

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**LIBERAÇÃO, NUTRIÇÃO DE PLANTAS E LIXIVIAÇÃO DE POTÁSSIO DE
FERTILIZANTE REVESTIDO**

Henrique Bley

(Dissertação de Mestrado)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**LIBERAÇÃO, NUTRIÇÃO DE PLANTAS E LIXIVIAÇÃO DE POTÁSSIO DE
FERTILIZANTE REVESTIDO**

Henrique Bley
Engenheiro Agrônomo (UFSM)

Dissertação apresentada como
um dos requisitos à obtenção
do Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil

Agosto de 2015

CIP - Catalogação na Publicação

BLEY, HENRIQUE
LIBERAÇÃO, NUTRIÇÃO DE PLANTAS E LIXIVIAÇÃO DE
POTÁSSIO DE FERTILIZANTE REVESTIDO / HENRIQUE BLEY.
-- 2015.
68 f.

Orientador: CLESIO GIANELLO.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa
de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-
RS, 2015.

1. FERTILIZANTE REVESTIDO. 2. LIBERAÇÃO LENTA OU
CONTROLADA. I. GIANELLO, CLESIO, orient. II. Título.

HENRIQUE BLEY

“LIBERAÇÃO, NUTRIÇÃO DE PLANTAS E LIXIVIAÇÃO DE POTÁSSIO DE FERTILIZANTE REVESTIDO”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 31 de agosto de 2015
Homologada em 13 de novembro de 2015

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Carlos Alberto Bissani
UFRGS

Dr. Nelson Horowitz
YARA

Dra. Margarete Nicolodi

Orientador - Prof. Clesio Gianello
UFRGS

*Dedico esta importante etapa
do meu desenvolvimento
às minhas amadas:
Angela e Antonela.*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Clesio Gianello, pela confiança depositada em mim, orientação, suporte técnico e disponibilização de infraestrutura para a realização desta pesquisa, juntamente com a equipe do Laboratório de Solos: Lisandra Marchetti Colombo, Taís Ambrozi Sosa, Sidnei Luís Neves da Luz, Ricardo Ebone e Sinval Lipert Cardoso (um professor “Pardal”, pois transformou um clips em uma máquina seladora automática).

Aos professores Alberto Vasconcellos Inda Junior, Carlos Alberto Bissani, Enilson Luis Saccol de Sá, Ibanor Anghinoni, Michael Mazurana, Vilson Klein e Lisiane Selau, por despertar meu interesse pela temática das disciplinas por eles ministradas. Ao Sr. Jader, secretário do PPGCS, pela atenção e presteza.

Aos colegas do PPGCS, Felipe Selau Carlos, Lenio Santos e Jovana Bavaresco, pelas sugestões e o apoio em atividades práticas do experimento. Ao José Ferreira da Silva (Seu Zé), pelo auxílio nos tratos culturais na casa-de-vegetação do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia.

Aos colegas do MAPA, Mauro Marques Ruggiro, José Otávio Rocha Oliveira e Hideraldo José Coelho, por apoiar o meu afastamento em tempo parcial para realização desta capacitação.

Aos meus pais, Jeronimo Bley e Hildegard Heck Bley, pela educação dada com ênfase no estudo e seus exemplos de dedicação ao trabalho.

À minha esposa, Angela Helena Marin, pelo estímulo ao meu retorno aos estudos, companheirismo, cuidado e seu exemplo de comprometimento com o aprendizado contínuo.

À minha filha, Antonela, que nasceu no decorrer deste curso e trouxe uma motivação a mais para minha superação.

LIBERAÇÃO, NUTRIÇÃO DE PLANTAS E LIXIVIAÇÃO DE POTÁSSIO DE FERTILIZANTE REVESTIDO¹

Autor: Henrique Bley

Orientador: Clesio Gianello

RESUMO

O aumento do consumo de alimentos e a limitação de área para exploração agrícola requer maior eficiência dos insumos aplicados na nutrição vegetal. Os fertilizantes de liberação lenta ou controlada são uma alternativa para sincronizar a disponibilidade do nutriente com a demanda das plantas e reduzir as perdas para o ambiente. O objetivo do presente estudo foi avaliar a eficácia de um fertilizante potássico revestido com polímeros em comparação ao cloreto de potássio (KCl) convencional sob três aspectos: tempo necessário para liberação do nutriente, redução de perdas por lixiviação e nutrição de plantas. Os produtos foram incubados no solo em condições controladas de temperatura (25 °C) e umidade (0,2 g g⁻¹). O cultivo de plantas de milho em casa-de-vegetação foi realizado em vasos com solo de textura franco arenosa ou argilosa. O teor inicial de K nos solos era 13 mg dm⁻³ e 85 mg dm⁻³, respectivamente. As doses de K aplicadas nos tratamentos foram 0, 18, 36 e 54 mg dm⁻³. Os vasos foram irrigados com o equivalente a 210 mm de chuva ao longo de 34 dias. O líquido percolado dos vasos foi coletado para determinação do K lixiviado. As plantas foram cortadas após 30 dias da semeadura para quantificar a massa de matéria seca (MS) e o seu teor de K. No estudo de incubação a liberação de K do fertilizante revestido foi de 32 % e 42 % nos períodos de 72 e 154 dias de incubação, respectivamente. Os dados foram ajustados por uma função linear que estimou o prazo de 315 dias necessários para liberação de 75 % do nutriente. No estudo em casa de vegetação a tecnologia de revestimento foi eficaz em preservar o K da perda por lixiviação em solos de textura franco arenosa, no entanto, somente a dose de 54 mg dm⁻³ promoveu produção de MS equivalente ao KCl convencional. O uso de fertilizante potássico revestido pode não atender a necessidade de K na fase inicial de desenvolvimento da cultura do milho e, por isso, comprometer o rendimento final.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. (56p.) Agosto, 2015.

RELEASE, PLANT NUTRITION AND POTASSIUM LEACHING FROM COATED FERTILIZER¹

Author: Henrique Bley

Adviser: Clesio Gianello

ABSTRACT

The increase in food consumption and area limitation for farm requires improved efficiency of inputs applied to the plant nutrition. The slow or controlled release fertilizers are an alternative to synchronize the nutrient availability with demand of plants and reduce losses to the environment. The aim of this study was to evaluate the efficacy of a potassium fertilizer coated with polymers compared to conventional potassium chloride (KCl) in three aspects: time taken to release the nutrient, reducing losses by leaching and plant nutrition. The products were incubated in soil under controlled conditions of temperature (25 °C) and humidity (0.2 g g⁻¹). A greenhouse experiment was carried out with corn plants in pots under a loamy sand or clay texture soil type. The initial concentration of K in soil was 13 mg dm⁻³ and 85 mg dm⁻³, respectively. K rates used in the treatments were 0, 18, 36 and 54 mg dm⁻³. The pots were irrigated with the equivalent to 210 mm of rain over 34 days. The percolated liquid from pots was collected to determine the K lost by leaching. The plants were harvested 30 days after sowing to quantify dry matter (DM) mass and its K content. In the study of incubation K release of the coated fertilizer was 32% and 42% for periods of 72 and 154 days, respectively. The data were fit by a linear function that estimates the period of 315 days required to release 75% of the nutrient. In the greenhouse' study the coating technology was effective in preserving the K loss by leaching in sandy loam textured soils, however, only the dose of 54 mg dm⁻³ promoted DM production equivalent to conventional KCl. It is possible that the need for K in the early stages of corn development is not met by a coated potassium fertilizer and thus compromising the final yield.

¹M.Sc. Dissertation in Soil Science – Graduate Program in Soil Science, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (56 p.) August, 2015.

SUMÁRIO

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Mercado de fertilizantes.....	3
2.2. Normas internacionais e a legislação brasileira de fertilizantes.....	5
2.3. Fertilizantes de eficiência aprimorada	9
2.3.1. Fertilizante revestido de liberação controlada.....	10
2.3.2. O mecanismo de liberação.....	13
2.4. Estudos em ambiente controlado com fertilizantes revestidos	15
2.5. Estudos a campo com fertilizantes revestidos.....	18
2.6. O acúmulo de polímeros no solo.....	20
2.7. Cinética do potássio no sistema solo-planta.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1. Produtos utilizados nos experimentos e sua caracterização química.....	25
3.2. Estudo I – Incubação em laboratório	26
3.3. Estudo II – Cultivo em casa-de-vegetação	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1. Estudo I – Incubação em laboratório	35
4.2. Estudo II – Cultivo em casa-de-vegetação	38
4.2.1. Potássio percolado.....	38
4.2.2. Produção de matéria seca e potássio acumulado por plantas de milho	41
5. CONCLUSÃO.....	49
Considerações finais.....	49
REFERÊNCIAS	51
ANEXOS.....	56

RELAÇÃO DE TABELAS

Pág.

Tabela 1. Fertilizantes minerais simples produzidos no Brasil	5
Tabela 2. Aditivos autorizados para uso em fertilizantes minerais	8
Tabela 3. Atributos ⁽¹⁾ do solo utilizado no estudo I – incubação em laboratório	26
Tabela 4. Atributos ⁽¹⁾ dos solos utilizados no estudo II - cultivo de plantas em vasos em casa-de-vegetação	29
Tabela 5. Recomendação de adubação de potássio e quantidade aplicada no cultivo de milho em vasos em casa-de-vegetação.....	31
Tabela 6. Recomendação de adubação e quantidade de nutrientes aplicados no cultivo de milho em vasos em casa-de-vegetação.....	31
Tabela 7. Registros de informações da condução do experimento de cultivo de plantas em vasos em casa-de-vegetação, Agronomia/UFRGS, 2015	32
Tabela 8. Teor de K disponível no solo após incubação com dois fertilizantes nos respectivos períodos	35
Tabela 9. K percolado de solos que receberam fertilizante KCl convencional ou revestido	38
Tabela 10. K lixiviado do solo de textura franco-arenosa em relação ao total disponível no solo (trocável + adicionado via fertilizantes)	40
Tabela 11. K lixiviado do solo de textura argilosa em relação ao total disponível no solo (trocável + adicionado via fertilizantes)	40
Tabela 12. Matéria seca produzida por plantas de milho cultivadas em vaso em dois tipos de solo, com doses de fertilizante KCl convencional ou revestido....	42
Tabela 13. K total acumulado por plantas de milho cultivadas em vaso em dois tipos de solo, com K fornecido por fertilizante KCl convencional ou revestido..	44
Tabela 14. K recuperado por plantas de milho cultivadas em vaso em dois tipos de solo, com doses de fertilizante KCl convencional ou revestido.....	47

RELAÇÃO DE FIGURAS

Pág.

- Figura 1.** Participação da produção nacional no consumo de fertilizantes do Brasil em 2014 (ANDA, 2015).....4
- Figura 2.** Estrutura hierárquica da legislação de fertilizantes no Brasil.....7
- Figura 3.** Grânulo de ureia revestido com uma camada de enxofre elementar e revestimento com polímero orgânico: a) mapeamento por espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS); b) eletromicrografia de varredura. Fonte: Cancellier (2013).....12
- Figura 4.** Modelos de liberação de nutrientes de fertilizantes revestidos com polímeros por difusão: (a) Modelo empírico em três etapas ou instantâneo por ruptura; (b) modelo matemático. Fonte: Shaviv (2000) e Shaviv et al. (2003). .14
- Figura 5.** Proporção do N remanescente em um fertilizante revestido afetado por dois métodos de incubação no solo, com e sem sachê. Fonte: Golden et al. (2011).....17
- Figura 6.** Acúmulo de potássio na parte aérea de plantas de milho. Fase vegetativa = da emergência até a emissão do pendão; Fase reprodutiva = do florescimento até a maturação fisiológica. Fonte: Coelho (2005).22
- Figura 7.** Representação esquemática da dinâmica do potássio no sistema solo-plantas-ambiente. Fonte: Mielniczuk (2005).23
- Figura 8:** Preparo dos tratamentos do estudo I – incubação: (a) sachês de poliéster; (b) grânulos de fertilizantes e o sachê aberto; (c) fechamento do sachê com máquina seladora; (d) frasco com solo e o sachê com KCl revestido; (e) frasco com solo e o sachê com KCl convencional; (f) cobertura do sachê com solo; (g) umedecimento do solo; (h) frascos umedecidos; (i) bandejas com os frascos na incubadora.27
- Figura 9:** Coleta das amostras do estudo I - incubação: (a) Retirada da porção superficial do solo; (b) separação do sachê; (c) sachê retirado do solo com o KCl revestido remanescente; (d) sachê retirado do solo com o KCl convencional remanescente.27
- Figura 10:** Cultivo de plantas em casa-de-vegetação: (a) esquema do sistema de drenagem e coleta da água percolada dos vasos; (b) balança digital para monitoramento de massa de solo e água; (c) água destilada para irrigação; (d) mangueiras de drenagem; (e) garrafas pet para armazenar o líquido percolado.30
- Figura 11:** Condução do experimento em casa-de-vegetação. (a) 06/03/15 - incorporação dos fertilizantes; (b) 10/03/15 – semeadura; (c) 16/03/15 – 6 dias de desenvolvimento, desbaste; (d) 24/03/15 - 14 dias de desenvolvimento; (e) 30/03/15 - 20 dias de desenvolvimento e (f) 06/04/15 - estágio vegetativo V4. 33

Figura 12. Variação no teor de potássio trocável no solo com dois fertilizantes em diferentes períodos de incubação. Médias com barra do erro pa-drão e reta do ajuste da função linear. (*) significativo a 5 %.....37

Figura 13. K percolado dos solos (a) PVAd franco-arenoso e (b) NVd argiloso, que receberam fertilizante KCl convencional ou revestido. Curva ajustada por função quadrática. (*) significativo a 5 %.....39

Figura 14. Matéria seca produzida por plantas de milho cultivadas em vaso em dois tipos de solo, (a) PVAd franco-arenoso e (b) NVd argiloso, com doses de fertilizante KCl convencional ou revestido. Colunas de médias com barra do erro padrão e ajuste de função linear. (*) significativo a 5 %.....43

Figura 15. K total absorvido por plantas de milho cultivadas nos solos (a) PVAd franco-arenoso e (b) NVd argiloso, que receberam fertilizante KCl convencional ou revestido. Médias com barras do erro padrão; reta de ajuste por função linear. (*) significativo a 5%.....45

1. INTRODUÇÃO

A eficiência dos fertilizantes necessita de aprimoramento por questões técnicas e econômicas, mas também por aspectos sociais e ambientais. Essas bases estão interligadas, pois o crescimento populacional demanda mais alimentos e por consequência cultivos de alta produtividade ou ampliação da área explorada. A produção é dependente da disponibilidade dos nutrientes para as plantas. Considerando que a maior parte dos nutrientes aportados é extraída de reservas naturais finitas, para estabilizar ou diminuir o consumo de fertilizantes é necessário aumentar o seu aproveitamento, principalmente pela redução de perdas para o sistema solo, água e atmosfera. A primeira ação deve considerar a adoção de técnicas de manejo conservacionistas e, complementarmen- te, o uso de tecnologias mais eficientes aplicadas aos insumos.

O desafio da agricultura sustentável é a produção de alimentos de forma economicamente viável, mantendo o equilíbrio dos ecossistemas. Logo, os insumos devem ser usados de forma racional, objetivando a maior produtividade e o menor impacto ao ambiente. Diversas instituições no mundo têm se dedicado a estudar o uso eficiente de fertilizantes. Entre essas, o *International Plant Nutrition Institute* (IPNI), sucessor da Potafós no Brasil, promove o programa de Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes com o slogan “Manejo 4C”, que consiste em aplicar a fonte certa, na dose certa, na época certa e no lugar certo. A fonte certa considera a necessidade da cultura, as propriedades do solo e as interações entre os elementos. Em algumas situações, a utilização de fontes de liberação lenta ou controlada poderia disponibilizar os nutrientes de acordo com a necessidade das plantas, bem como preservar recursos hídricos superficiais e subterrâneos (Prochnow, 2007; Casarin, 2013).

A tecnologia de liberação lenta ou controlada aplicada aos fertilizantes baseia-se no uso de aditivos ou revestimento dos fertilizantes tradicionais a fim de retardar a sua dissolução no solo. Os produtos resultantes têm sido utilizados nas áreas de paisagismo, fruticultura, viveiros de produção de mudas e,

em menor escala, na produção de grãos, pois seu preço varia de três a sete vezes o valor de um fertilizante convencional. A indústria promove a ampliação do mercado para viabilizar essa tecnologia, valendo-se também, do enfoque preservacionista. Os desafios atuais, entre outros, são a compreensão dos mecanismos que controlam o padrão de liberação e a regulamentação dessa tecnologia para segurança do consumidor.

Considerando que a tecnologia de revestimento de um fertilizante mineral baseia-se na proteção física com uma cápsula sintética porosa que atrasa a sua liberação para a solução do solo, a hipótese do estudo é de que o nutriente apresente menor perda por lixiviação em comparação a um fertilizante mineral convencional; porém, a taxa de liberação não seja suficiente para atender a demanda nutricional de uma cultura na fase inicial de desenvolvimento. Portanto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficácia de um fertilizante potássico revestido sob três aspectos: liberação do nutriente ao longo do tempo, redução de perdas por lixiviação e nutrição de plantas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Mercado de fertilizantes

O consumo mundial de fertilizantes em 2014 foi cerca de 180 milhões de toneladas de nutrientes e o projetado para 2018 é de 200 milhões. As principais regiões e os países com maior consumo são: Ásia (China e Índia); América do Norte (EUA e Canadá), a América Latina (Brasil e Argentina) e a Europa Ocidental (Alemanha e França) (IFA, 2015).

A produção de nitrogênio (N) na forma de ureia, tradicionalmente proveniente das regiões petrolíferas do Golfo Pérsico (Qatar e Kuwait), foi superada pela China, Índia, Indonésia, EUA e Rússia, os maiores produtores mundiais, nessa ordem. Os maiores produtores de rocha fosfática, tradicionalmente originária do Marrocos e Israel, são atualmente os países da China e EUA, seguidos por Marrocos, Rússia e, em quinto lugar, o Brasil. As principais jazidas de potássio estão no Canadá, Rússia e Belarus, seguidas pela China e Alemanha (IFA, 2015).

O consumo de fertilizantes no Brasil, em 2014, foi de 32,2 milhões de toneladas, das quais 8,8 milhões foram produzidas no país e 24 milhões importadas. Para atender a demanda dos principais nutrientes consumidos (NPK) o volume importado é de 83 % para o N, 61 % para o P e 95 % para o K (ANDA, 2015; Figura 1).

Considerando apenas o segmento de fertilizantes revestidos, o consumo estimado na safra 2004/2005 foi inferior a 800.000 toneladas, valor que representaria cerca 0,5 % do mercado mundial de fertilizantes minerais nesse período (Trenkel, 2010). No Brasil os relatórios estatísticos não especificam essa linha de produtos.

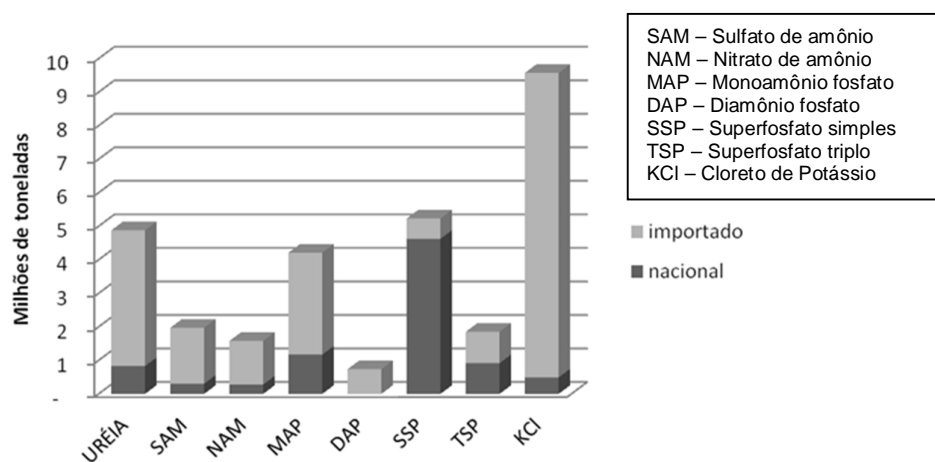


Figura 1. Participação da produção nacional no consumo de fertilizantes do Brasil em 2014 (ANDA, 2015).

As principais indústrias produtoras de fertilizantes nitrogenados em território nacional são a Petrobrás e a Vale Fertilizantes, localizadas em Laranjeiras/SE, Camaçari/BA, Araucária/PR, Cubatão/SP e Piaçaguera/SP. A extração de rocha fosfática pela empresa Vale ocorre em Araxá, Patos de Minas e Tapira/MG, Cajati/SP e Catalão/GO, onde opera também a empresa Anglo Fosfatos; a empresa Galvani possui operações em Lagamar/MG, Irecê/BA e Angico Dias/BA. A produção de fertilizantes potássicos atualmente se restringe à empresa Vale com duas plantas em Rosário do Catete/SE (ANDA/SINPRIFERT, 2015).

Os fertilizantes minerais simples produzidos pelas referidas indústrias, listados na Tabela 1, são denominados fertilizantes intermediários, pois a comercialização é, preferencialmente (61% do volume), feita por formulações denominadas misturas de grânulos, misturas granuladas ou misturas fareladas que contêm os nutrientes: nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) (Brasil, 2007a; ANDA/SINPRIFERT, 2015).

No processo industrial podem ser adicionados aditivos à mistura ou até a matérias primas simples, para diversos fins, como, por exemplo, redução do pó, aumento da dureza dos grânulos ou melhoria do desempenho do produto no campo. Esses aditivos estão previstos na lista dos aditivos autorizados do Anexo IV da IN N° 5/2007, especificada a seguir (Brasil, 2007a).

Tabela 1. Fertilizantes minerais simples produzidos no Brasil

Fertilizante	Garantia ⁽¹⁾	Característica	Obtenção
Ureia	45 % N	N totalmente na forma amídica.	Reação de amônia anidra e gás carbônico sob pressão.
Nitrato de Amônio (NAM)	32 % N	50% na forma amoniacal e 50% na forma nítrica.	Neutralização do ácido nítrico pela amônia anidra
Sulfato de Amônio (SAM)	20% N 22% S	N na forma amoniacal.	Neutralização do ácido sulfúrico pela amônia anidra ou reação do carbonato de amônio com o gesso.
Superfosfato Simples (SSP)	18% P ₂ O ₅ 16% Ca 8% S	P ₂ O ₅ solúvel em CNA + H ₂ O. Cálcio e Enxofre total.	Reação de concentrado apatítico moído (rocha fosfática) com ácido sulfúrico.
Superfosfato Triplo (TSP)	41% P ₂ O ₅ 10 % Ca	P ₂ O ₅ solúvel em CNA + H ₂ O e mínimo de 36% solúvel H ₂ O.	Reação de ácido fosfórico com concentrado apatítico moído.
Fosfato Monoamônico (MAP)	9% N 48% P ₂ O ₅	Nitrogênio na forma amoniacal. P ₂ O ₅ solúvel em CNA + H ₂ O.	Reação do ácido fosfórico com amônia anidra
Cloreto de Potássio (KCl)	58% K ₂ O	Potássio na forma de Cloreto determinado como K ₂ O solúvel em água.	Sais brutos de potássio separados por dissoluções seletivas ou flotação.

⁽¹⁾ Teores mínimos. Adaptado de Brasil (2007a).

2.2. Normas internacionais e a legislação brasileira de fertilizantes

Nos Estados Unidos, os estados regulam suas próprias políticas agrícolas, incluindo fertilizantes. Existem diretrizes da Agência Federal de Proteção Ambiental (EPA) sobre limites de metais pesados, mas o registro de produtos se restringe aos agrotóxicos. Em razão disso, as definições de fertilizantes de eficiência aprimorada (*enhanced efficiency fertilizers* – EEF), fertilizante de liberação lenta (*slow release fertilizer* – SRF) e fertilizante de liberação controlada (*controlled release fertilizer* – CRF) foram elaboradas pela Associação Americana de Controles Oficiais para Plantas e Alimentos – AAPFCO. Na União Européia (EU), existe a lista de “tipos de fertilizantes da EU” que podem ser utilizados, no entanto, até 2010, não havia regulamentação do Comitê Europeu de Normatização (CEN) para fertilizantes de liberação lenta ou controlada (Trenkel, 2010).

A necessidade de regulação desses produtos frente ao crescimento de mercado dos últimos anos levou tanto os EUA quanto a CEN a organizar grupos de força-tarefa para definir métodos de análise em laboratório, cujos resultados sejam correlacionados com dados de campo. Nos EUA a força-tarefa foi composta pela AAPFCO, *The Fertilizer Institute* (TFI), Ministério da Agricultura (USDA) e os fabricantes. Na Europa, o CEN tem o desafio de apresentar propostas às autoridades legisladoras oficiais para classificar e definir as condições em que um produto já previsto pode ser categorizado como fertilizante de liberação lenta ou controlada. O critério do CEN para estabelecer um fertilizante como “*slow release*” (na temperatura de 25 °C) é: (i) não mais de 15 % liberado em 24 horas; (ii) não mais do que 75 % liberado em 28 dias; e (iii) pelo menos 75 % de liberação no prazo fixado pelo fabricante (Trenkel, 2010).

No Brasil, a produção e o comércio de fertilizantes são regulamentados por legislação federal e compete ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) editar normas complementares necessárias ao cumprimento desse regulamento. A Lei Nº 6.894, de 1980, é conhecida como a “Lei de Fertilizantes” e dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura (Brasil, 1980). O Decreto Nº 4.954, de 2004, aprova o regulamento dessa lei e estabelece as normas gerais sobre o registro, classificação e fiscalização da produção e do comércio desses produtos. Os estabelecimentos produtores, comerciais ou importadores de fertilizantes são obrigados a se registrar no MAPA, assim como é obrigatório o registro dos produtos. Os critérios para registro, os limites de garantias e as especificações são estabelecidos por Instruções Normativas (IN) específicas para cada tipo de produto (Brasil, 2004). Um esquema da hierarquia da legislação brasileira pode ser observado na Figura 2.

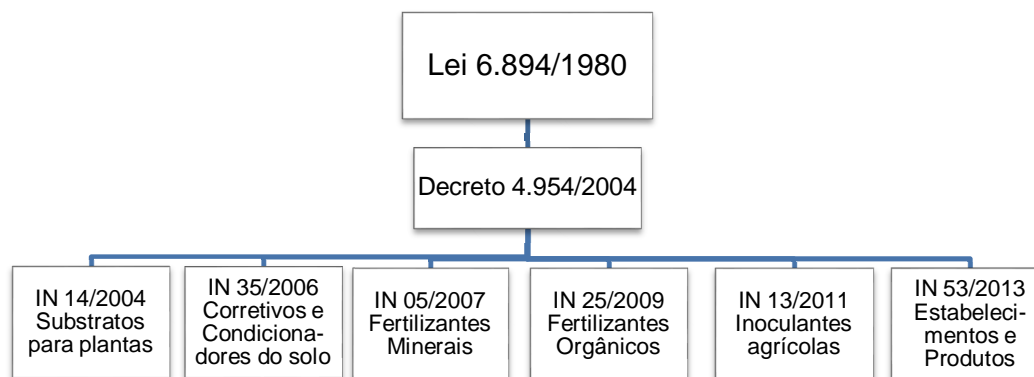


Figura 2. Estrutura hierárquica da legislação de fertilizantes no Brasil.

A IN Nº 53 dispõe sobre as definições, a classificação, o registro de estabelecimento e de produtos (fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas). Além do comércio, a importação desses insumos para fins de pesquisa, análise laboratorial ou para uso próprio pelo consumidor final deverá contar com autorização prévia do MAPA (Brasil, 2013). A IN Nº 5 aprova as definições e normas sobre as especificações, garantias e tolerâncias para o registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes minerais (Brasil 2007a).

As especificações dos fertilizantes minerais simples, aditivos, agentes quelantes ou complexantes, cargas e minérios autorizados para a fabricação de fertilizantes estão listadas nos Anexos da IN Nº5, disponíveis na página eletrônica do MAPA em versões atualizadas. Um material que não esteja contemplado pode ser incluído a pedido do interessado com elementos informativos e documentais que justifiquem o seu uso (Brasil, 2007a).

O produto que não conte com antecedentes de uso no país, em aspectos técnicos, é considerado “produto novo”. Nesse caso, o seu registro exige relatório técnico-científico conclusivo, emitido por órgão brasileiro de pesquisa oficial ou credenciado, que ateste a viabilidade e eficiência de seu uso agrícola (Brasil, 2004).

Com base na legislação atual não há previsão legal para o uso do termo “fertilizante de liberação lenta ou controlada”. No entanto, pode-se interpretar que essa tecnologia não é considerada um “produto novo”, apenas se utiliza de

um aditivo para lhe conferir característica diferenciada. Caso esse aditivo não conste na lista dos aditivos autorizados (Anexo IV da IN N° 5/2007), sua inclusão deve ser solicitada pela empresa produtora ou importadora. Os aditivos autorizados para uso em fertilizantes minerais no Brasil que referem função que pode aumentar a eficiência dos fertilizantes estão listados na Tabela 2.

Tabela 2. Aditivos autorizados para uso em fertilizantes minerais

Aditivo	Uso aprovado	Função
Aminas e Poliaminas	Fertilizantes em geral	Recobrimento, estabilidade química
Ceras	Fertilizantes sólidos	Recobrimento
DCD (dicianodiamida)	Ureia / Nitrato de Amônio	Inibidor de nitrificação
DMPP (3,4 dimetilpirazol fosfato)	Fertilizantes minerais	Inibidor de nitrificação
Formaldeído	Ureia	Resistência mecânica, antiempedante
NBPT (n-butil tiofosfórico triamida)	Ureia / Nitrato de Amônio	Inibidor da enzima urease
Polímeros Vegetais	Fertilizantes em Geral	Estabilizante
Poliuretano	Ureia	Redutor da taxa de liberação do nitrogênio

Adaptado de Brasil (2007a). Atualizado em 2013.

Em consequência de não haver acordo internacional de normatização específica sobre a produção e o comércio dos EEFs, eles são fiscalizados, no Brasil, somente quanto ao aspecto de garantias químicas e físicas e não existe uma metodologia oficial para aferir o prazo e percentual de liberação declarado. Necessita-se de padronização dos testes para a caracterização do desempenho de liberação e para o controle de qualidade industrial. Estudos têm sido feitos para prever a liberação dos nutrientes com métodos de incubação em ambiente controlado, dessa forma, pode-se avaliar em diferentes condições ambientais, como, por exemplo, temperatura, umidade, micro-organismos, acidez e textura do solo (Golden et al., 2011; Medina et al., 2014).

2.3. Fertilizantes de eficiência aprimorada

Os produtos que aumentam a eficiência de utilização dos nutrientes e minimizam o potencial de perdas para o ambiente são categorizados no mercado internacional como fertilizante de eficiência aprimorada (*enhanced efficiency fertilizers* – EEF). Isso é obtido por mecanismos que retardam a liberação ou prolongam a disponibilidade dos nutrientes de plantas no solo ou meio de crescimento. Nos Estados Unidos (EUA) apenas formas de nutrientes com propriedades EEF aprovadas podem usar esse termo na embalagem ou em propaganda (AAPFCO, 2015).

O primeiro grupo de EEF é ocupado por fertilizantes nitrogenados “estabilizados”. O agente estabilizador do nitrogênio pode ser uma substância que inibe a oxidação biológica do N-amoniacal para nitrato, denominado inibidor de nitrificação, ou uma substância que inibe a hidrólise da ureia pela enzima urease, denominado inibidor de urease (Trenkel, 2010). Importante acrescentar que essa estabilização é temporária. Os fabricantes sugerem que a ureia estabilizada pode ser armazenada por até 6 semanas sem degradação significativa do inibidor, porém estudos de campo já demonstraram que esta estabilidade decresce rapidamente após 5 dias da aplicação (Cantarella, 2007).

O segundo grupo de EEF compreende os fertilizantes de liberação lenta ou controlada comumente referidos na literatura pelas siglas SRF (*slow release fertilizer* – fertilizante de liberação lenta) e CRF (*controlled release fertilizer* – fertilizante de liberação controlada). Ambos são definidos como fertilizante com capacidade de retardar a liberação do nutriente para a solução do solo, e consequentemente, sua disponibilidade para absorção e uso pela planta após a aplicação, ou com capacidade de estender o período de disponibilidade à planta por tempo maior daquele de referência, cuja liberação do nutriente à solução é rápida (como exemplos, nitrato de amônio, ureia, fosfato de amônio ou cloreto de potássio). Esse maior período pode ocorrer devido a vários mecanismos, entre eles, pelo revestimento com material semipermeável, como por exemplo, substâncias orgânicas, inorgânicas ou resinas sintéticas de baixa solubilidade em água (Trenkel, 2010).

A denominação fertilizante de liberação lenta é atribuída quando o nutriente é liberado a uma taxa menor do que a habitual, mas o padrão e a duração dessa não são determinados pelo fabricante. É comum designar produtos nitrogenados degradáveis por microrganismos, entre eles ureia-formaldeído, como sendo de liberação lenta. O termo fertilizante de liberação controlada tornou-se aceitável quando utilizado para fertilizantes em que os fatores que determinam a taxa padrão e o período de liberação são previsíveis e influenciados pelo processo de fabricação (Shaviv, 2005; Trenkel 2010).

Shaviv (2005) propôs que os fertilizantes de liberação controlada sejam aqueles em que uma barreira física controla a liberação. O fertilizante pode estar na forma de pastilhas ou grânulos revestidos por polímeros hidrofóbicos ou dispersos em matrizes que restringem a dissolução do fertilizante. A utilização de matrizes, nas quais o fertilizante solúvel está disperso, é menos comum do que a utilização de fertilizantes revestidos. Os materiais utilizados para a preparação de matrizes podem também ser subdivididos em: (i) hidrofóbicos, tais como poliolefinas e borrachas; e (ii) hidrofílicos, tais como alginato e caulín, chamados hidrogéis, que reduzem a dissolução do fertilizante solúvel devido a sua alta retenção de água (Shaviv, 2005). As matrizes à base de materiais superabsorventes como caulín, bentonita, montmorilonita e atapulgita estão em pleno desenvolvimento na China, pois, além da liberação controlada, o produto tem função de retenção de água (Liang et al., 2007; Wu & Liu, 2007).

2.3.1. Fertilizante revestido de liberação controlada

O foco deste estudo são os fertilizantes de liberação controlada revestidos com polímeros, identificados na literatura como PC-CRF (*polymer coated – controlled release fertilizers*). A tecnologia usada na fabricação, o material de revestimento e sua espessura determinam a liberação gradual do nutriente revestido ou encapsulado. Para tanto, é necessário conhecer sua composição para entender as características que determinam o mecanismo de ação de cada tipo de revestimento.

Com base nas publicações de Shaviv (2005), Trenkel (2010) e Majeed et al. (2015), os fertilizantes revestidos com polímeros podem ser assim divididos:

a) revestimento com polímeros inorgânicos

O principal produto dessa categoria é a ureia revestida com enxofre (*sulfur coated urea* - SCU), desenvolvida nos laboratórios do *Tennessee Valley Authority* (TVA) em 1961. A sua preparação é baseada no revestimento de grânulos de ureia pré-aquecidos com enxofre (S) fundido. O enxofre elementar é utilizado por seu baixo custo, por ser um nutriente essencial de planta e por permitir a pulverização do S fundido (156 °C) sobre ureia granular. Um selante de cera ou parafina é pulverizado para vedar fissuras e reduzir a degradação microbiana do revestimento de S. A terceira camada é formada por um condicionador mineral, como por exemplo, a atapulgita, para reduzir o pó, auxiliar o manuseio e armazenamento. O produto final pode conter de 30 a 40 % de N, 6 a 30 % de S e 4 a 6 % de aditivos (Shaviv, 2005; Trenkel, 2010).

A liberação de N a partir de SCU depende da qualidade do revestimento. Um lote típico de grânulos desse produto é composto por três tipos de revestimentos: revestimentos danificados com rachaduras, revestimentos danificados cujas fissuras foram seladas com cera e revestimentos perfeitos. O revestimento danificado libera imediatamente o nutriente quando em contato com água. O revestimento perfeito pode consistir numa barreira que bloqueia a liberação. Uma população de grânulos de SCU pode consistir em mais de um terço dos grânulos danificados e cerca de um terço dos grânulos revestidos "perfeitamente" (Shaviv, 2000). Portanto, um terço ou mais do conteúdo SCU podem ser liberados imediatamente após ser posto em contacto com a água e cerca de um terço pode ser liberado muito depois de a planta completar seu ciclo.

b) revestimento com polímeros orgânicos

Os polímeros orgânicos são divididos em resinas e polímeros termoplásticos. O revestimento com resina é normalmente preparado por polimerização *in situ*, resultando na formação de um polímero reticulado, hidrofóbico, geralmente classificado como termoendurecido (degrada após aquecimento). As duas principais famílias de resinas utilizadas como revestimento são as resinas do tipo alquídica e poliuretano. A resina alquídica é um copolímero de dicitlopentadieno com um éster de glicerol. O revestimento de poliuretano é obtido por reação de poli-isocianatos, tais como di-isocianato com polióis. A maior parte dos polímeros orgânicos utilizados para o revestimento de fertilizantes gra-

nulados adere bem ao núcleo inorgânico, formando assim um fertilizante resistente ao atrito (desde que a espessura do revestimento seja suficiente) (Shaviv, 2005; Trenkel, 2010).

Os revestimentos termoplásticos utilizam principalmente o grupo químico polietileno dissolvido em um hidrocarboneto clorado e pulverizado sobre os grânulos de fertilizante em um reator de leito fluidizado. A variação na taxa de liberação do nutriente é determinada pela mistura de polietileno de baixa permeabilidade com um polímero de elevada permeabilidade, tal como etileno acetato de vinila (EVA). Essa tecnologia permite o revestimento de uma grande variedade de produtos granulados ou perolados. O padrão de liberação de nutrientes é alcançado através da variação da composição do polímero e da espessura do revestimento. As formulações típicas contêm ureia ou compostos NPK (em várias proporções) com ou sem microelementos (Shaviv, 2005; Trenkel, 2010).

c) revestimento com polímeros inorgânicos e orgânicos

Devido à baixa eficiência da SCU comum, mencionado no item (a), vários fabricantes de CRF introduziram uma camada adicional de polímero orgânico termoplástico ou resina, formando o PSCU (*polymer-coated sulfur-coated urea* – ureia revestida com enxofre e polímeros) (Figura 3). A camada de polímero adicional também se destina a melhorar a resistência ao atrito dos grânulos revestidos (Shaviv, 2005; Trenkel, 2010).

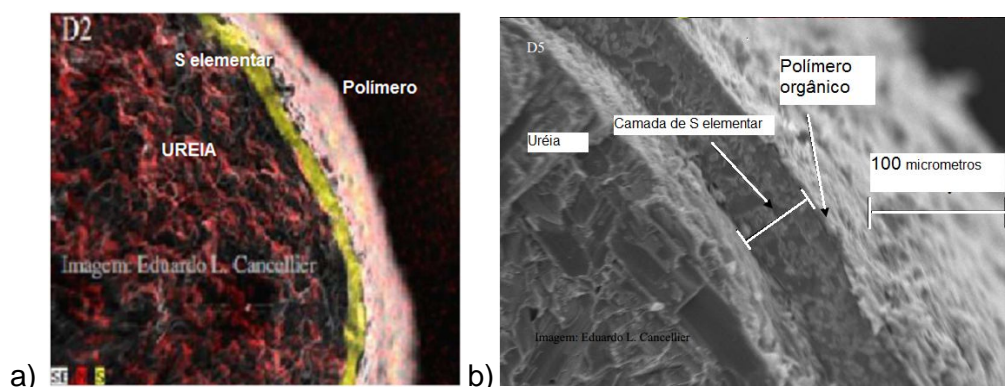


Figura 3. Grânulo de ureia revestido com uma camada de enxofre elementar e revestimento com polímero orgânico: a) mapeamento por espectroscopia por energia dispersiva de raios X (EDS); b) eletromicrografia de varredura. Fonte: Cancellier (2013).

d) revestimento com polímeros biodegradáveis

Os estudos mais recentes com PC-CRF (*polymer-coated controlled-release fertilizers* – fertilizantes de liberação controlada revestidos com polímeros) se dedicam ao desenvolvimento de polímeros de recursos naturais renováveis para a fabricação de revestimentos biodegradáveis. Os materiais utilizados como, por exemplo, lignina, amido, quitina, celulose e polissacarídeos possuem propriedades (hidrofilia, baixa resistência física e incompatibilidade com outros polímeros) que limitam seu uso na condição natural. Logo, o desafio da pesquisa tem sido modificar a estrutura, mesclar esses materiais ou até misturá-los com polímeros sintéticos para chegar a um produto resistente, biodegradável e que possa ser produzido em escala comercial (Majeed et al., 2015). Uma boa alternativa é a quitosana, um polissacarídeo natural produzido pela desacetilação da quitina que é o elemento estrutural de crustáceos marinhos. A quitosana sofre biodegradação facilmente no ambiente natural e é biocompatível com outros polímeros (Lubkowski & Grznil, 2007).

2.3.2. O mecanismo de liberação

Os modelos preditivos de liberação de nutrientes dos grânulos de fertilizantes recobertos com polímeros, citados na literatura, são baseados na liberação por difusão. A referência é o estudo de Raban (1994) (apud Shaviv, 2000), que descreveu o processo como uma curva sigmoideal de três fases (Figura 4a). A primeira é a fase de latência (*lag*) em que há pouca ou nenhuma liberação de nutrientes. Durante esta fase o vapor de água se difunde no grânulo e hidrata os sais de fertilizantes. A pressão hidrostática é gerada dentro do revestimento em resposta a absorção de água e aumento de massa. A segunda fase é um período de liberação linear (*linear release*) no qual o gradiente de condução para a liberação por difusão de nutrientes permanece constante; isto ocorre devido à presença de sais de fertilizante não dissolvidos que mantêm condições de saturação de nutrientes na solução dentro das cápsulas relativamente às concentrações de íons na solução em torno do grânulo. Esses autores indicaram que o movimento de nutrientes através do revestimento pode também ocorrer por fluxo de massa devido ao gradiente de pressão. Se a pressão interna exceder a resistência, o revestimento se rompe e todo o teor do grânulo é liberado instantaneamente, situação de falha (*failure*). A terceira fase

é o declínio (*decay*) da taxa de liberação de nutrientes, devido à redução do gradiente de condução, à medida que a concentração do fertilizante em solução diminui no interior da cápsula (Figura 4a).

Esse conceito empírico para um grânulo individual serviu de base para Shaviv et al. (2003) elaborarem modelos matemáticos de liberação para uma população de grânulos, considerando a permeabilidade da água e do soluto, diâmetro do grânulo e a espessura do revestimento (Figura 4b). O padrão linear ou sigmoidal pode sincronizar com a demanda de absorção de nutrientes pelas plantas (Shiaviv, 2000).

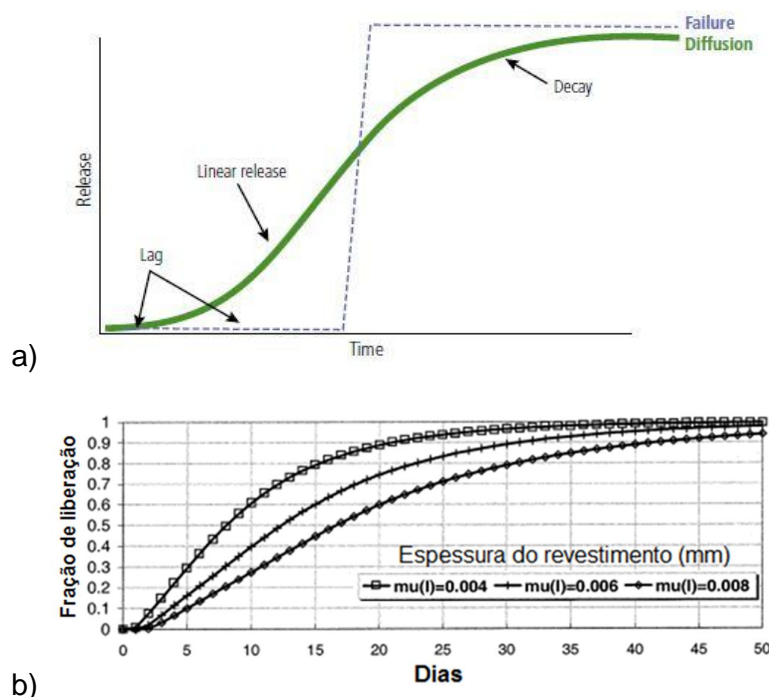


Figura 4. Modelos de liberação de nutrientes de fertilizantes revestidos com polímeros por difusão: (a) Modelo empírico em três etapas ou instantâneo por ruptura; (b) modelo matemático. Fonte: Shaviv (2000) e Shaviv et al. (2003).

O ideal seria que os CRFs tivessem taxas de liberação que atendessem à demanda das plantas mesmo em condições ambientais variáveis, porém os produtos revestidos com polímeros disponíveis no mercado são afetados pela temperatura (Adams et al., 2013). Esses autores consideraram o modelo de difusão e o princípio físico do potencial de água para testar três fertilizantes minerais complexos (NPK e micronutrientes), com diferentes tecnologias de revestimento, nas temperaturas de 5, 15, 20, 30 e 40 °C. A avaliação foi feita

em água e em areia úmida e não houve diferença significativa nas taxas de liberação entre esses dois substratos. No entanto houve diferenças consistentes entre os produtos para liberação em água. No período de 105 dias, o revestimento com resina termoendurecida se mostrou menos dependente da temperatura, pois liberou 40 % da massa total de nutrientes a 5 °C, chegando a 80 % a 40 °C. A rápida liberação inicial foi seguida por uma taxa constante decrescente ao longo do tempo. O revestimento de resina termoplástica foi mais eficaz em liberar os nutrientes gradativamente (20 a 40 %) na faixa de temperatura de 20 a 30 °C. No entanto, acelerou a liberação (40 a 60 %) na faixa de temperatura de 30 a 40 °C (Adams et al., 2013).

Em termos práticos, o alto percentual de liberação inicial em baixas temperaturas pode levar a uma sobrecarga precoce de nutrientes na zona da raiz e potencialmente causar deficiências posteriores caso ocorra lixiviação dos nutrientes. A não liberação de nutrientes do fertilizante com revestimento termoplástico a baixas temperaturas significa que o produto pode hibernar em ambientes frios, desde que o congelamento não resulte em fratura do revestimento de polímero (Adams et al., 2013).

2.4. Estudos em ambiente controlado com fertilizantes revestidos

Não há um método oficial para análise laboratorial de fertilizantes revestidos com polímeros. Uma norma ISO/DIS 18644 para análise de fertilizantes de liberação controlada está em desenvolvimento (IFA, 2014; ISO/TC 134, 2015). Os métodos comumente utilizados informam a evolução da liberação ao longo do tempo, no entanto, são técnicas de medição em tempo real, como por exemplo, de 30 a 180 dias, logo demandam longo prazo para execução. A liberação do nutriente desse tipo de produto pode ser acelerada com o aumento da temperatura. A vantagem de métodos “acelerados”, com duração de até 7 dias, é que podem ser extrapolados para condições de campo com base em experimentos e/ou modelagem, uma vez que os produtos revestidos com polímero são apenas sensíveis à temperatura e à disponibilidade de água (IFA, 2014). Por outro lado, a liberação dos nutrientes a partir de revestimentos biodegradáveis se diferencia dos revestimentos sintéticos, pois é mais influenciado pela

atividade dos microrganismos, temperatura, pH e tipo de solo (Majeed et al., 2015).

Golden et al. (2009) descreveram a técnica chamada de *Buried-bag* (sachê-enterrado) para avaliar a liberação de fertilizantes incubados em solo sem plantas. O sachê consiste em uma tela de poliéster livre de N, com poros de 50 μm ($\pm 15 \mu\text{m}$) e tamanho de 5 x 5 cm. Nesse procedimento, o fertilizante testado é peneirado para uniformizar o tamanho e o peso dos grânulos. Seis grânulos são colocados em cada sachê que é fechado com uma máquina seladora. Duzentos gramas de solos seco ao ar são acondicionados em frasco plástico de 500 mL. O sachê contendo o fertilizante é depositado no topo e outros 200 g de solo sobre o sachê. Adicionam-se 100 mL de água deionizada para umidade gravimétrica de 250 g kg^{-1} e os frascos colocados em incubadora a 25 °C. A cada cinco dias retiram-se as unidades experimentais de cada tratamento e nos demais a água é repostada para manter a umidade inicial.

Para verificar a validade do método do “sachê-enterrado” Golden et al. (2011) avaliaram a liberação de um fertilizante nitrogenado revestido com polímeros incubado no solo com o sachê em comparação com o fertilizante enterrado sem o sachê. O período de incubação foi de 40 dias. Os sachês foram desenterrados, abertos e os grânulos contados para assegurar a recuperação completa. O N remanescente nos grânulos recuperados foi determinado por combustão e a percentagem de recuperação de nitrogênio foi expressa como a proporção do N adicionado (Figura 5). O N foi liberado de forma linear ao longo do tempo para o produto enterrado com o sachê e quadrática para o método sem o sachê. As proporções de N restante não diferiram nos primeiros cinco dias de incubação, no entanto a diferença no período intermediário indicou que a liberação de N prosseguiu mais rapidamente no método sem o sachê. Aos 40 dias, a proporção de N restante não diferiu estatisticamente para as diferentes técnicas de avaliação, permanecendo 17 % nos grânulos com sachê e 13 % sem sachê. A conclusão do estudo foi de que o método do “sachê enterrado” é útil para avaliar a liberação de nutrientes do fertilizante nitrogenado revestido, e tem utilidade para ambos os experimentos, de laboratório e campo, bem como sugerem que pode ser aplicado para outros nutrientes revestidos (Golden et al. 2009). A colocação de fertilizante revestido com polímero em sachês minimiza

o tempo e dificuldade para recuperar grânulos de fertilizantes no solo e reduz a possibilidade estourar o revestimento, que pode ocorrer quando o solo é examinado minuciosamente para recuperar os grânulos de fertilizantes. Embora tenham sido observadas diferenças ao longo da curva de liberação de N, o número de dias aproximado para a liberação do N total foi muito previsível com o método do sachê enterrado (Golden et al., 2011).

Mota (2013) utilizou metodologia semelhante para avaliar a longevidade de um fertilizante nitrogenado recoberto com poliuretano. Amostras do produto em sachê foram enterradas no solo e mantidas em ambiente controlado com temperatura de 25 °C ou em casa-de-vegetação com temperatura variável. Verificaram a liberação de 93 % do produto após 97 dias de incubação em ambas as condições.

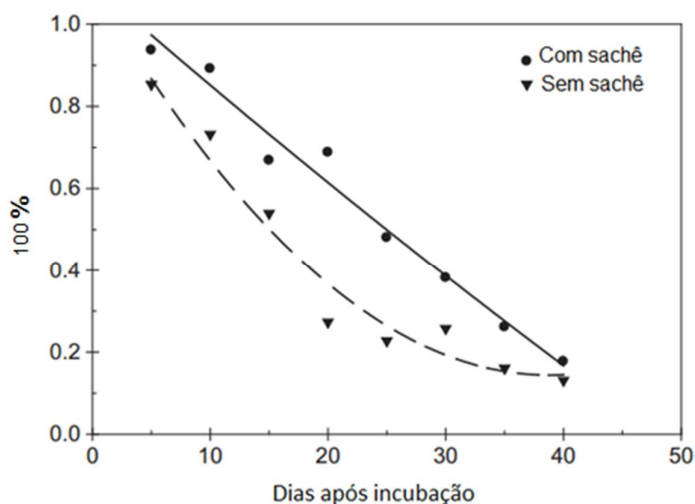


Figura 5. Proporção do N remanescente em um fertilizante revestido afetado por dois métodos de incubação no solo, com e sem sachê. Fonte: Golden et al. (2011).

Medina et al. (2014) estudaram a liberação de N de dois fertilizantes NPK, revestidos com resina ou poliolefinas, incubados no solo em três temperaturas. Observaram que o incremento de temperatura acelerou a taxa de difusão desses fertilizantes. O produto recoberto com resina liberou 80 % de N nos períodos de 80, 40 e 25 dias, respectivamente para as temperaturas de 21, 25 e 35 °C. O produto revestido com poliolefinas apresentou maior resistência à liberação e foram necessários cerca de 130 dias para liberar 80 % do N à temperatura de 35 °C e 180 dias a 25 °C.

O revestimento de grânulos de fertilizante mineral complexo NPK com poliuretano foi testado por Du et al. (2006). O período de latência para o nitrato, amônio e potássio foi de 2 a 10 dias, enquanto que para o P foi de 14 a 40 dias, variações essas ocorridas em função da temperatura de 40 °C e 20 °C respectivamente. Ao final de 70 dias (à temperatura de 30 °C), em torno de 80 a 85 % do N, 65 a 80 % do K e 10 a 40 % do P foram liberados. Essas variações ocorreram devido aos diferentes substratos utilizados. A maior liberação ocorreu em água, seguida de colunas de areia saturadas e incubação em areia na capacidade de campo. O principal fator que retardou a liberação de P foi a menor solubilidade dos íons fosfato. O aumento da temperatura de 20 °C para 40 °C elevou a taxa de liberação dos nutrientes de modo linear, enquanto que os valores médios obtidos para as diferentes espessuras de revestimento, não diferiu significativamente.

2.5. Estudos a campo com fertilizantes revestidos

A revisão das publicações nacionais e internacionais sobre fertilizantes de liberação controlada indica a predominância dos estudos com fertilizantes nitrogenados e grande parte desses feita em ambiente controlado. Estudos com nutrientes P e K e a aplicação a campo são raros.

Oosterhuis & Howard (2008) testaram um produto de liberação lenta, revestido com resina de poliolefina, para o fornecimento de N e K na cultura do algodão nos EUA. Foram avaliados em duas safras e em dois sistemas de manejo: (i) plantio direto (Tennessee) e (ii) convencional com irrigação (Arkansas). Os tratamentos de referência foram o KCl e o nitrato de amônio aplicados a lanço na dose recomendada e com 60 % da dose na linha. O fertilizante revestido foi aplicado na linha de semeadura nas doses de 100 %, 80 %, 60 % ou 40 % da recomendação. Os resultados indicaram que o uso da fonte de N revestida não reduziu a produtividade em ambos os sistemas. A redução para 60 % da dose recomendada de N não causou queda significativa no rendimento de fibra. Os resultados foram semelhantes para os tratamentos com o K revestido no sistema de manejo irrigado, porém contraditórios no sistema de plantio direto. As médias foram comparadas entre si e o estudo não apresentou curvas de resposta para cada produto. A conclusão dos pesquisadores foi de que a utili-

zação da tecnologia para o K não foi tão efetiva quanto para o N em promover respostas na produção de fibra do algodoeiro. Os contrastes observados entre os anos agrícolas e a impossibilidade de explicar as diferenças entre as doses sugerem a necessidade de continuidade das pesquisas. Outro estudo (Blaylock, 2007) com fertilizantes nitrogenados revestidos na cultura do milho nos EUA mostrou que a redução nas perdas proporcionou maior eficiência de utilização de N. A produtividade foi mantida com a redução da dose de N para 70 % a 80 % da comumente aplicada. Ambos os autores sugerem a avaliação prévia da viabilidade econômica para adoção dessa tecnologia.

No Brasil, os projetos de pesquisa de eficiência de uso de fertilizantes que incluem a tecnologia de liberação lenta ou controlada foram intensificados nos últimos cinco anos. Os principais grupos de pesquisa com publicações nessa área são da ESALQ/USP, do Instituto Agronômico de Campinas (IAC) e da Universidade Federal de Lavras/MG. O objetivo comum desses trabalhos é avaliar a perda por volatilização de N a partir de ureia recoberta com inibidores ou revestida com polímeros.

Zavaschi et al. (2014), em estudo na cultura do milho, concluíram que a ureia revestida com polímeros de dupla camada não reduziu as perdas de amônia por volatilização. A aplicação de ureia convencional não diferiu da revestida para as variáveis: rendimento de grãos, teores de N nas folhas e nos grãos e teor de clorofila. Por outro lado, Nascimento et al. (2013) avaliaram ureia com revestimentos inorgânicos (enxofre elementar ou ácido bórico e sulfato de cobre) na cultura da cana-de-açúcar. Nesse estudo, ambos os revestimentos resultaram na redução de perdas de N por volatilização em relação à ureia convencional. Faria et al. (2014) também utilizaram ureia com revestimentos inorgânicos (S, B e Cu) com o objetivo de avaliar a higroscopicidade dos produtos em comparação ao nitrato de amônio (NA). O revestimento torna a ureia mais susceptível à absorção de umidade a partir de 75 % de umidade relativa do ar, porém permanece inferior ao NA.

Soares et al. (2015) justificaram o estudo com fertilizantes de eficiência aprimorada pelo potencial de redução da emissão de óxido nitroso (N_2O) a partir da degradação dos fertilizantes nitrogenados e, dessa forma, menor impacto

ambiental desse gás de efeito estufa. O estudo foi realizado em duas safras de cana-de-açúcar. A aplicação de dois inibidores de nitrificação (DCD - dicyandi-amide e DMPP - dimethylpyrazol phosphate) resultou na redução de 90% do N_2O liberado e não diferiu da testemunha sem N. Efeito contrário foi observado para o fertilizante com revestimento de enxofre e polímeros, cuja emissão de N_2O gás foi maior. Esse foi um resultado não esperado pelos pesquisadores e suas razões não estão claras, pois em condições de laboratório a liberação gradual do N evitou picos de concentração de nutriente acima da capacidade de absorção das plantas, isso reduziu o N disponível aos microrganismos e os processos de nitrificação e denitrificação que levam à emissão de N_2O .

2.6. O acúmulo de polímeros no solo

Os polímeros utilizados no revestimento de fertilizantes têm decomposição lenta pela sua própria função. De acordo com Yoho (1991) (apud Shaviv, 2000), o revestimento de poliolefinas tem as mais baixas taxas de degradação em relação às resinas alquílicas e resinas de poliuretano. Os dados para as taxas de degradação de tais materiais são escassos e existe a necessidade de avaliar se esses polímeros podem acumular nos solos e causar problemas ambientais (Shaviv, 2000).

Adams et al. (2015) quantificaram o teor de polímeros de três produtos com longevidade de 30 a 360 dias. A massa de polímeros representou de 7 a 15 % da massa do fertilizante. Trenkel (2010) estima que a utilização desses produtos possa acumular cerca de $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de resíduos plásticos. Embora dentro de dez anos a quantidade remanescente possa chegar a 500 kg ha^{-1} que representaria apenas 200 mg kg^{-1} de solo seco, esse autor entende que a investigação deve ser intensificada para desenvolver revestimentos biodegradáveis.

Majeed et al. (2015) referem vários trabalhos que buscam desenvolver revestimentos de polímeros biodegradáveis, tanto para reduzir o problema do nutriente residual (não liberado) quanto o acúmulo de polímeros plásticos indesejáveis no solo. Lubkowski & Grzmil (2007) salientaram que a quitosana é utilizada na indústria farmacêutica para liberação controlada de medicamentos e pode ser usada para fabricar fertilizantes revestidos. Além disso, tem proprie-

dades policatiônicas. A quitosana foi utilizada por Wu & Liu (2008) juntamente com um polímero superabsorvente para compor o revestimento de um fertilizante NPK. Os autores concluíram que o revestimento pode ser utilizado em aplicações agrícolas, pois proporcionou a liberação lenta dos nutrientes, a retenção de água e é degradável no solo.

2.7. Cinética do potássio no sistema solo-planta

O K foi o nutriente escolhido para avaliar a eficácia da tecnologia de liberação controlada. Diferente do que ocorre com outros nutrientes, entre eles, N e enxofre (S) que podem ser perdidos por volatilização, ou P, que pode tornar-se indisponível pela fixação, o K não apresenta forma volátil e os mecanismos de adsorção são pouco significativos em solos tropicais (Benites et al., 2010). No entanto, a dinâmica do K no solo e nas plantas deve ser considerada para as boas práticas de uso eficiente desses fertilizantes.

O K pode ser encontrado no solo em diferentes formas: como íon livre na solução do solo (K^+); adsorvido como complexo de esfera externa nos argilominerais e na matéria orgânica do solo (K trocável); quimiossorvido na forma de complexo de esfera interna nas entrecamadas de argilominerais do tipo 2:1 (K não-trocável) e fazendo parte da estrutura dos minerais primários (Sparks, 2003; Sposito, 2008).

O excesso de cargas negativas dos coloides confere a propriedade de troca de cátions do solo. Essa capacidade de troca de cátions (CTC) permite reter diversos elementos e disponibilizá-los lentamente às plantas. Os cátions da superfície das partículas do solo estão em equilíbrio com os existentes na solução do solo, sendo esse um processo reversível. A carga elétrica e o raio hidratado são as principais propriedades que determinam a energia de atração. Dessa forma pode ser estabelecida a seguinte ordem de preferência, denominada série liotrófica: $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$. Portanto, a baixa energia de retenção do K nos coloides do solo pode resultar na maior lixiviação desse elemento em solos bem drenados (Raij, 1991).

O K é o segundo elemento requerido em maior quantidade pelas plantas. Em condições ótimas de crescimento o K acumulado pode representar de

2 % a 5 % de sua massa seca (Marschner, 1995). O íon K^+ na solução do solo é a forma como as plantas absorvem esse nutriente. A quantidade necessária depende da espécie vegetal e do seu estágio de crescimento. O K trocável também é considerado uma forma prontamente disponível às plantas. No entanto, o K dos sítios de troca dos colóides do solo está em equilíbrio com o K não-trocável e com o K estrutural dos minerais; dessa forma, esses últimos podem contribuir para a nutrição de plantas (Meurer, 2006).

A difusão e o fluxo de massa são os principais mecanismos de transporte e suprimento do K^+ da solução do solo até a superfície radicular. O fluxo de massa depende da quantidade de água transpirada pela planta. A difusão ocorre em resposta ao gradiente de concentração do nutriente na rizosfera devido à absorção pelas raízes (Barber, 1995). O K é um elemento com alta mobilidade na planta, não faz parte da estrutura celular, mas atua nos processos fisiológicos de regulação osmótica e ativação de enzimas, entre outros (Taiz & Zeiger, 2006). A exigência nutricional da cultura do milho varia em função do tempo e do estágio de desenvolvimento, sendo máxima no vegetativo, com a taxa de acúmulo atingindo o pico entre os 60 e 70 dias, como se observa na Figura 6.

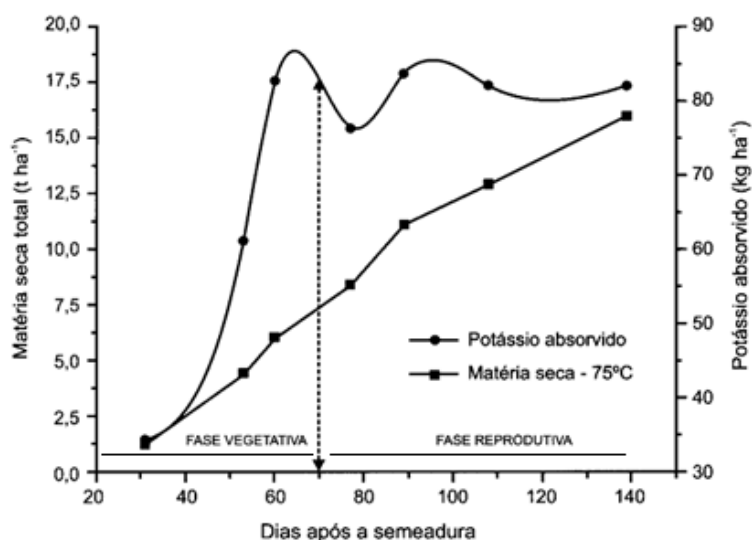


Figura 6. Acúmulo de potássio na parte aérea de plantas de milho. Fase vegetativa = da emergência até a emissão do pendão; Fase reprodutiva = do florescimento até a maturação fisiológica. Fonte: Coelho (2005).

A mobilidade do K no solo é influenciada pela textura, CTC e teor de matéria orgânica. O K da solução está em equilíbrio com o K trocável e o contido nos minerais primários. As plantas absorvem o K da solução, mas, em condição de excesso de água, pode ser perdido por lixiviação (Figura 7). O acréscimo de matéria orgânica, pelos restos culturais, e o aumento do pH, pela calagem, aumentam a CTC e a capacidade de reter o K nas posições de troca, reduzindo a sua lixiviação. Considerando que as formas de K não-trocáveis podem manter estáveis as formas de K trocáveis no solo, o suprimento de K para as plantas pode estar mais relacionado às características do próprio solo do que ao histórico de adições de fertilizantes potássicos (Mielniczuk, 2004; Kaminski et al., 2007).

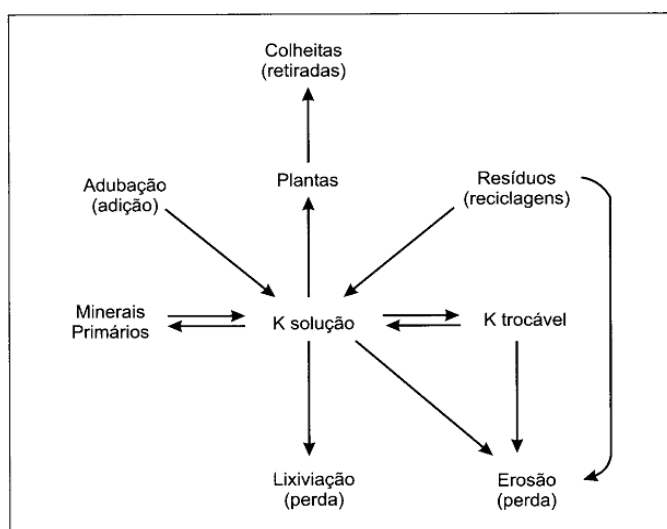


Figura 7. Representação esquemática da dinâmica do potássio no sistema solo-planta-ambiente. Fonte: Mielniczuk (2005).

Em um estudo de mobilidade descendente de cátions em colunas de solo (7,5 x 35 cm), Ernani et al. (2007) observaram que a concentração de K nas soluções percoladas de um Nitossolo de textura argilosa com teor inicial de K de 120 mg kg⁻¹ e 40 g Kg⁻¹ de matéria orgânica (CTC não informada), foi de 1 a 2 mg L⁻¹ para a testemunha e até 8 mg L⁻¹ para o tratamento com KCl aplicado em superfície na dose de 300 mg kg⁻¹. Esse pico ocorreu na quarta aplicação de água e decresceu linearmente até a décima aplicação, quando acumulou 10 mg L⁻¹ e 45 mg L⁻¹ de perdas para a testemunha e o fertilizante, respectivamente. A lixiviação foi considerada pequena, e se extrapolada para as condições de campo, a perda estimada foi de 1 % a 4 % do K aplicado.

Em outro experimento conduzido por Werle et al. (2008) em colunas de solo (5 x 40 cm) com residual de seis anos de cultivo, foi observado que no solo de textura média a intensidade de lixiviação foi maior até a quarta aplicação de água, evidenciando rápida lixiviação do nutriente. O solo argiloso reteve maiores quantidades de K, porém a intensidade de lixiviação foi mais constante e acumulou maior quantidade de K percolado à medida que mais água foi adicionada (1.600 mm em 16 semanas). Independente da textura do solo, quanto maior o teor de K não-trocável presente no solo maior foi a lixiviação. O efeito do aumento da adubação potássica residual foi detectado até a profundidade de 20 cm, no solo de textura argilosa, e na faixa de 20 a 40 cm, no solo de textura média.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi dividido em dois estudos. O primeiro, com incubação de fertilizantes no solo em condições controladas no Laboratório de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O segundo, com cultivo de plantas em vasos na casa-de-vegetação do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, ambos em Porto Alegre, RS.

3.1. Produtos utilizados nos experimentos e sua caracterização química

As fontes de potássio utilizadas nos dois estudos foram o fertilizante mineral simples cloreto de potássio (KCl) com 60% de K_2O , considerado referência, e o fertilizante da marca comercial Producote[®], com teores nominais de 51% de K_2O e 14% de enxofre (S), identificado como “KCl revestido”. O produto testado possui registro no MAPA (SP 07378/10464-8) e foi fabricado em 09.04.2012, lote 90412, com validade até 09.04.2015. Uma embalagem de cinco quilos identificada como amostra grátis foi encaminhada pela empresa Produquímica ao Laboratório de Solos da UFRGS. Quanto à composição do produto, o fornecedor informou que a fonte de K é o próprio KCl revestido por uma camada de enxofre elementar e outra camada de polímeros orgânicos, cujos nomes não foram informados pelo fabricante devido ao segredo industrial. O tempo de liberação dos nutrientes (longevidade) é determinado pela espessura da camada de polímeros orgânicos que reveste cada grânulo e a temperatura média do solo. Para o produto em questão o prazo médio declarado é de 3-4 meses.

Os fertilizantes utilizados foram previamente analisados no Laboratório de Fertilizantes da Rede LANAGRO do MAPA, em Porto Alegre/RS, pela metodologia oficial para confirmar os teores (K_2O e S) garantidos (BRASIL, 2007b).

3.2. Estudo I – Incubação em laboratório

O estudo de incubação foi realizado com solo de textura franco-arenosa e baixo teor de potássio, retirado do banco de solos do Laboratório de Solos da UFRGS, coletado na unidade de mapeamento de Tupanciretã, com material de origem do arenito Botucatu. A densidade do solo nas condições de incubação foi de $1,48 \text{ kg dm}^{-3}$ e seus principais atributos estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Atributos⁽¹⁾ do solo utilizado no estudo I – incubação em laboratório

Solo	H+Al	CTC	Argila	Silte	Areia	P	K
	-- $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ --		----- % -----			----- mg dm^{-3} -----	
PVAd ⁽²⁾	4,1	5,6	16,2	4,4	79,4	11,2	33

⁽¹⁾Conforme Tedesco et al. (1995). ⁽²⁾Argissolo Vermelho Amarelo distrófico.

O solo foi acondicionado em frascos plásticos de 100 mL. Os grânulos do fertilizante KCl revestido foram selecionados por tamanho, sendo separados somente os inteiros com aproximadamente 4 mm. Determinou-se a massa de 12 grânulos e selecionou-se os demais de modo a manter todos os tratamentos com 286 mg de fertilizante KCl resvestido, variando o número de grânulos de 12 a 15. No tratamento referência, foram utilizados 244 mg de KCl para manter o suprimento de K_2O de ambos produtos. A dose de K_2O foi de 146 mg em 100 g de solo (1.790 mg dm^{-3}).

Os grânulos de fertilizante foram envolvidos em uma malha permeável de poliéster de 55 fios medindo $2,0 \times 1,5 \text{ cm}$ selada nas extremidades, denominada "sachê". Os sachês foram colocados nos frascos, previamente abastecidos com 50 g de solo, e cobertos com outros 50 g de solo. A massa total de 100 g de solo foi umedecida com 25 mL de água destilada, para saturar o solo. Os frascos foram mantidos abertos em incubadora com temperatura constante de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (Figura 8). A umidade foi monitorada em intervalos de 3-4 dias pela massa dos frascos e restabelecida até 20 % (80 % da capacidade máxima) pela adição de água destilada. Os frascos permaneceram na incubadora pelos seguintes períodos: 1, 2, 5, 7, 9, 14, 21, 28, 37, 48, 56, 72, 89, 124, 154 dias. Decorrido o período de incubação estabelecido para cada tratamento retiraram-se os frascos da incubadora separando-se o sachê do solo (Figura 9).

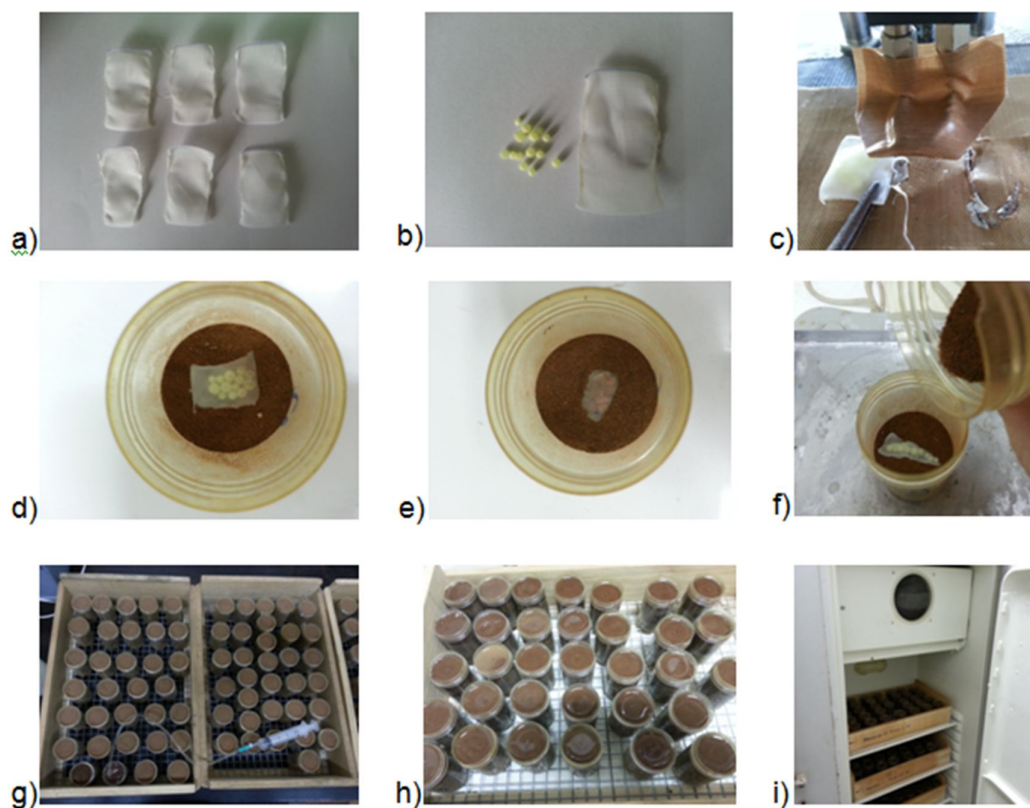


Figura 8: Preparo dos tratamentos do estudo I – incubação: (a) sachês de poliéster; (b) grânulos de fertilizantes e o sachê aberto; (c) fechamento do sachê com máquina seladora; (d) frasco com solo e o sachê com KCl revestido; (e) frasco com solo e o sachê com KCl convencional; (f) cobertura do sachê com solo; (g) umedecimento do solo; (h) frascos umedecidos; (i) bandejas com os frascos na incubadora.

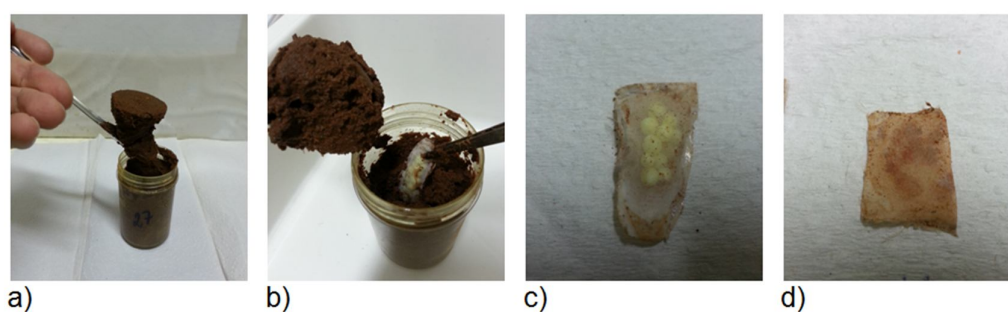


Figura 9: Coleta das amostras do estudo I - incubação: (a) Retirada da porção superficial do solo; (b) separação do sachê; (c) sachê retirado do solo com o KCl revestido remanescente; (d) sachê retirado do solo com o KCl convencional remanescente.

O solo de cada frasco foi colocado em estufa à temperatura de aproximadamente 45 °C, com circulação forçada de ar para secagem. Toda a porção de solo do frasco (superior e inferior ao sachê) foi homogeneizada e uma amostra submetida à extração de K pelo método Mehlich-1, descrito por Tedesco et al. (1995) e determinação por espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES) marca Perkin Elmer, modelo optima 8300, com os seguintes parâmetros de operação: modo de observação: axial; potência de radiofrequência (W): 1400; vazão do gás de geração do plasma (L min.⁻¹): 9,0; vazão do gás auxiliar (L min.⁻¹): 0,2; vazão do gás de nebulização (L min.⁻¹): 0,6; número de repetições: 1; tempo de integração (s): 1; comprimentos de ondas (nm): 766,490; altura observação (cm): 15,0.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em um fatorial 2 x 15, correspondendo a dois produtos avaliados em 15 períodos, com três repetições. O tratamento testemunha, sem fertilizante, foi avaliado com 1, 2 e 5 dias de incubação apenas para confirmar o teor de K trocável no solo. Os resultados foram submetidos à análise de variâncias (ANOVA). Os efeitos principais (produtos e períodos) foram considerados significativos a 5 % de significância e o efeito da interação (produtos x períodos) para o desdobramento da ANOVA foi considerado significativo a 25 %, conforme sugerido por Perecin e Filho (2008). O desdobramento da interação se deu pelo teste F do efeito dos períodos dentro de cada produto e o efeito dos produtos dentro de cada período pelo teste *t*. Havendo efeito de período dentro do produto, a análise foi complementada por regressão, determinando-se o ajuste de função linear, quadrática ou cúbica.

3.3. Estudo II – Cultivo em casa-de-vegetação

Foram utilizados dois solos para o cultivo de milho em vasos. Um Argissolo de textura franco-arenosa, coletado no município de Taquara/RS, com material de origem do arenito Botucatu; e um Nitossolo de textura argilosa, coletado no município de Santa Cruz do Sul/RS, com material de origem de Basalto. No primeiro havia floresta plantada e no segundo mata nativa. A classificação textural é dada de acordo com o triângulo adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS) (Lemos e Santos, 1996). A coleta do solo foi feita na

camada superficial de 0 a 20 cm de profundidade e, após seco ao ar, o solo foi tamizado em peneira com malha de 4 mm de diâmetro. Uma amostra representativa de cada solo foi submetida à análise química completa da rotina do Laboratório de Solos da UFRGS e uma segunda amostra para análise física no Laboratório de Solos e Águas da UPF (Universidade de Passo Fundo). Os principais atributos dos solos estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Atributos⁽¹⁾ dos solos utilizados no estudo II - cultivo de plantas em vasos em casa-de-vegetação

Solo	pH	MO	Al+H	CTC	Sat	Argila	Silte	Areia	P	K
					Bases					
	H ₂ O	g kg ⁻¹	-- cmolc dm ⁻³ --		% da CTC	-----%-----			-----mg dm ⁻³ -----	
PVAd*	4.4	2,0	6,2	6,9	7	16	7,0	77	2,8	13
NVd**	5.4	3,8	4,9	14,0	14	55	21	24	4,3	85

*Argissolo Vermelho Amarelo distrófico de textura franco-arenosa; **Nitossolo Vermelho distrófico de textura argilosa; ⁽¹⁾conforme Tedesco et al. (1995). MO - matéria orgânica; Al + H - Alumínio (Al³⁺) + Hidrogênio (H⁺); CTC - capacidade de troca de cátions; P - fósforo; K - potássio.

A correção da acidez dos solos foi efetuada com a aplicação da mistura de CaCO₃ e MgCO₃ na proporção molar de 3:1 e a dose calculada para pH 6,0 na relação solo:água de 1:1. Os vasos cilíndricos de PVC foram confeccionados com medidas de 15 cm de diâmetro e 35 cm de altura. Na porção inferior do vaso foram adicionados 800 g de pedra brita lavada número 00 e quatro camadas de tela de nylon com malha de 1 milímetro, para a drenagem do solo. Uma mangueira de 8 milímetros de diâmetro foi acoplada na base do vaso para coleta do percolado (Figura 10). O volume de solo acondicionado nos vasos foi de 5 dm³. A densidade do solo foi de 1,09 kg dm⁻³ e 1,25 kg dm⁻³ para os solos de textura argilosa e franco-arenosa, respectivamente. Os vasos permaneceram em bancada com altura de 1 m do piso e a mangueira de drenagem introduzida em uma garrafa pet de 1,5 L.

O solo foi saturado com água destilada e após 24 horas foi determinada sua massa para estimar a capacidade de retenção de água. A umidade gravimétrica foi de 15 % e 9 % e o volume médio de água retido nos vasos foi de 800 mL e 570 mL para o solo de textura argilosa e franco-arenosa, respectivamente.

Para proporcionar um período de correção da acidez e estruturação do solo, foram realizados três cultivos sem fertilizantes, o primeiro com aveia e os demais com milho, por 30 dias cada. As plantas tiveram baixo desenvolvimento devido à deficiência nutricional e ao calor excessivo (57 °C). Um sombrite foi instalado sobre a casa de vegetação que resultou em temperatura interna máxima de 45 °C.

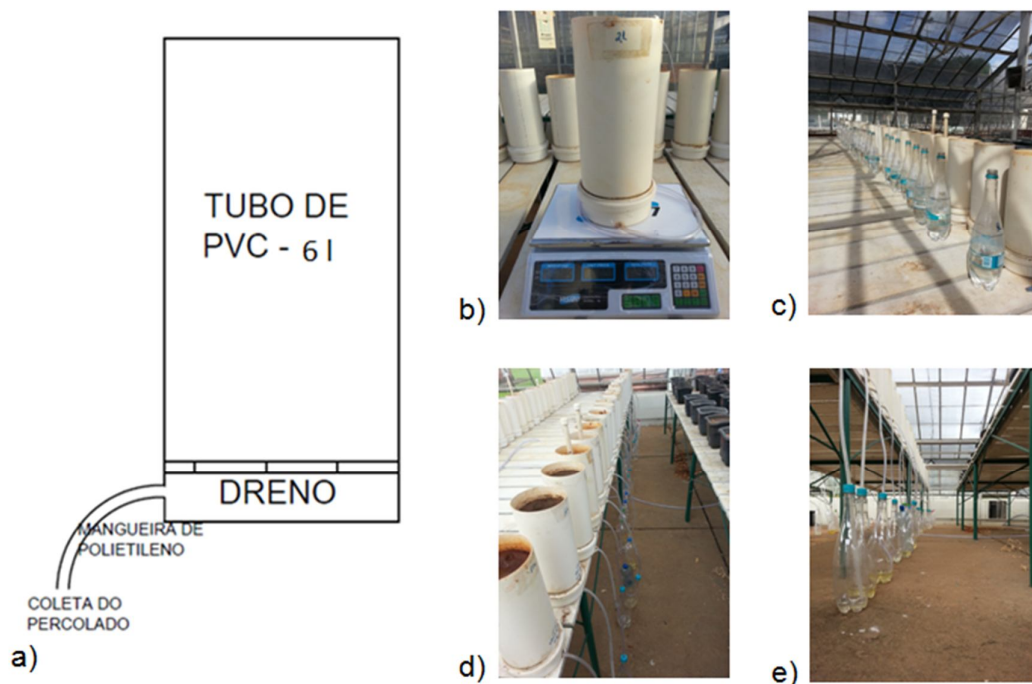


Figura 10: Cultivo de plantas em casa-de-vegetação: (a) esquema do sistema de drenagem e coleta da água percolada dos vasos; (b) balança digital para monitoramento de massa de solo e água; (c) água destilada para irrigação; (d) mangueiras de drenagem; (e) garrafas pet para armazenar o líquido percolado.

O experimento definitivo iniciou no dia 6 de março de 2015. O número de unidades experimentais totalizou 56 vasos (dois solos, dois fertilizantes, três doses de fertilizantes, uma testemunha para ambos os produtos e quatro repetições). O experimento foi conduzido em quatro blocos e os 14 tratamentos distribuídos aleatoriamente dentro de cada bloco. A adubação foi calculada com referência nas recomendações para a cultura do milho (*Zea mays L.*) do Manual de Adubação e Calagem para os estados do RS e SC (CQFS - RS/SC, 2004).

Os tratamentos de potássio foram definidos em três doses, além da testemunha com dose zero. Considerando que a dose máxima de K_2O recomendada para aplicação em linha de semeadura é de 80 kg ha^{-1} (CQFS - RS/SC, 2004), as doses definidas representaram 55 %, 110 % e 165 % desse limite de referência (Tabela 5).

A adubação de N foi feita com sulfato de amônio a fim de fornecer complementarmente o enxofre (S) e evitar a influência do S presente no revestimento do fertilizante testado. A adubação de P foi feita com o superfosfato triplo e os micronutrientes fornecidos por fertilizante mineral complexo contendo Zn, Mn, B e Cu (Tabela 6).

Tabela 5. Recomendação de adubação de potássio e quantidade aplicada no cultivo de milho em vasos em casa-de-vegetação

Nutriente	Recomendação ⁽¹⁾ (kg ha^{-1})		Doses aplicadas ⁽²⁾		
	Argiloso	F. Arenoso	$K_2O \text{ kg ha}^{-1}$	K mg dm^{-3}	K mg vaso^{-1}
K_2O	90	180			
Dose 1		55 %*	44	18,3	91,3
Dose 2		110 %*	88	36,5	182,6
Dose 3		165 %*	132	54,8	273,9

⁽¹⁾Recomendação de adubação total (linha de semeadura + cobertura) para produtividade de 10 t ha^{-1} . ⁽²⁾Aplicação a lanço antes da semeadura com incorporação até 5 cm de profundidade. *Valores percentuais da dose máxima recomendada para aplicação na semeadura (80 kg ha^{-1}).

Tabela 6. Recomendação de adubação e quantidade de nutrientes aplicados no cultivo de milho em vasos em casa-de-vegetação

Nutriente	Recomendação ⁽¹⁾ (kg ha^{-1})		Aplicado com sobredosagem ⁽²⁾	
	Argiloso	Franco-arenoso	kg ha^{-1}	Vaso (mg dm^{-3})
Nitrogênio	160	180	110	275
Enxofre	30	30	115	288
Fósforo	150	210	220	550
Zn e Mn	-	-	7,2	18
B e Cu	-	-	3,6	9

⁽¹⁾Recomendação total de adubação (linha de semeadura + cobertura) para produtividade de 10 t ha^{-1} . ⁽²⁾Aplicação a lanço antes da semeadura com incorporação até 5 cm de profundidade.

Os fertilizantes foram incorporados na área de solo do vaso até a profundidade de 5 cm. Foram efetuadas quatro irrigações diárias de 250 mL de água destilada a fim de promover a solubilização dos sais e o seu aprofundamento no perfil do solo. No dia 10/03/2015 foram depositadas quatro sementes de milho por vaso (Pioneer superprecoce), a cerca de dois cm de profundidade. Após a semeadura foi efetuada uma irrigação e no dia seguinte foi realizada a primeira coleta de amostra do líquido percolado acumulado desde o início do experimento. Seis dias após a semeadura, as plantas atingiram 5-10 cm de altura sendo efetuado o desbaste para manter apenas duas plantas por vaso (Figura 11). Diariamente foi observada a umidade da superfície do solo e semanalmente foi medida a massa dos vasos para estimar o volume necessário de irrigação. A água adicionada foi calculada pela diferença entre a massa inicial do vaso com solo úmido e a massa no dia da irrigação. Os valores adicionados com as respectivas datas estão na Tabela 7.

Tabela 7. Registros de informações da condução do experimento de cultivo de plantas em vasos em casa-de-vegetação, Agronomia/UFRGS, 2015

Data	Registros Evento	Irrigação (mL)	Regime hídrico (mm)	Água percolada (mL)		Temp. (°C)	
				Argiloso	F. Arenoso	Min.	Max.
06/3	Adubação	1.000 ⁽¹⁾	56			22	57
10/3	Semeadura	425	24				
11/3	1a coleta			150	215		
14/3	Emerg.					20	45
16/3	Desbaste					18	45
20/3		100	6				
22/3		100	6			16	45
24/3		300	17			16	45
25/3	2a coleta			140	180		
29/3		500	28				
30/3	3a coleta			200	200	16	45
03/4		250	14				
06/4		150	8			16	50
07/4		500	28				
08/4	4a coleta	500	28	310	490		
10/4	Corte (V4)					17	45

⁽¹⁾ Distribuídos em quatro dias.

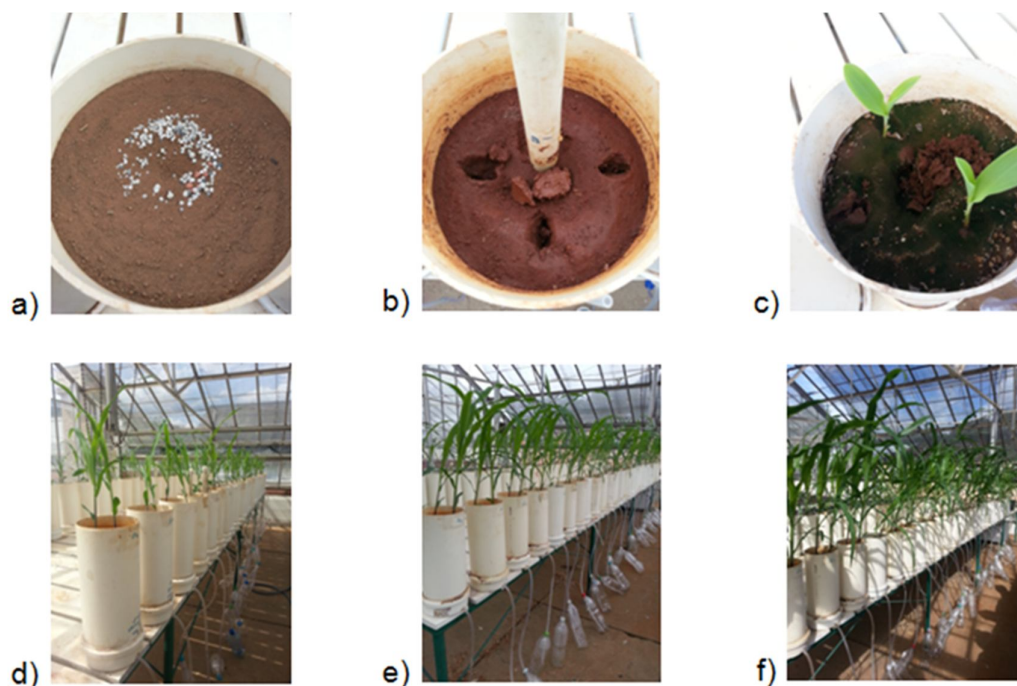


Figura 11: Condução do experimento em casa-de-vegetação. (a) 06/03/15 - incorporação dos fertilizantes; (b) 10/03/15 – semeadura; (c) 16/03/15 – 6 dias de desenvolvimento, desbaste; (d) 24/03/15 - 14 dias de desenvolvimento; (e) 30/03/15 - 20 dias de desenvolvimento e (f) 06/04/15 - estágio vegetativo V4.

O volume total de irrigação no período de 34 dias desde a adubação ao corte das plantas correspondeu a 210 mm de chuva. A quantidade de solução percolada em cada vaso foi medida com proveta e uma amostra recolhida em frasco plástico que foi hermeticamente fechado para armazenamento em refrigeração. A quantidade de K no líquido percolado foi determinada diretamente na amostra por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES). A variável “K percolado” foi obtida pela multiplicação da quantidade de K na amostra (mg L^{-1}) pelo volume total coletado (L) (quatro coletas).

Após 30 dias da emergência, as plantas foram cortadas a um centímetro do solo e acondicionadas em sacos de papel pardo para secagem em estufa a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 48 horas. A variável massa de matéria seca (MS) foi composta pela soma da massa (g) das duas plantas cultivadas em cada vaso. A matéria seca foi moída em moinho de facas passando por peneira com orifício de um milíme-

tro para extração do K com digestão nítrico-perclórica, conforme Tedesco et al. (1995), e a determinação, por ICP-OES. A variável “K absorvido” acumulado foi obtida pela multiplicação do teor de K no tecido pela respectiva MS produzida.

A análise estatística dos resultados de cada variável foi efetuada separadamente por tipo de solo na seguinte sequência: (i) análise de variâncias (ANOVA) para verificar o efeito dos sete tratamentos (produtos x 3 doses + testemunha) sobre as variáveis observadas, utilizando nível de significância de 5%; (ii) contrastes ortogonais, comparação da média da testemunha contra a média dos tratamentos com fertilizantes (K revestido e KCl, nas três doses) pelo teste *t* com nível de significância de 5%; (iii) ANOVA dos tratamentos com fertilizantes para avaliar os efeitos principais e a interação (produto x dose) com nível de significância de 5% e 25% respectivamente; (iv) desdobramento da ANOVA para o efeito de doses dentro de cada produto e o efeito de produtos dentro de cada dose com nível de significância de 5%; (v) havendo efeito de dose dentro de produto, a análise foi complementada por regressão, determinando-se o ajuste significativo de função para 5% de significância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e a respectiva discussão estão apresentados por estudo.

4.1. Estudo I – Incubação em laboratório

Os teores de K disponível no solo determinados após a incubação com o fertilizante KCl convencional ou o KCl revestido, em 15 períodos ao longo de 154 dias, estão apresentados na Tabela 8. O teste de comparação de médias para o efeito do produto em cada período foi significativo ($p < 0,05$) e confirmou a superioridade do KCl convencional em liberar K em todos os tratamentos. O teor de K trocável no tratamento testemunha (solo sem fertilizante) foi de $33,3 \text{ mg dm}^{-3}$. Para estimar o K proveniente dos fertilizantes, esse valor deve ser subtraído dos valores do teor de K disponível.

Tabela 8. Teor de K disponível no solo após incubação com dois fertilizantes nos respectivos períodos

Período (dias)	KCl revestido ⁽¹⁾	KCl convencional ⁽¹⁾
	----- mg dm^{-3} -----	-----
1	111 a	1.330 b
2	44 a	1.558 b
5	146 a	1.652 b
7	50 a	1.754 b
9	372 a	1.572 b
14	389 a	1.525 b
21	333 a	1.620 b
28	446 a	1.536 b
37	236 a	1.602 b
48	277 a	1.536 b
56	151 a	1.629 b
72	609 a	1.559 b
89	367 a	1.610 b
124	590 a	1.461 b
154	788 a	1.555 b

⁽¹⁾As médias nas linhas seguidas de mesma letra não diferem pelo teste *t* a 5% de significância.

O fertilizante convencional atingiu em média 72 % de liberação de K nas primeiras 24 horas, 85 % em dois dias e 90 % em cinco dias. Isso comprova a liberação imediata dessa fonte. O fertilizante potássico revestido apresentou

ampla variabilidade de liberação entre as repetições nos primeiros tratamentos. A liberação de K foi cerca de 20 % aos 28 dias (CV 123 %), 30 % aos 72 dias (CV 40 %) e 40 % com cinco meses de incubação (CV 26 %).

Adams et al. (2013) também observaram alta variabilidade (CV 10 % a 40 %) na liberação do produto NPK revestido com resina termoendurecida incubado em meio líquido ao longo de 400 dias. Esses autores atribuíram o comportamento errático à tecnologia de fabricação do revestimento, pois observaram a dilatação dos grânulos que provocou a ruptura aleatória do revestimento. No presente estudo pode-se atribuir a maior variabilidade no período inicial à possível ocorrência de bolhas de ar no entorno dos grânulos que promoveram a descontinuidade do contato do meio líquido para liberar o nutriente. Ao longo do período de incubação, com a sequência de molhamento e secagem, a eventual insuficiência de água em uma parte do período reduziu o seu impacto sobre a liberação total.

Ao desdobrar a análise da variância para a interação (produto x dias), o efeito de dias em cada produto foi significativo somente para o produto revestido e a complementação da análise por regressão permitiu o ajuste dos dados desse produto pela função linear (Figura 12).

Considerando o aporte de K no solo pelos fertilizantes (1.790 mg dm^{-3}) e descontado o teor inicial (33 mg dm^{-3}), a estimativa de liberação de 75 % do nutriente do fertilizante revestido pela equação $\hat{y} = 165,59 + 3,65x$ resulta em 315 dias. Nesse caso, a longevidade do fertilizante revestido testado poderia ser de 10 a 12 meses e não de 3 a 4 meses como declarado pelo fabricante.

Supondo a utilização desse produto na cultura do milho, com pico de demanda de 85 kg ha^{-1} de K aos 70 dias de cultivo (Coelho, 2005), seria necessária a aplicação de 555 kg ha^{-1} do produto comercial (280 kg ha^{-1} de K) na semeadura, pois apresentou 30 % de liberação nesse prazo. Essa dose seria inviável técnica e economicamente. A alternativa para o seu uso em culturas anuais seria a antecipação da aplicação para cerca de 90 dias antes da semeadura e a dose ajustada de acordo com o manejo nutricional e a rotação de culturas.

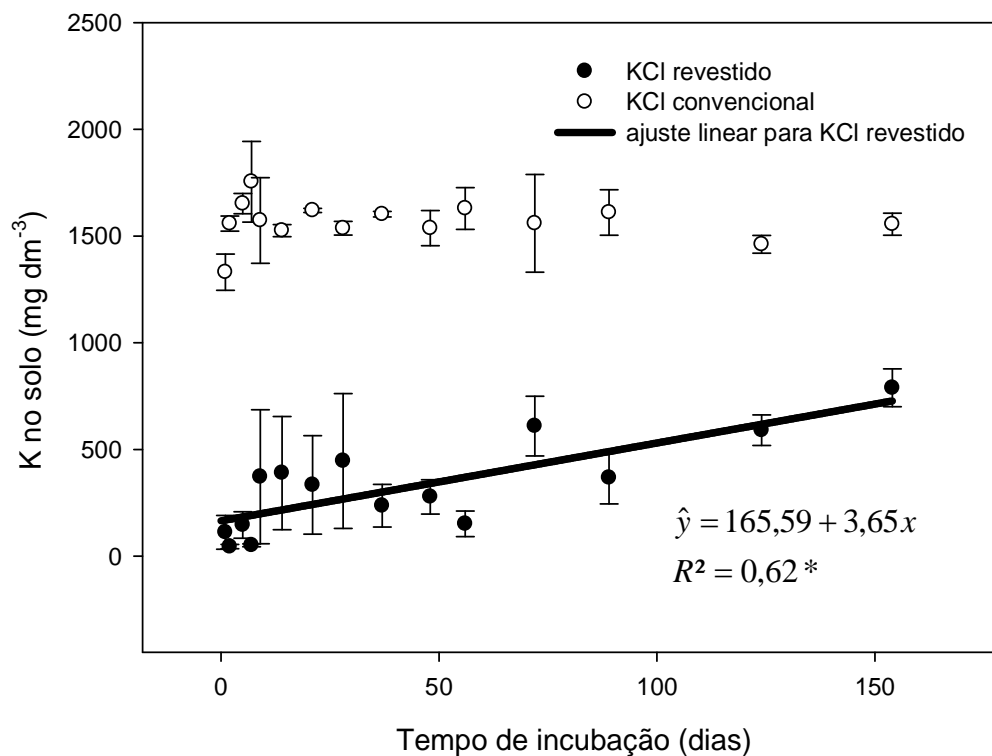


Figura 12. Variação no teor de potássio trocável no solo com dois fertilizantes em diferentes períodos de incubação. Médias com barra do erro padrão e reta do ajuste da função linear. (*) significativo a 5 %.

Na prática, a comercialização desse produto se dá em mistura com fertilizantes convencionais para fornecer parte dos nutrientes imediatamente e proteger o restante de possíveis perdas por lixiviação, principalmente em solos arenosos. O uso de produto revestido puro é recomendado pelo fabricante para o transplante de mudas para o campo, caso de culturas perenes.

Os resultados obtidos neste trabalho diferem dos obtidos por Mota (2013) e Medina et al. (2014), que em condições semelhantes de incubação no solo, à temperatura de 25 °C, verificaram a liberação de 80 % a 90 % de Nitrogênio no prazo de 40 a 180 dias. Cabe ressaltar que esses autores avaliaram fertilizantes nitrogenados revestidos e não foi possível encontrar estudos de incubação exclusivamente com fertilizante potássico, tanto na literatura nacional quanto internacional.

Segundo Trenkel (2010), o padrão de liberação pode diferir consideravelmente entre os tipos de revestimento e entre lotes de produção de uma mesma tecnologia. Os grânulos com o revestimento danificado liberam o nutriente imediatamente após o contato com a água do solo. Adams et al. (2015) sugerem que a mistura de grânulos com diferentes taxas de liberação pode ser utilizada para uniformizar a taxa de liberação ao longo do tempo.

4.2. Estudo II – Cultivo em casa-de-vegetação

Os resultados estão apresentados por variável e dentro dela por tipo de solo: Argissolo Vermelho Amarelo distrófico (PVAd) de textura franco-arenosa e Nitossolo Vermelho distrófico (NVd) de textura argilosa. A análise estatística foi realizada separadamente para cada solo, mas a discussão é feita em conjunto.

4.2.1. Potássio percolado

A variável “K percolado” se refere à massa total de K lixiviado do solo e os valores estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. K percolado de solos que receberam fertilizante KCl convencional ou revestido

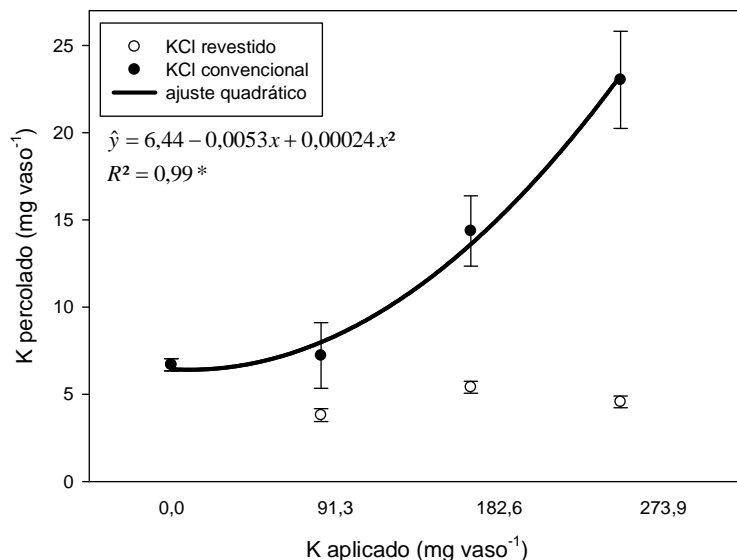
Dose de K (mg vaso ⁻¹)	----- PVAd Franco-arenoso -----			----- NVd Argiloso -----		
	KCl conv.	KCl revest.	p ⁽²⁾	KCl conv.	KCl revest.	p ⁽²⁾
----- mg vaso ⁻¹ -----						
D0 Test. ⁽¹⁾	6,7 (0,7)	6,7 (0,7)	--	4,2 (0,9)	4,2 (0,9)	--
D1 (91,3)	7,2 (3,8)	3,8 (0,7)	0,14	3,4 (0,7)	3,8 (0,6)	0,33
D2 (182,6)	14,4 (4,0)	5,4 (0,7)	< 0,01	2,8 (0,5)	3,4 (0,5)	0,19
D3 (273,9)	23,0 (5,6)	4,6 (0,7)	< 0,01	4,7 (0,9)	3,4 (0,4)	< 0,01

⁽¹⁾Testemunha comum às fontes; ⁽²⁾as médias nas linhas com p < 0,05 diferem entre si pelo teste t a 5% de significância. Valores entre parênteses indicam o desvio padrão.

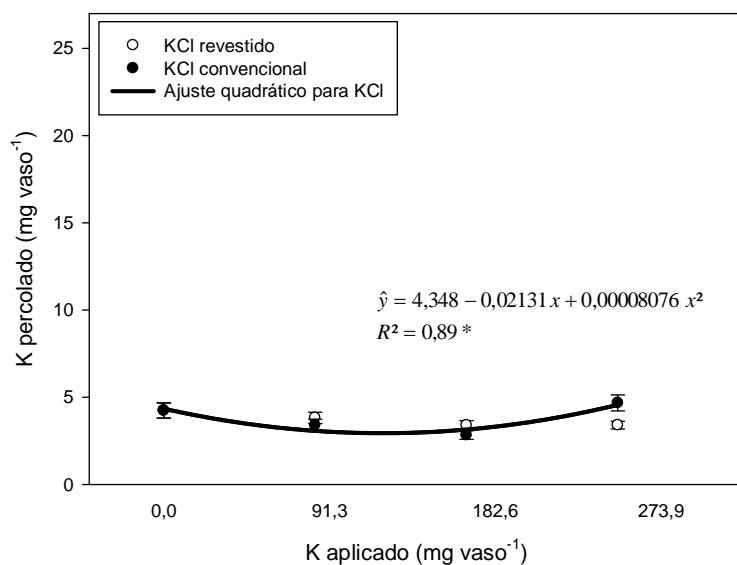
Houve efeito significativo para a interação produto x dose em ambos os solos. No entanto, o efeito de dose sobre a perda de K foi observado somente para o KCl convencional. A complementação da análise por regressão para a relação entre K perdido e dose de K aplicada com KCl convencional resultou no ajuste de função quadrática em ambos os solos (Figura 13).

A lixiviação de K nos tratamentos com KCl convencional foram superiores às do fertilizante KCl revestido nas doses 2 e 3 no solo franco-arenoso e

apenas na dose 3 no solo argiloso. Essas perdas ocorreram devido à imediata solubilidade do KCl convencional enquanto que o revestido restringiu a liberação do nutriente para a solução do solo, como foi observado no estudo de incubação apresentado anteriormente.



(a)



(b)

Figura 13. K percolado dos solos (a) PVA franco-arenoso e (b) NVd argiloso, que receberam fertilizante KCl convencional ou revestido. Curva ajustada por função quadrática. (*) significativo a 5 %.

A perda de K por lixiviação foi observada nos tratamentos testemunha sem fertilizante potássico (dose zero). O nutriente perdido foi proveniente do K trocável do solo que se movimentou verticalmente pelo fluxo da água. Essa perda representou 10 % do teor inicial de K do solo franco-arenoso (Tabela 10) e apenas 1 % do solo argiloso (Tabela 11). Logo, as características do solo, como por exemplo, presença de matéria-orgânica, alta CTC e textura argilosa, para reter um cátion e reduzir o fluxo de massa são mais determinantes para evitar a sua perda do que o teor inicial desse nutriente.

Tabela 10. K lixiviado do solo de textura franco-arenosa em relação ao total disponível no solo (trocável + adicionado via fertilizantes)

Dose	----- KCl revestido -----			----- KCl convencional -----			
	0	1	2	3	1	2	3
----- mg vaso ⁻¹ -----							
Trocável	65	65	65	65	65	65	65
Adicionado	0	91	183	274	91	183	274
Total	65	156	248	339	156	248	339
Lixiviado	7	4	5	5	7	14	23
Lixiviado (%)	10	2	2	1	5	6	7

No solo de textura franco-arenosa a lixiviação de K representa 1 a 2 % do total disponível e 5 a 7 % para os tratamentos com o fertilizante KCl revestido e KCl convencional, respectivamente. A maior perda de K nos tratamentos com o fertilizante KCl verificada nesse solo evidencia que a disponibilidade de K dessa fonte de liberação imediata é maior que a capacidade de absorção pelo sistema radicular do milho, nessa época de desenvolvimento. Hipótese também referida por Werle et al. (2008) na discussão de seus resultados.

Tabela 11. K lixiviado do solo de textura argilosa em relação ao total disponível no solo (trocável + adicionado via fertilizantes)

Dose	----- KCl revestido -----			----- KCl convencional -----			
	0	1	2	3	1	2	3
----- mg vaso ⁻¹ -----							
Trocável	425	425	425	425	425	425	425
Adicionado	0	91	183	274	91	183	274
Total	425	516	608	699	516	608	699
Lixiviado	4	4	3	3	3	3	5
Lixiviado (%)	0,9	0,7	0,6	0,5	0,7	0,5	0,7

Por outro lado, no solo de textura argilosa, as perdas de K foram menores do que 1 % do total disponível em todos os tratamentos, independente do fertilizante e da dose aplicada. O uso de fertilizante de liberação lenta ou controlada a fim de reduzir as perdas por lixiviação pode ser desnecessário para solos argilosos e com alta CTC (> 15). No entanto, comparando-se esse resultado com os obtidos por Ernani et al. (2007) e Werle et al. (2008), pode-se supor que o volume de água aplicado e o tempo decorrido neste experimento foram insuficientes para promover a percolação do K no solo argiloso.

A preservação do K proveniente dos fertilizantes indica que é possível promover um estoque do nutriente no solo de textura argilosa. Rosolem (2006) observou o incremento do K não-trocável nos primeiros oito centímetros de profundidade de um Latossolo Vermelho distroférico de textura média que recebeu adubação potássica. Isso mostra que parte do K adicionado via fertilizante pode ser retido no solo além da CTC e reduzir sua lixiviação.

Os resultados obtidos neste estudo confirmam o conhecimento atual sobre a dinâmica do K no solo. O íon K^+ é móvel e quantidades significativas se movimentam verticalmente no perfil do solo e podem ser perdidas por lixiviação, especialmente quando proveniente de fontes solúveis em solos de textura média ou arenosa e com baixa capacidade de troca catiônica (Sanzonowicz & Mielniczuk, 1985; Alfaro et al., 2004; Werle et al., 2008).

4.2.2. Produção de matéria seca e potássio acumulado por plantas de milho

Os resultados de massa de matéria seca produzida (MS) por plantas de milho são apresentados na Tabela 12 e de potássio absorvido na Tabela 13. A discussão dos resultados é feita em conjunto para essas duas variáveis.

Todos os tratamentos em ambos os solos estudados tiveram efeito significativo sobre a MS. A adição dos fertilizantes aumentou os valores dessa variável em relação à testemunha. Não houve efeito de blocos sobre a produção de MS. Verifica-se, portanto, que esse delineamento foi desnecessário nas bancadas da casa-de-vegetação no período do verão.

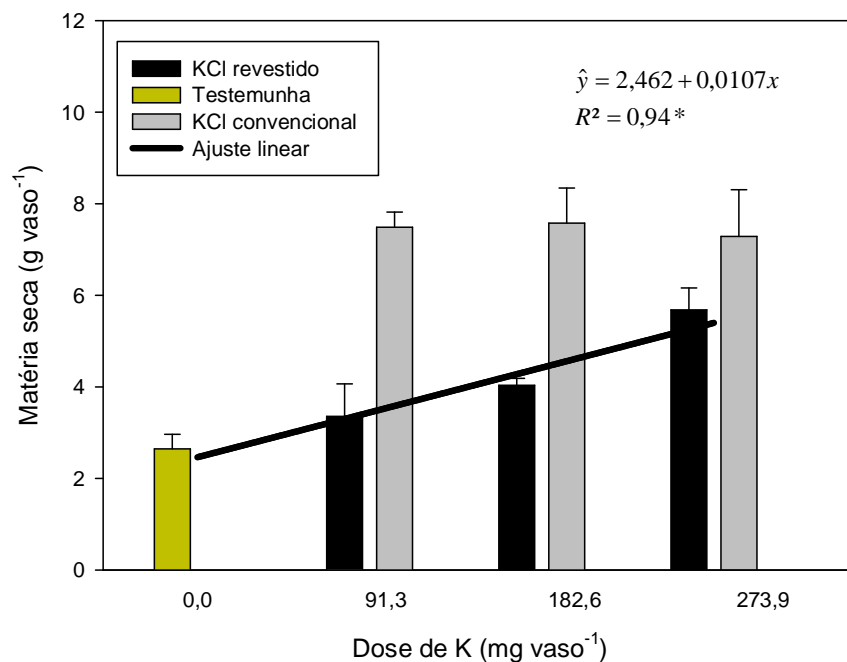
Tabela 12. Matéria seca produzida por plantas de milho cultivadas em vaso em dois tipos de solo, com doses de fertilizante KCl convencional ou revestido

Dose K	----- PVAd franco-arenoso -----			----- NVd argiloso -----		
	KCl conv.	KCl revest.	p ⁽²⁾	KCl conv.	KCl revest.	Média ⁽³⁾
	----- g vaso ⁻¹ -----					
D0 ⁽¹⁾	2,6 (0,6)	2,6 (0,6)	---	7,4 (1,4)	7,4 (1,4)	7,4
D1	7,5 (0,6)	3,3 (1,4)	< 0,01	8,6 (1,2)	8,1 (0,7)	8,4
D2	7,6 (1,5)	4,0 (0,3)	< 0,01	9,9 (1,9)	8,9 (0,9)	9,4
D3	7,3 (2,0)	5,7 (0,9)	0,08	10,5 (0,5)	9,0 (0,9)	9,7
Média ⁽³⁾	---	---		9,7	8,7	p = 0,03 ⁽³⁾

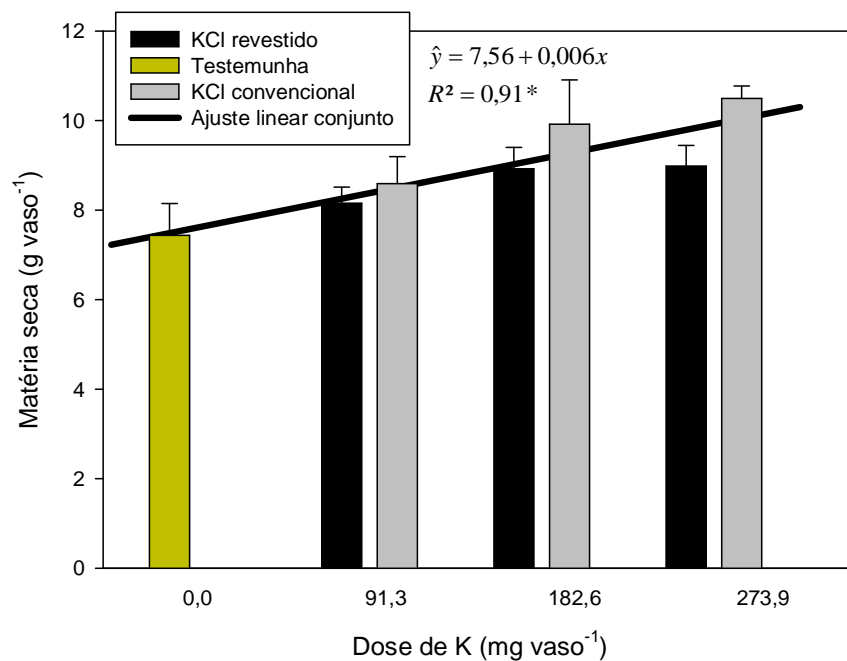
⁽¹⁾Testemunha comum aos produtos; ⁽²⁾médias nas linhas dentro de cada solo com $p < 0,05$ diferem pelo teste t a 5% de significância; ⁽³⁾não havendo interação compararam-se as médias gerais dos produtos e das doses. Valores entre parênteses indicam o desvio padrão.

O tratamento com K proveniente do fertilizante convencional promoveu maior rendimento de MS do que o com K do fertilizante revestido em ambos os solos, embora com maior destaque no solo franco-arenoso. O efeito principal de dose ocorreu no solo argiloso, porém não houve interação (produto x dose). Dessa forma, a complementação da análise estatística por regressão para o solo argiloso permite ajustar uma função linear conjunta para ambos os fertilizantes, pois as equações individuais não diferem estatisticamente entre si devido à ausência da interação.

Por outro lado, no solo franco-arenoso, a interação (produto x dose) foi significativa. O desdobramento da análise de variância, para o efeito de produto dentro de dose e dose dentro de produto, permite verificar que a superioridade do KCl convencional em liberar K para o solo e promover a maior produção de MS ocorreu apenas nas doses 1 e 2, pois não diferiu do KCl revestido na dose 3. Não houve efeito de doses de K proveniente do KCl convencional sobre a produção de MS, no entanto nos tratamentos com KCl revestido a produção de MS foi proporcional à dose de K aplicada e a regressão dos dados foi ajustada pela função linear (Figura 14).



(a)



(b)

Figura 14. Matéria seca produzida por plantas de milho cultivadas em vaso em dois tipos de solo, (a) PVA franco-arenoso e (b) NVd argiloso, com doses de fertilizante KCl convencional ou revestido. Colunas de médias com barra do erro padrão e ajuste de função linear. (*) significativo a 5 %.

Tabela 13. K total acumulado por plantas de milho cultivadas em vaso em dois tipos de solo, com K fornecido por fertilizante KCl convencional ou revestido

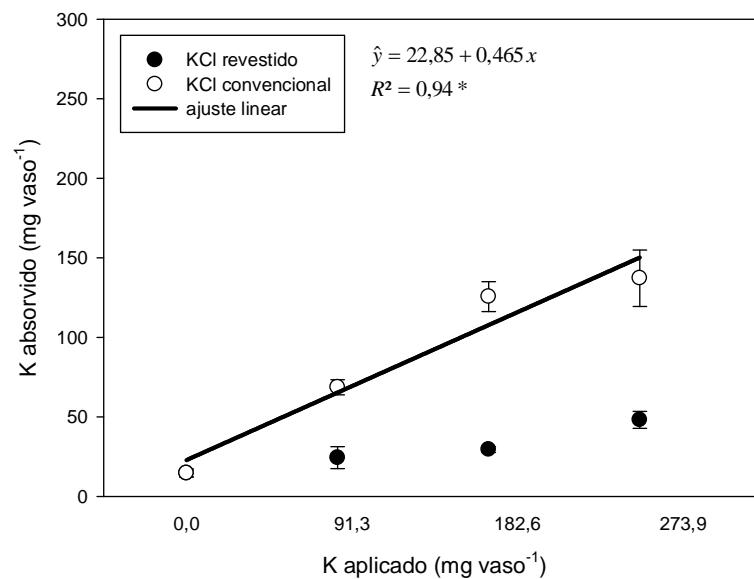
Dose de K (mg vaso ⁻¹)	PVA franco-arenoso			NVd argiloso		
	KCl conv.	KCl revest.	p ⁽²⁾	KCl conv.	KCl revest.	p ⁽²⁾
	----- mg vaso ⁻¹ -----					
D0 Test ⁽¹⁾	14,7 (4,8)	14,7 (4,8)	--	111,4 (21,7)	111,4 (21,7)	--
D1 (91,3)	68,6 (9,5)	24,4 (13,8)	< 0,01	151,7 (37,2)	136,1 (19,9)	0,53
D2 (182,6)	125,6 (18,7)	29,5 (3,7)	< 0,01	186,7 (48,0)	155,2 (46,9)	0,19
D3 (273,9)	137,2 (35,4)	48,1 (10,7)	< 0,01	226,8 (35,2)	139,9 (23,2)	< 0,01

⁽¹⁾Testemunha comum às fontes; ⁽²⁾médias com p < 0,05 diferem pelo teste t a 5% de significância. Valores entre parênteses indicam o desvio padrão.

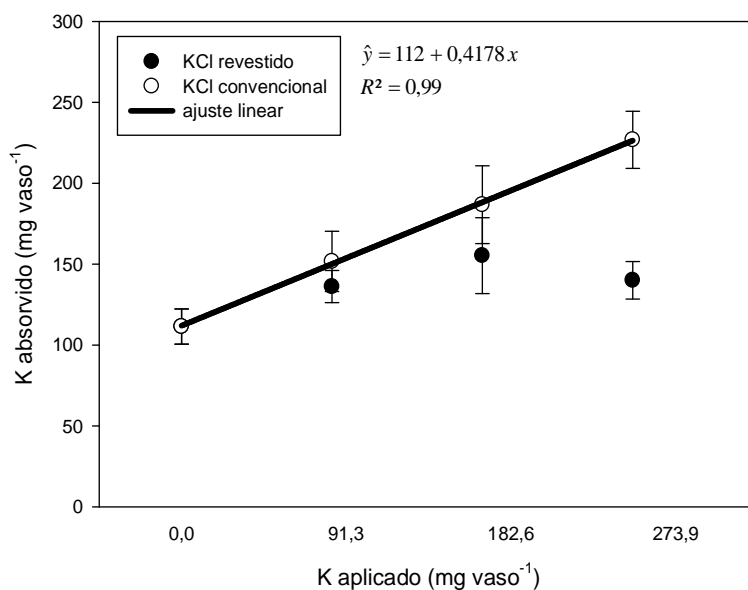
O efeito dos tratamentos sobre o K absorvido pelas plantas foi significativo em ambos os solos. A interação (produto x dose) foi significativa, pelos pressupostos de Percin & Filho (2008), e a análise estatística foi desdobrada para os dados de ambos os solos.

A absorção de K pelas plantas foi maior nas três doses de KCl convencional aplicadas no solo franco-arenoso e apenas na dose 3, no solo argiloso. O efeito de dose para a variável K absorvido foi observado apenas nos tratamentos com KCl convencional e os dados foram ajustados pela função linear para ambos os solos (Figura 15).

Como a MS produzida no solo franco-arenoso não diferiu entre as três doses de KCl, poder-se-ia inferir que com a primeira dose atingiu-se o nível de suficiência de K ou que nas doses maiores houve lixiviação de potássio igualando o teor de K disponível para as plantas nas três doses. No entanto, os teores de K no tecido foram de 0,9 %, 1,7 % e 1,9 %, respectivamente para as doses 1, 2 e 3 (Anexo I). Valores maiores de K absorvido nas doses mais elevadas indicam que esse nutriente não foi limitante para a produção de massa seca. Esses resultados são semelhantes aos verificados por Kaminski et al. (2007). Em estudo com plantas cultivadas (aveia, soja, trigo, milho e feijão de porco) em um Argissolo de textura franco-arenosa, os teores de K na matéria seca foram sempre mais altos nas maiores doses de K, independente do teor original no solo, sem necessariamente ter ocorrido aumento de produção de MS.



(a)



(b)

Figura 15. K total absorvido por plantas de milho cultivadas nos solos (a) PVA franco-arenoso e (b) NVd argiloso, que receberam fertilizante KCl convencional ou revestido. Médias com barras do erro padrão; reta de ajuste por função linear. (*) significativo a 5%.

As plantas podem acionar mais de um mecanismo de absorção de K em condições de maior disponibilidade, absorvendo quantidades acima de sua necessidade fisiológica. Esse acúmulo de K na massa seca de alguns órgãos ve-

getais, exceto grãos, foi definido por Marschner (1995) como consumo de luxo. No entanto, a adição excessiva de K pode afetar a absorção de Ca e Mg pelas plantas causando um desequilíbrio nutricional com reflexos na produção de MS das plantas (Barber, 1995).

Outro fator limitante às altas doses de fertilizantes é a sua salinidade. A maior dose de K_2O recomendada para aplicação na linha de semeadura é de 80 kg ha^{-1} (CQFS - RS/SC, 2004). As doses 2 e 3 utilizadas no estudo representam, em condições de campo, o equivalente a 88 e 132 kg ha^{-1} de K_2O , respectivamente. Doses essas compatíveis com a recomendação de adubação, embora o fertilizante tenha sido incorporado no solo e não em linha, esse limite foi considerado tendo em vista a área limitada da superfície do vaso e a conseqüente proximidade das sementes com os fertilizantes. A germinação observada foi de 86 %, das quatro sementes aplicadas pelo menos três germinaram em todos os tratamentos. A irrigação efetuada após a aplicação do fertilizante e antes da semeadura pode ter evitado o efeito salino da adubação sobre a germinação e o crescimento inicial das plantas. O equilíbrio dos nutrientes e a salinidade dos fertilizantes são aspectos adicionais de interesse para o desenvolvimento de tecnologia de liberação controlada.

Embora a liberação imediata do fertilizante KCl convencional possa resultar em perdas por lixiviação no solo franco-arenoso, os resultados significativamente maiores de produção de MS e absorção de K pelas plantas evidencia a necessidade do nutriente disponível no período inicial de desenvolvimento do milho. Este fato foi constatado por Barber (1995) ao afirmar que o período de máximo influxo de nutrientes pelas raízes do milho ocorre nos primeiros 20 dias do ciclo da planta. Logo, os fertilizantes revestidos não devem ser empregados como a única fonte nutricional em solos de textura franco-arenosa com baixos teores de nutrientes e para culturas de ciclo curto, pois a deficiência na fase inicial pode comprometer a produtividade; ou então deve ser tal a taxa de liberação que permita suprir uma quantidade suficiente para atender a demanda nas primeiras semanas de desenvolvimento da cultura.

O fertilizante revestido na dose 3 promoveu a produção de MS equivalente ao KCl convencional nessa mesma dose no solo franco-arenoso. Consi-

derando que não houve diferença de produção de MS entre as doses de KCl convencional, como mencionado anteriormente, foi realizado um teste estatístico complementar (Tukey a 5 %) para comparação múltipla das médias (produto x dose). Não houve diferença significativa entre a média da dose 3 (54,8 mg K dm⁻³ solo) do fertilizante revestido e a dose 1 (18,3 mg K dm⁻³ solo) do fertilizante KCl convencional para as variáveis produção de MS ($p = 0,35$) e K absorvido ($p = 0,65$). Logo, pode-se inferir que a liberação de K do KCl revestido na dose 3 foi cerca de 30 %.

Segundo Silva et al. (1991), a disponibilidade de K no solo pode ser medida pelo crescimento de plantas e/ou pela quantidade de K absorvido e para Ladha et al. (2005), a eficiência da adubação pode ser calculada pela fórmula da recuperação de nutrientes: $RN = (N \text{ absorvido tratamento} - N \text{ absorvido testemunha}) / (N \text{ aplicado})$; em que R é recuperação e N é nutriente. Os resultados da aplicação dessa fórmula estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. K recuperado por plantas de milho cultivadas em vaso em dois tipos de solo, com doses de fertilizante KCl convencional ou revestido

Dose de K	----- PVA franco-arenoso -----		----- NVd argiloso -----	
	KCl conv.	KCl revest.	KCl conv.	KCl revest.
	----- % -----			
D0 ⁽¹⁾	23	23	26	26
D1	59	11	44	27
D2	61	8	41	24
D3	45	12	42	10

⁽¹⁾Testemunha comum às fontes.

No solo argiloso os percentuais de recuperação de K pelas plantas tratadas com KCl convencional são semelhantes ao valor de 45 % observados por Ladha et al. (2005) para a recuperação de nitrogênio proveniente da ureia na cultura do milho. Os resultados decrescentes calculados para as doses de K do fertilizante revestido podem ser explicados pela ausência do efeito da dose aplicada desse produto sobre a absorção de K pelas plantas, logo nas maiores doses há menor absorção relativa do nutriente.

No solo franco-arenoso, a queda na recuperação do KCl convencional na dose 3 pode ser devida a limitada produção de MS. Embora a produção de

MS não tenha diferido entre os três tratamentos, houve incremento no teor de K foliar, mas não na mesma proporção das doses de K aplicadas. A recuperação de apenas 11 % de K proveniente do KCl revestido na dose 3 é um contraponto à inferência anterior de que, com base na produção de MS, esse tratamento poderia ter liberado cerca de 30 % do nutriente. Tal suposição não pode ser confirmada com os dados disponíveis. A efetiva liberação do produto só poderia ser determinada pela quantificação complementar do teor e da massa de raiz, teor de K no solo após o tratamento e/ou a recuperação do produto para análise do nutriente residual.

A comparação dos percentuais de RN dos produtos entre os dois tipos de solo revela que a maior recuperação de K proveniente do KCl convencional foi observada no solo franco-arenoso, enquanto que o melhor desempenho do fertilizante KCl revestido se deu no solo argiloso. Esse fato se deve em parte ao teor inicial do nutriente no solo e a influência da textura sobre o fluxo de massa da água. O solo franco arenoso disponibilizou apenas o equivalente a 7 kg ha⁻¹ de K para absorção pelas plantas e o restante foi suprido pelos fertilizantes. O KCl convencional, prontamente disponível, atendeu a demanda, desde a primeira dose, mas também foi perdido em maior intensidade, devido ao maior fluxo de água desse solo. Por outro lado, o solo argiloso forneceu o equivalente a 54 kg ha⁻¹ de K, suficientes para atender a demanda imediata das plantas, e propiciou condições de maior umidade para a continuidade da difusão do nutriente do interior do fertilizante revestido para a solução do solo e dessa forma aumentou sua parcela de contribuição para a nutrição das plantas.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem concluir que:

A tecnologia de revestimento dos grãos do fertilizante mineral KCl com enxofre e polímeros orgânicos conferiu a característica de liberação gradativa de K para o solo com longevidade estimada em 315 dias (tempo necessário para liberar 75% do nutriente na temperatura constante de 25 °C).

A proteção física do revestimento e a disponibilização gradativa do nutriente para a solução do solo evitaram a perda de K por lixiviação no solo de textura franco-arenosa quando submetido ao excesso hídrico.

O fertilizante potássico revestido testado neste trabalho, nas doses recomendadas para solos com baixos teores de potássio, não atende à demanda de K da fase inicial da cultura do milho e pode comprometer o rendimento final. Seu uso nessas condições deve ser combinado com outras fontes de disponibilidade imediata para o mesmo nutriente, ou em sobredosagem de pelo menos 165 % da recomendação. Salvo avaliação econômica, esse produto pode ser uma alternativa tecnicamente viável em condições de solo com níveis suficientes ou altos de K.

Considerações finais

Embora a liberação do nutriente para o solo tenha se dado se forma gradativa, a tecnologia de revestimento de um fertilizante mineral não pode ser nominada como “liberação lenta ou controlada”, pois no Brasil não há normas que estabeleçam essas características, bem como metodologias oficiais para aferi-las.

Os produtos de eficiência aprimorada ainda possuem utilização limitada. Para ampliar seu mercado deverão superar alguns desafios, nominados por Blaylock (2007): reduzir o preço; comprovar a eficiência agrônômica para os demais nutrientes P e K; conscientizar a sociedade sobre sua importância am-

biental; requerer incentivo de programas governamentais e, finalmente, convencer o produtor rural de que é possível economizar tempo, mão de obra e equipamentos com o uso de fertilizantes de “liberação lenta ou controlada”.

O preço do produto testado, cotado em 27/03/2015, era de R\$ 3.000,00 por tonelada, cerca de U\$ 925,00 na época. O fertilizante KCl convencional era R\$ 1.200,00 t⁻¹. Considerando os teores de potássio, 51 % e 60 % para o revestido e o convencional, respectivamente, o custo por ponto de K seria três vezes maior no produto revestido.

REFERÊNCIAS

ADAMS, C.; FRANTZ, J.; BUGBEE, B. Macro- and micronutrient-release characteristics of three polymer-coated fertilizers: Theory and measurements. **Journal of plant nutrition and soil science**. Weinheim, v.176, p. 76-88, 2013.

ALFARO, M. A.; JARVIS, S. C.; GREGORY, P. J. Factors affecting potassium leaching in different soils. **Soil use and management**. Bognor Regis. v. 20, p. 181-189, 2004.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS (ANDA). **Participação da produção nacional no consumo de fertilizantes do Brasil em 2014**. Correspondência eletrônica recebida de Torvaldo Marzola Filho, 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS (ANDA); SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE MATÉRIA PRIMAS PARA FERTILIZANTES (SINPRIFERT). **Indústria nacional de matérias primas para fertilizantes**. Correspondência eletrônica recebida de Torvaldo Marzola Filho, 2015.

ASSOCIATION OF AMERICAN PLANT FOOD CONTROL OFFICIALS (AAPFCO). **Statements of uniform interpretation and policy**. 2015. Disponível em: <<http://www.aapfco.org/pdf/suip.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2015.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 414 p.

BENITES, V. M. et al. Potássio, cálcio e magnésio. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: IPNI – Brasil, 2010. p. 133-204.

BLAYLOCK, A. Novos fertilizantes nitrogenados: o futuro dos fertilizantes nitrogenados de liberação controlada. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, v. 120, p. 8-10, 2007.

BRASIL, Lei nº 6.894, de 16 de dezembro 1980. Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, e dá outras providências. **Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 dez. 1980**.

BRASIL, Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004. Aprova o Regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura, e dá outras providências. **Diário Oficial da União, Brasília, DF, de 15 jan. 2004**.

BRASIL, Instrução Normativa nº 5, de 23 de fevereiro de 2007. Aprova as definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes minerais, destinados à agricultura. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 1 mar. 2007a.

BRASIL. Instrução Normativa Nº 28, de 27 de julho de 2007. Aprova os Métodos Analíticos Oficiais para Fertilizantes Minerais, Orgânicos, Organo-Minerais e Corretivos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 31 jul. 2007b.

BRASIL, Instrução Normativa Nº 53 de 23 de outubro de 2013. Estabelece as definições, a classificação, o registro e renovação de registro de estabelecimento e produtos ... **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 out. 2013.

CANCELLIER, E. L. **Eficiência de ureia estabilizada e de liberação controlada no milho cultivado em solos de fertilidade construída**. 2013. 75 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

CANTARELLA, H. Uso de inibidor da uréase para aumentar a eficiência da ureia. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 117, p. 1-4, 2007.

CASARIN, V.; STIPP, S. R. Manejo 4C – Quatro medidas corretas que levam ao uso eficiente dos fertilizantes. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 142, p. 14-20, 2013.

COELHO, A. M., O Potássio na cultura do milho. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.) **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p. 613-658.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre: SBCS – Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

DU, C. W; ZHOU, J. M.; SHAVIV, A. Release Characteristics of Nutrients from Polymer-coated Compound Controlled Release Fertilizers. **Journal of polymers and the environment**. Lowell. v. 14, p. 223-230. 2006.

ERNANI, P.R. et al. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 393-402, 2007.

FARIA, L. A. et al. Hygroscopicity and ammonia volatilization losses from nitrogen sources in coated urea. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 942-948, 2014.

GOLDEN, B. R. et al. Evaluation of Polymer-Coated Urea for Direct-Seeded, Delayed-Flood Rice Production. **Soil Fertility & Plant Nutrition**, Madison, v. 73, n. 2, p. 375-383, 2009.

GOLDEN, B. et al. Nitrogen release from environmentally smart nitrogen fertilizer as influenced by soil series, temperature, moisture and incubation method.

Communication in Soil Science and Plant Analysis, Philadelphia, n. 42, p. 1809-1824, 2011.

INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION (IFA). **Review of analytical methods for slow- and controlled-release fertilizers**. 2014. Disponível em: <http://www.fertilizer.org/En/Knowledge_Resources/Library/IFA_Selection_Fertilizer_Production.aspx>. Acesso em: 20 ago. 2015.

INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION (IFA). **Fertilizer Outlook 2015-2019**. 2015. Disponível em: <<http://www.fertilizer.org/ItemDetail?iProductCode=9920Pdf&Category=ECO&WebsiteKey=411e9724-4bda-422f-abfc-8152ed74f306>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

ISO/TC 134. Technical Committee for fertilizers and soil conditioners. ISO/DIS 18644. **Controlled release fertilizer, general requirements**. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:63125:en>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

KAMINSKI, J. et al. Depleção de formas de potássio do solo afetada por cultivos sucessivos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, n. 31, p. 1003-1010, 2007.

LADHA, J. K. et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 87, n. 5, p. 85-156, 2005.

LIANG, R.; LIU, M.; WU, L. Controlled release NPK compound fertilizer with the function of water retention. **Reactive & Functional Polymers**, Meguro-Ku, n. 67, p. 769-779. 2007.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. Campinas: SBCS, 1996. 83p.

LUBKOWSKI, K.; GRZMIL, B. Controlled release fertilizers. **Polish Journal of Chemical Technology**, Szczecin, v. 9, n. 4, p. 81-84. 2007.

MAJEED, Z. et al. A comprehensive review on biodegradable polymers and their blends used in controlled-release fertilizer processes. **Reviews in Chemical Engineering**, Berlim, v. 31, n. 1, p. 69-95, 2015.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. Londres: Academic Press, 1995. 889 p.

MEDINA, L. C. et al. Evaluation of a soil incubation method to characterize nitrogen release patterns of slow- and controlled-release fertilizers. **Journal of AOAC International**, Rockville, v. 97, n. 3, p. 643-660, 2014.

MEURER, E. J. Potássio. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2006. p. 281-298.

MIELNICKZUK, J. Manejo conservacionista da adubação potássica. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2005. p. 165-178.

MOTA, E. P. **Fertilizantes nitrogenados de liberação gradual: longevidade e volatilização em ambiente controlado**. 2013. 104 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

NASCIMENTO, C. A. C. do et al. Ammonia volatilization from coated urea forms. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 1057-1063, 2013.

OOSTERHUIS, D. M.; Howard, D. D. Evaluation of slow-release nitrogen and potassium fertilizers for cotton production. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 3, p 68-73, 2008.

PERECIN, D.; CARGNELUTTI FILHO, A. Efeitos por comparações e por experimento em interações de experimentos fatoriais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 68-72, 2008.

PROCHNOW, L. I. IPNI - Brasil, nova missão, novos tempos. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 120, p. 1, 2007.

RAIJ, B. VAN. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 1991. 343p.

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.

SANZONOWICZ, C. & MIELNICKZUK, J. Distribuição do potássio no perfil de um solo, influenciado pela planta, fontes e métodos de aplicação de adubos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 9, p. 45-50, 1985.

SHAVIV, A. Advances in Controlled Release of Fertilizers. **Advances in Agronomy**, Newark, n. 71, p. 1-49, 2000.

SHAVIV, A.; RABAN, S.; ZAIDEL, E. Modeling Controlled Nutrient Release from a Population of Polymer Coated Fertilizers: Statically Based Model for Diffusion Release. **Environmental Science & Technology**, Berkeley, n. 37, p. 2257-2261, 2003.

SHAVIV, A. Controlled release fertilizers. In: **IFA INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED EFFICIENCY FERTILIZERS**, Frankfurt: 2005. Disponível em:
<<http://www.fertilizer.org/ItemDetail?iProductCode=7967Pdf&Category=AGRI&WebsiteKey=411e9724-4bda-422f-abfc-8152ed74f306>>. Acesso em 20 ago. 2015.

SILVA, F. L. I. M.; MAGALHÃES, J. R.; BARBER, S. A. Absorção de potássio por milho-doce, predita por simulação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 3, p. 431-438, 1991.

SOARES, J. R. et al. Enhanced-efficiency fertilizers in nitrous oxide emissions from urea applied to sugarcane. **Journal of Environmental Quality**, Madison, n. 44, p. 423-430, 2015.

SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. 2 ed. San Diego: Academic Press, 2003. 352 p.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2 ed. New York: Oxford Univ. Press, 2008. 329 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 719 p.

TEDESCO, M.J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS. 1995. 174p. (Boletim técnico, 5).

TRENKEL, M.E. **Slow and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010. Disponível em: <<http://www.fertilizer.org/ItemDetail?iProductCode=9137Hardcopy&Category=A&GRI&WebsiteKey=411e9724-4bda-422f-abfc-8152ed74f306>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

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. 2297-2395, 2008.

WU, L.; LIU, M. Slow-Release Potassium Silicate Fertilizer with the Function of Superabsorbent and Water Retention. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Pennsylvania, v. 46, p. 6494-6500, 2007.

WU, L.; LIU, M. Preparation and properties of chitosan-coated NPK compound fertilizer with controlled-release and water-retention. **Carbohydrate Polymers**, Worcester, v. 72, p. 240–247. 2008.

ZAVASCHI, E. et al. Ammonia volatilization and yield components after application of polymer-coated urea to maize. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, n. 38, p. 1200-1206, 2014.

ANEXOS

Anexo 1. Teor foliar e massa total de nutriente absorvido pelas plantas de milho cultivadas em vaso em casa-de-vegetação. UFRGS, Porto Alegre, RS, 2015

Solo e Produto	Dose*	K (%)	K (mg)	Ca (%)	Ca (mg)	Mg (%)	Mg (mg)	S (%)	S (mg)	
Argiloso	0	1,5	111	0,66	49	0,68	50	0,19	14	
	1	1,7	136	0,59	48	0,57	46	0,18	14	
	2	1,7	155	0,60	54	0,63	56	0,17	15	
KCl Revestido	3	1,4	130	0,51	45	0,55	48	0,15	13	
	1	1,8	152	0,52	44	0,52	45	0,16	13	
	2	1,9	187	0,57	56	0,52	52	0,17	17	
KCl convencional	3	2,2	227	0,55	58	0,50	53	0,18	19	
	Franco-arenoso	0	0,5	15	0,74	19	1,0	28	0,25	7
		1	0,7	24	0,69	23	0,96	32	0,26	9
2		0,7	30	0,64	26	0,82	33	0,22	9	
KCl Revestido	3	1,1	73	0,60	39	0,78	49	0,22	14	
	1	0,9	69	0,61	45	0,85	64	0,23	18	
	2	1,7	126	0,59	45	0,73	55	0,23	18	
KCl convencional	3	1,9	137	0,60	43	0,70	51	0,21	15	

*Doses de K em mg vaso⁻¹: 1 = 91,3; 2 = 182,6; 3 = 273,9.

Anexo 2. Massa total de nutrientes perdidos por lixiviação de vasos com dois tipos de solo e doses de potássio em casa-de-vegetação. UFRGS, Porto Alegre, RS, 2015

Solo e Produto	Dose*	Ca	S	Mg
----- mg vaso ⁻¹ -----				
Argiloso	0	358	66	115
	1	314	52	103
KCl Revestido	2	281	59	91
	3	253	46	82
	1	243	46	80
KCl Convencional	2	230	39	74
	3	272	54	86
Fraco-arenoso	0	473	225	147
	1	404	184	134
KCl Revestido	2	393	201	123
	3	360	184	111
	1	275	145	85
KCl Convencional	2	325	165	101
	3	296	144	95

*Doses de K em mg vaso⁻¹: 1 = 91,3; 2 = 182,6; 3 = 273,9.