K na solução percolada foram maiores com o fertilizante mineral nos dois solos, provavelmente devido à alta solubilidade do KCl que facilitou a lixiviação, já que as quantidades de água e de nutriente adicionados foram semelhantes entre os tratamentos (TABELA 19).

**TABELA 19.** Quantidade total de K na solução percolada considerando a textura do solo e o tipo de fertilizante, mineral e organomineral. Valores entre parênteses representam o percentual de K lixiviado através das colunas de lixiviação em relação ao total de K aplicado (1500 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O ou 3,91 g de K por coluna).

Solo <sup>1</sup>	Controle	Formulação			Média
		Mineral 20-5-20	Organomineral 16-1-16	Organomineral 8-1-8	
K lixiviado (g coluna <sup>-1</sup> )					
LVd1	0,2 aA	1,8 aD (40)	1,3 aB (29)	1,5 aC (34)	1,2
LVd2	0,4 bA	1,8 aC (34)	1,4 bB (26)	1,4 aB (26)	1,3
Média	0,3	1,8	1,4	1,5	

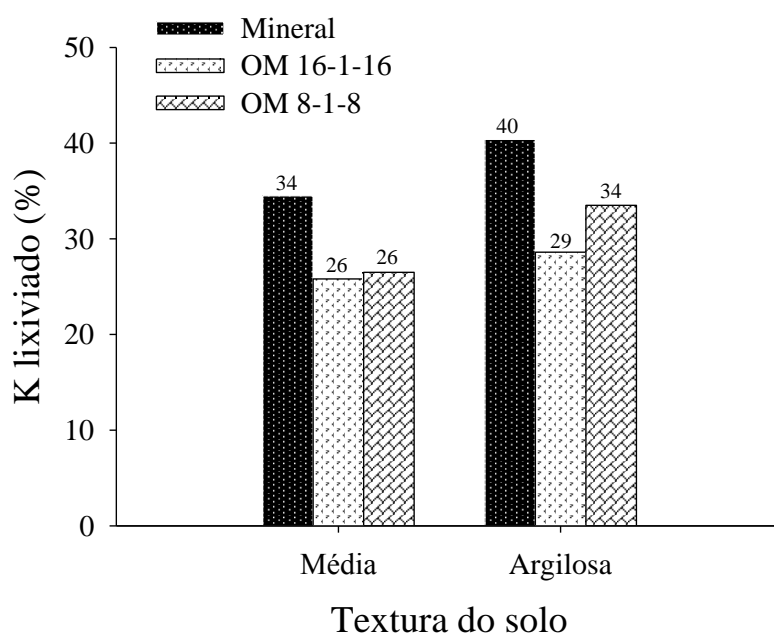
Médias seguidas por letras distintas, maiúsculas na linha e minúsculas na coluna, diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 0,05 de significância. <sup>1</sup> LVd1: Latossolo vermelho distrófico, textura argilosa; LVd2: Latossolo vermelho distrófico, textura média.

Estes resultados concordam com Bertol et al. (2011) que, avaliando a mobilidade de cátions em colunas de solo submetidas à adubação mineral ou orgânica, verificaram maior lixiviação de K, Ca e Mg com o uso do adubo mineral (KCl). Kinpara (2003) afirma que a aplicação de sais de potássio de alta solubilidade, como o KCl, facilita a lixiviação desse nutriente, especialmente, em solos arenosos e de baixa CTC.

A menor lixiviação do K com a aplicação dos fertilizantes organominerais deve-se possivelmente à ocorrência de sítios negativamente carregados no húmus constituinte dessas fontes, retendo o K numa forma trocável e tornando-o mais resistente à lixiviação. O aumento de cargas negativas conferido pela fração orgânica do fertilizante organomineral, possivelmente, fez com que a liberação do nutriente fosse gradual e a sua perda por lixiviação fosse diminuída. Conforme Brady et al., (2002) citado por

Noirtin (2010), a contribuição do húmus no poder de adsorção de cátions na superfície dos minerais dos solos varia entre 25 a 90%, retendo facilmente nutrientes como K, Mg, Ca e outros.

A percentagem de K lixiviado, em relação ao aplicado na superfície das colunas de lixiviação, foi maior no tratamento com adubação mineral do que com organomineral nos dois solos (TABELA 19, FIGURA 21). Os resultados mostram que 34% do nutriente fornecido pelo fertilizante mineral foi perdido por lixiviação no solo de textura média e 40%, no solo de textura argilosa. O K fornecido pelos fertilizantes organominerais lixiviou menos em ambos os solos, variando de 26 a 29% com o organomineral 16-1-16 e de 26 a 34% com o organomineral 8-1-8, entre o solo de textura média e argilosa, respectivamente. Esses resultados evidenciam que o K contido no fertilizante organomineral foi menos propenso à lixiviação do que o contido na fonte mineral.



**FIGURA 21.** Percentual de K lixiviado através das colunas de solo em relação ao total de K aplicado nos tratamentos que receberam adubação.

A percolação de K também variou com o solo. A quantidade desse elemento nas soluções percoladas dos tratamentos sem adubação (controle) e com o fertilizante organomineral 16-1-16 foi maior no solo de textura média (TABELA 19), o que indica a maior perda por lixiviação comum em solos mais arenosos. Donagemma et al. (2004) relatam que Latossolos de textura média apresentam risco maior de lixiviação de K do

que Latossolos argilosos oxidícos, em razão de terem menor proporção de cargas negativas para reter K.

Observa-se neste experimento que as quantidades totais de K na solução percolada foram muito próximas entre os solos em todos os tratamentos, possivelmente em razão das características químicas do solo argiloso que favoreceram a lixiviação desse nutriente. A análise química desse solo revelou que a maior porcentagem das cargas negativas estava ocupada por cátions potencialmente tóxicos (TABELA 16), favorecendo as perdas por lixiviação nesse solo. Alfaro, Jarvis e Gregory (2004), testando diferentes tipos de solo quanto às perdas por lixiviação, verificaram que o solo argiloso teve maiores perdas de K do que o solo arenoso, o que levou à maior lixiviação do nutriente.

Para comprovar o efeito de liberação gradual de K do fertilizante organomineral utilizado neste experimento, a empresa fabricante Geociclo Biotecnologia S/A realizou um experimento (dados não publicados), utilizando as fontes: KCl, formulação 0-0-60 e fertilizante organomineral, formulação 1-1-20. Os fertilizantes foram comparados entre si quanto à quantidade de nutriente solubilizada em solução de água destilada em função do tempo de contato com a solução.

Amostras sólidas dos fertilizantes, contendo a mesma quantidade de  $K_2O$  (11.000 mg amostra<sup>-1</sup>), foram envolvidas em malha de nylon e imergidas, separadamente, em frasco contendo 800 mL de água. Durante as três horas iniciais, a água dos frascos foi trocada em intervalos de 30 minutos, seguindo-se as trocas com nove e 24 horas após o início do experimento. A cada troca de água, avaliou-se a quantidade de  $K_2O$  solubilizada, expressando-se os resultados em porcentagem da quantidade inicialmente presente na amostra sólida (TABELA 20).

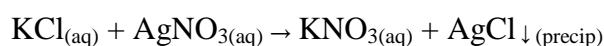
**TABELA 20.** Percentual de  $K_2O$  solubilizado, proveniente dos fertilizantes mineral e organomineral, em função do tempo de contato do nutriente com a solução aquosa.

Tempo	Fertilizante	
	Mineral	Organomineral
—h—	%	
0	0	0
0,50	46,92	28,71
1,00	69,18	37,82
1,50	92,01	42,36
3,00	98,02	46,15
9,00	98,12	47,31
24,00	98,12	48,57

Observa-se que a solubilização de  $K_2O$  proveniente do fertilizante organomineral ocorreu de forma mais gradual, enquanto a liberação do nutriente da fonte mineral, por sua vez, ocorreu mais rapidamente, apresentando quase o dobro de solubilização (47%) em relação ao fertilizante organomineral (29%), nos 30 minutos iniciais de avaliação.

O mesmo experimento foi realizado, utilizando-se uma solução de nitrato de prata ( $AgNO_3$ ) em substituição à solução aquosa para verificar, visualmente, o efeito de liberação gradual de K do fertilizante organomineral.

À medida que o KCl se dissolve e passa para a fase aquosa por processo de difusão, ele reage com  $AgNO_3$ , precipitando um sólido branco, cloreto de prata ( $AgCl$ ), de acordo com a reação:



Na Figura 22, é apresentada a formação de  $AgCl$  a partir da reação dos dois fertilizantes com a solução de  $AgNO_3$ .



**FIGURA 22.** Fertilizante organomineral (Geofert) e fertilizante mineral (KCl) em solução de nitrato de prata ( $AgNO_3$ ), evidenciando o efeito de liberação gradual de K, na forma de  $K_2O$ , em diferentes tempos após a adição dos fertilizantes: 30 s (a); 1 min (b); 2 min (c) e 4 min (d).

Verifica-se que a formação do precipitado branco revela a maior velocidade de liberação de KCl do fertilizante mineral para a solução, comparativamente ao fertilizante organomineral.



### 3.4 CONCLUSÕES

1. O teor de K trocável nas camadas superficiais dos solos foi maior com os tratamentos que receberam fertilizante organomineral.
2. Nas camadas mais profundas, o teor de K trocável não diferiu entre os fertilizantes, com exceção de duas camadas no solo argiloso, em que o teor desse elemento foi maior com o fertilizante mineral.
3. As perdas por lixiviação de K dependeram do tipo de fertilizante, com as maiores quantidades totais de K na solução percolada do tratamento que recebeu fertilizante mineral.

## REFERÊNCIAS

- ALFARO, M. A.; JARVIS, S. C.; GREGORY, P. J. Factors affecting potassium leaching in different soils. **Soil Use and Management**, Oxford, v.20, n.2, p.182-189, 2004.
- BERTOL, O. J.; et al. Mobilidade de íons em solo sob sistema de semeadura direta submetido às adubações mineral e orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.1311-1321, 2011.
- DONAGEMMA, G. K.; et al. Distribuição do amônio, nitrato, potássio e fósforo em colunas de latossolos fertirrigadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2493-2504, 2008.
- ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: Um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, Lavras, v.6, p.36-41, 2000.
- KINPARA, D. I. **A importância estratégica do potássio para o Brasil**. Planaltina – DF: Embrapa Cerrados. 2003, 27 p. (Documentos 100).
- MALAVOLTA, E. Potassium status of tropical and subtropical region soils. In: MUNSON, R. D. (Ed.). **Potassium in agriculture**. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1985. p.163-200.
- MARIA, I. C.; et al. Efeito da adição de diferentes fontes de cálcio no movimento de cátions em colunas de solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.50, n.1, p.87-98, 1993.
- MORETI, D.; et al. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo, adubações e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.167-175, 2007.
- NETO, J. A. L. **Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em diferentes tipos de solo**. 2008. 89 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- NOIRTIN, E. L. R. **Caracterização da matéria orgânica de solo irrigado com efluente de estação de tratamento de esgoto**. 2010. 132f. Tese (Doutorado em Geoquímica dos Processos Exógenos) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- QUAGGIO, J. A. Reação do solo e seu controle. In: SIMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, Piracicaba, 1., Piracicaba, 1986. **Anais...** Campinas, Fundação Cargill, 1986. p.53-59.

RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto Internacional da Potassa, 1981. 343 p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RAIJ, B. van.; et al. **Análise Química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas-SP: Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285 p.

SIGMAPLOT. 2008. **For windows, version 11.0**. Systat Software, 2008.