



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS TRINDADE – CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO ENGENHARIA DE MATERIAIS

Jean Michel Zama da Silva

**Desenvolvimento e estudo da eficiência de fertilizantes de liberação controlada
à base de KCl por revestimento de CaSO₄**

Florianópolis

2024

Jean Michel Zama da Silva

**Desenvolvimento e estudo da eficiência de fertilizantes de liberação controlada
à base de KCl por revestimento de CaSO₄**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de graduação em engenharia de materiais do Centro Tecnológico - Campus Trindade da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de materiais.

Orientador: Prof. Dr.Ing. Márcio Celso Fredel

Florianópolis

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva, Jean Michel Zama da

Desenvolvimento e estudo da eficiência de fertilizantes de liberação controlada à base de KCl por revestimento de CaSO₄ / Jean Michel Zama da Silva ; orientador, Márcio Celso Fredel, 2024.

45 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia de Materiais,
Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Fertilizantes de liberação controlada. 3. Fertilizante revestido com CaSO₄. 4. Fertilizante de KCl com gesso agrícola. 5. estudo da eficiência do CaSO₄ como retardante de liberação do KCl .
I. Fredel, Márcio Celso. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. III. Título.

Jean Michel Zama da Silva

**Desenvolvimento e estudo da eficiência de fertilizantes de liberação controlada
à base de KCl por revestimento de CaSO₄**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de engenheiro de materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso de engenharia de materiais.

Local Florianópolis, 02 de setembro de 2024.

Prof. Dr.-Ing. Celso Peres Fernandes
Coordenação do Curso

Banca examinadora:

Prof. Dr.-Ing. Márcio Celso Fredel
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Eng. Douglas Fabris
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eng. João Batista Rodrigues Neto
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2024.

Este trabalho é dedicado aos cafeicultores,
que me mantiveram acordado durante as
etapas mais demoradas deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que no meio de um universo caótico onde a entropia só aumenta, possibilitou todas as coincidências necessárias para a materialização deste sonho.

Agradeço à universidade Federal de Santa Catarina e à equipe do departamento de engenharia mecânica, que foram uma grande fonte de aprendizado e a porta para a obtenção deste título.

Agradeço ao Prof. Dr.-Ing. Márcio Celso Fredel, que me orientou com maestria na elaboração deste trabalho, sempre disposto a ouvir e opinar sobre as mais absurdas teorias possíveis.

Agradeço ao Dr. Eng. Douglas Fabris, por com compartilhar seus conhecimentos e auxiliar nas nas simulações computacionais usadas neste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Eng. João Batista Rodrigues Neto, por fazer parte e acompanhar o desenvolvimento deste trabalho sempre com muito empenho e atenção.

Agradeço à SulGesso Indústria e Comércio SA, e ao Eng. Matheus E. de Mattos por fornecer os insumos para a realização dos ensaios e se mostrarem sempre dispostos a ajudar.

Agradeço à minha família e amigos, que foram os construtores da minha personalidade, sempre com exemplos de honestidade, determinação e sabedoria.

“A agricultura é a arte de saber esperar”.

(Bacchelli, 2013)

RESUMO

A populacional mundial, conforme proposto pela teoria Malthusiana, cresce conforme uma progressão geométrica enquanto a disponibilidade dos alimentos aumenta conforme uma progressão aritmética. No entanto, a evolução tecnológica na agricultura, especialmente com a Revolução Verde, tem permitido um aumento significativo na produção de alimentos. Entre as tecnologias empregadas, os fertilizantes desempenham um papel crucial. O KCl, apesar de ser altamente solúvel e frequentemente lixiviado, é amplamente utilizado na agricultura, com aproximadamente 40 milhões de toneladas comercializadas anualmente.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar a eficiência de fertilizantes de liberação controlada confeccionados a partir de um núcleo de cloreto de potássio (KCl) revestido com gesso agrícola, um minério a base de sulfato de cálcio (CaSO₄). O revestimento dificultará o acesso da água ao fertilizante, minimizando os problemas associados ao excesso do fertilizante no solo. A metodologia inclui a calcinação, elaboração dos grânulos, aplicação do revestimento, testes de dissolução e eficiência em solo, além de simulações computacionais. Os resultados indicam que os grânulos revestidos apresentam uma dissolução mais controlada e eficiente, contribuindo para uma aplicação mais sustentável do fertilizante.

Palavras-chave: fertilizante de liberação controlada; cloreto de potássio; sulfato de cálcio; gesso agrícola; agricultura sustentável

ABSTRACT

The world population, as proposed by Malthusian theory, grows in a geometric progression while food availability increases in an arithmetic progression. However, technological advancements in agriculture, particularly through the Green Revolution, have significantly boosted food production. Among the technologies employed, fertilizers play a crucial role. Despite being highly soluble and often leached, potassium chloride (KCl) is widely used in agriculture, with approximately 40 million tons traded annually.

This study aims to develop and evaluate the efficiency of controlled-release fertilizers made from a core of potassium chloride (KCl) coated with agricultural gypsum—a mineral based on calcium sulfate (CaSO_4). The coating restricts water access to the fertilizer, minimizing issues associated with excessive fertilizer in the soil. The methodology involves calcination, granule formulation, coating application, dissolution tests, soil efficiency assessments and computational simulations. Results indicate that the coated granules exhibit more controlled and efficient dissolution, contributing to a more sustainable fertilizer application.

Keywords: controlled-release fertilizer; potassium chloride; calcium sulfate; agricultural gypsum; sustainable agriculture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Materiais recebidos para estudo	24
Figura 2 – Calcinação do minério de gesso	25
Figura 3 – Comparação entre o gesso agrícola e de construção	26
Figura 4 – Confecção dos grânulos de fertilizante	27
Figura 5 – Aplicação do revestimento com gesso em pó	28
Figura 6 – Comparação entre as formas de aplicação do revestimento	28
Figura 7 – Comparação entre grânulo com e sem revestimento.....	29
Figura 8 – Esquema do equipamento usado nos ensaios.....	30
Figura 9 – Equipamento utilizado nos ensaios	31
Figura 10 – Correlação entre concentração e resistividade dos fertilizantes estudados	32
Figura 11 – Exemplo de como os dados são registrados no equipamento.	33
Figura 12 – Diluição do grânulo em proporção 2:0,7:0,4.....	35
Figura 13 – Diluição do grânulo em proporção 2:1:1.....	35
Figura 14 – Diluição do grânulo em proporção 2:1:2.....	36
Figura 15 – Diluição do grânulo com uma camada de revestimento.....	37
Figura 16 – Diluição do grânulo com duas camadas de revestimento	37
Figura 17 – Fertilizantes testados em solo	38
Figura 18 – Comparação entre o volume diluído e a quantidade de revestimentos.....	39
Figura 19 – Simulação computacional, ilustrando os gradientes de concentração ao longo do fertilizante.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Índice salino de fertilizantes potássicos.....	23
Tabela 2 – Resistividade típica de materiais que compõem o solo	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas técnicas
C	Concentração
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CE	Condutividade elétrica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FLC	Fertilizante de liberação controlada
g	Gramas
h	Horas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Min.	Minutos
RPM	Rotações por minuto
s	Segundo
V	Volume

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω	Caractere ômega, do alfabeto grego. Unidade de resistência elétrica em Ohm
$\Omega.cm$	Unidade de resistividade elétrica, em Ohm centímetro.
ρ	Caractere rho, do alfabeto grego, indica resistividade elétrica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO CONTROLADA	18
2.2	GESSO AGRÍCOLA.....	19
2.2.1	Problemas associados ao uso	20
2.3	CLORETO DE POTÁSSIO	20
2.3.1	Problemas associados ao uso	21
2.4	ÍNDICE SALINO EM FERTILIZANTES.....	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	CALCINAÇÃO DO GESSO AGRÍCOLA	24
3.2	ELABORAÇÃO DOS GRANULOS DE FERTILIZANTE.....	26
3.3	APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO	27
3.4	METODOLOGIA	29
3.4.1	Equipamento utilizado para diluição do fertilizante	30
3.4.1.1	<i>Interpretação dos dados do equipamento</i>	32
4	RESULTADOS	34
4.1	DISSOLUÇÃO DO FERTILIZANTE	34
4.1.1	Dissolução dos grânulos sem revestimento	34
4.1.2	Dissolução dos grânulos revestidos	36
4.2	TESTAGEM DO FERTILIZANTE EM SOLO.....	38
4.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	40
5	CONCLUSÃO	43
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A população mundial cresce em forma de uma progressão geométrica, enquanto os alimentos disponíveis crescem em forma de uma progressão aritmética, foi o que propôs um economista e demógrafo inglês, responsável pela teoria Malthusiana (MALTHUS, 1798). Neste ano a população mundial era estimada em 1 bilhão de habitantes (MADDISON, 2010), hoje ultrapassa 8 bilhões e a falta de alimentos já deveria ser uma realidade segundo esta teoria (NAÇÕES UNIDAS, 2022).

No entanto, atualmente os alimentos por habitante são ainda mais abundantes do que no século XVIII, onde já haviam relatos históricos de escassez de alimentos (FAO, 2021). Isso se deve à evolução na agricultura, com o emprego de técnicas capazes de otimizar a produção. A chamada revolução verde, trouxe avanços significativos na produção de alimentos, graças a inclusão de tecnologia nas lavouras como o uso de fertilizantes industriais, herbicidas, agrotóxicos e sementes selecionadas ou as geneticamente modificadas. Isto trouxe um grande ganho na produção, mas também acabou por trazer uma dependência dos países subdesenvolvidos por essas tecnologias na maioria das vezes oriundas dos países desenvolvidos (BRASIL ESCOLA, 2024).

A inclusão dos fertilizantes na agronomia foi um dos passos mais significativos para esta evolução. A produção agrícola sempre enfrentou desafios relacionados à degradação do solo, no passado era muito comum fazer revezamento de áreas de plantio, onde por alguns meses, as vezes anos, a terra era abandonada até que a natureza recuperasse naturalmente a capacidade produtiva do solo. Atualmente este processo pode ser eliminado em vários cultivos graças à possibilidade de condicionamento artificial do solo (SILVA, 2023).

Desta forma, o desenvolvimento nacional de um fertilizante eficiente não só aumentaria a produção de alimentos como também reduziria a dependência da importação de outros países, o que deixa toda a cadeia produtiva vulnerável a embargos econômicos, oscilações cambiais, dentre outros problemas. Atualmente há dois tipos de fertilizante no mercado, os convencionais e os fertilizantes especiais (RESENDE, 2022).

Os fertilizantes convencionais possuem alguns nutrientes que a planta necessita, podem ter origem mineral, orgânica ou híbrida (organominerais). Já os fertilizantes especiais possuem alguma característica adicional que os diferencia dos

fertilizantes tradicionais, como por exemplo a presença de micro-organismos simbióticos, aditivos com finalidades específicas ou uma liberação lenta e gradual do fertilizante (YARA BRASIL, 2023).

Os fertilizantes de liberação lenta e gradual serão o foco deste trabalho, mais especificamente o fertilizante cloreto de potássio (KCl), que é um sal altamente solúvel e por consequência se difunde na água do solo com muita facilidade sendo na maioria das vezes lixiviado e chegando até os rios e lençóis freáticos sem ser assimilado pelo cultivo (MACHADO, 2022).

Se utilizado em excesso ele pode eliminar a plantação, além de ser altamente prejudicial à vegetação circundante. Apesar dos riscos, é o terceiro fertilizante mais usado na agricultura, sendo comercializado aproximadamente 40 milhões de toneladas por ano a nível mundial (COELHO, 2023).

Ao retardar a liberação do KCl, os problemas relacionados ao seu uso também seriam minimizados. Foi então proposto o uso de um revestimento à base de sulfato de cálcio (CaSO_4), que também é um tipo de fertilizante usado na agricultura, conhecido como gesso agrícola. A partir disto tem-se uma associação de dois fertilizantes convencionais dando origem a um fertilizante especial, de liberação controlada (MALISZEWSKI, 2021).

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um lote de testes deste fertilizante de liberação controlada e a partir dele realizar ensaios laboratoriais e em solo a fim de avaliar sua taxa de liberação e correlacionar com os resultados esperados em campo. Os ensaios foram baseados no monitoramento em tempo real da salinidade, uma vez que tanto o KCl quanto o CaSO_4 são sais e quando liberados, na presença de água, impactam na resistividade do meio. A partir dos dados obtidos foi realizada uma simulação computacional usando o software comsol multiphysics® para facilitar a visualização dos gradientes de concentração ao longo do fertilizante. Por fim, uma testagem em solo foi realizada, onde foi medida a perda de massa do fertilizante ao longo do tempo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO CONTROLADA

Os fertilizantes de liberação controlada (FLC) são uma inovação importante na agricultura moderna, projetados para liberar nutrientes de forma gradual e controlada ao longo do tempo (TRINDADE, 2020). Isso contrasta com os fertilizantes convencionais, que liberam nutrientes rapidamente, muitas vezes resultando em perdas significativas devido à lixiviação e volatilização (SILVA, 2024).

Os FLCs oferecem várias vantagens. Primeiramente, melhoram a eficiência do uso de nutrientes, fornecendo-os de acordo com as necessidades das plantas ao longo de seu ciclo de crescimento (RUIZ, 2017). Além disso, ao minimizar a lixiviação de nutrientes para o solo e corpos d'água, ajudam a reduzir a poluição ambiental (CAMPO E NEGÓCIOS, 2023). Com a liberação controlada, há também uma redução na frequência de aplicação de fertilizantes, economizando tempo e custos para os agricultores (RUIZ, 2017).

Existem diferentes tipos de fertilizantes de liberação controlada. Os encapsulados são fertilizantes revestidos com materiais orgânicos ou inorgânicos que controlam a taxa de liberação dos nutrientes (TRINDADE, 2020). Os de liberação lenta possuem baixa solubilidade, liberando nutrientes de forma gradual (SILVA, 2024). Já os estabilizados contêm inibidores que retardam a conversão de nutrientes em formas que podem ser perdidas para o ambiente (RUIZ, 2017).

Os FLCs são amplamente utilizados em diversas culturas, incluindo grãos, hortaliças e frutíferas (CAMPO E NEGÓCIOS, 2023). Eles são especialmente úteis em sistemas de produção intensiva, onde a eficiência no uso de nutrientes é crucial para a sustentabilidade econômica e ambiental (RUIZ, 2017).

Eles podem ser entendidos como fertilizantes que possuem ritmo, padrão e duração da liberação do nutriente bem conhecidos e controláveis, enquanto os fertilizantes de liberação lenta possuem um ritmo de liberação mais lento do que o normal, porém, com taxa, padrão e duração de liberação não muito controlados (AGROLINK, 2024).

A tecnologia de liberação controlada possibilita ainda uma economia operacional, evitando entradas adicionais para cobertura com fertilizantes, além do

menor custo pois diminui a compactação do solo e, em alguns casos, o amassamento da cultura que pode ser uma porta de entrada para doenças" (FORTIFOL, 2020).

Os FLCs também são vantajosos em termos de sustentabilidade, pois reduzem a necessidade de grandes quantidades de fertilizantes, diminuindo assim o impacto ambiental e promovendo uma agricultura mais sustentável (HANS, 2024). Além disso, a liberação controlada dos nutrientes pode ser ajustada para coincidir com os estágios específicos de crescimento das plantas, como floração e frutificação, garantindo que as plantas recebam os nutrientes necessários exatamente quando precisam (HANS, 2024).

A pesquisa e desenvolvimento de novos materiais para revestimento de FLCs estão em constante evolução. Materiais biodegradáveis e de origem natural estão sendo explorados para substituir os encapsulamentos de polímeros sintéticos, reduzindo ainda mais o impacto ambiental desses fertilizantes. Esses novos materiais não apenas controlam a liberação de nutrientes, mas também se decompõem de forma segura no solo, contribuindo para a saúde do ecossistema (HANS, 2024).

Além disso, a integração de tecnologias de sensoriamento remoto e agricultura de precisão com o uso de FLCs está permitindo uma aplicação mais precisa e eficiente desses fertilizantes, maximizando os benefícios econômicos e ambientais" (AGROLINK, 2024).

2.2 GESSO AGRÍCOLA

O gesso agrícola é um fertilizante e condicionador de solo composto principalmente por sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Ele é utilizado para fornecer cálcio e enxofre às plantas, além de melhorar a estrutura do solo, especialmente nas camadas mais profundas (AGROADVANCE, 2024).

Um grande problema na agricultura é a acidez no solo, cerca de 70% do território nacional está em locais de Latossolos, Argissolos e Neossolos que tem tendência a apresentarem acidez. (EMBRAPA, 2011). Em solos com pH menor que 5,6 o alumínio presente nos minerais se solubiliza liberando íons AL^{3+} , fitotóxico, neste meio também acontece uma limitação na disponibilidade de nutrientes como cálcio, magnésio, potássio. Geralmente a correção de acidez é feita com uso de calcário, sendo lançado diretamente na superfície do solo. No entanto, sua solubilidade é tão

baixa que não chega às camadas mais profundas do solo, onde ficam as raízes (MORAES et al, 2022).

O gesso agrícola é mais solúvel que o calcário e consegue penetrar nas camadas subsuperficiais do solo, ao nível das raízes, mas ele não possui as mesmas características alcalinizantes. Entretanto, a liberação de cálcio que ele promove nas camadas mais profundas do solo é capaz de interagir com os íons Al^{3+} reduzindo significativamente sua toxicidade e melhorando a produtividade de um solo antes considerado infértil (Brasil et al, 2020).

2.2.1 Problemas associados ao uso

Apesar dos benefícios, o uso do gesso agrícola pode apresentar alguns problemas. Em solos com baixa capacidade de troca catiônica, a aplicação excessiva de gesso pode levar à lixiviação de nutrientes essenciais, como magnésio e potássio, para camadas mais profundas do solo, tornando-os menos disponíveis para as plantas (EMBRAPA, 2020). Além disso, a aplicação inadequada pode resultar em um desequilíbrio de nutrientes, afetando negativamente o crescimento das culturas (AGROMOVE, 2020).

Outro problema é que, em solos arenosos com baixa fertilidade e reduzidos teores de matéria orgânica, a aplicação de gesso acima de 5 t/ha pode causar efeitos danosos para o desenvolvimento das culturas, devido à remoção preferencial de magnésio e potássio da camada superficial do solo para camadas mais profundas, fora do alcance das raízes (EMBRAPA, 2020). Em alguns tipos de solos, esse efeito de lixiviação de cátions pode ocorrer com doses inferiores a 2 t/ha. Portanto, é crucial evitar a aplicação excessiva do produto para prevenir a lixiviação e garantir um manejo adequado do solo.

2.3 CLORETO DE POTÁSSIO

O cloreto de potássio é um sal hidrossolúvel usado em diversas áreas: na indústria alimentícia, como substituto do sal comum (cloreto de sódio) para produção de alimentos com teor reduzido de sódio. Na medicina, usado para tratamento da hipocalcemia (baixo teor de potássio no sangue). Na indústria de transformação para produção de sabão, tintas, baterias e outros produtos. Na agronomia é largamente

utilizado como fertilizante, fornecendo ao solo o potássio que está entre os três macro nutrientes com maior necessidade nutricional para as plantas em geral (SINERGIA CIENTÍFICA, 2023).

No entanto, o uso de fertilizantes à base de cloreto de potássio a longo prazo pode ser mais prejudicial do que benéfico para as plantações. Após uma análise de duzentas e onze publicações onde este fertilizante foi aplicado no solo e seus efeitos monitorados, Ellsworth et al. (2020) constataram que, em mais de 76% dos casos estudados, o KCl não trouxe um aumento estatisticamente significativo na produtividade das espécies analisadas. Além disso, trouxe prejuízos para o solo devido ao acúmulo de cloro.

2.3.1 Problemas associados ao uso

Boa parte dos problemas relacionados ao uso do KCl estão relacionados à liberação de cloro residual. O Cloro apesar de ser um elemento essencial para as plantas, é um micronutriente, absorvido em quantidade muito pequena por elas. Já o potássio, também presente na composição, é um macro nutriente consumido em grande quantidade pela vegetação, desta forma há uma sobra de cloro sendo mais comum haver excesso de cloro causando toxicidade, do que a falta dele. Seu excesso também pode restringir a absorção de outros nutrientes como o enxofre, nitrogênio e fósforo (AGROLINK, 2022).

Outra consequência do seu uso é a redução da atividade microbiana no solo, já que o cloro residual liberado pode ser tóxico para muitos microrganismos benéficos, que desempenham um papel crucial na decomposição da matéria orgânica e na ciclagem de nutrientes. A redução da atividade microbiana pode levar a uma diminuição na fertilidade do solo a longo prazo (Ellsworth et al., 2020).

Além disso, a aplicação excessiva de KCl pode levar à salinização do solo, especialmente em regiões com baixa precipitação ou irrigação inadequada. A salinização pode reduzir a capacidade do solo de reter água e nutrientes, afetando negativamente a produtividade das culturas. (SINERGIA CIENTÍFICA, 2023).

2.4 INDICE SALINO EM FERTILIZANTES

O índice salino de um fertilizante indica sua capacidade de aumentar a pressão osmótica do solo, o que pode afetar a absorção de água pelas plantas. Fertilizantes com alto índice salino podem causar “seca fisiológica”, onde a pressão osmótica do solo acaba impedindo a água de migrar para as raízes, prejudicando o crescimento da cultura.

No caso de uma plantação é comum o uso de vários fertilizantes em conjunto, cada um fornecendo um nutriente. Desta forma, caso haja uma combinação de vários fertilizantes de alto índice salino a chance de trazer prejuízos ambientais e à plantação aumentam.

O índice salino é definido como um percentual entre a salinidade do fertilizante analisado e a salinidade do nitrato de sódio (NaNO_3), adotado convencionalmente como referência. A salinidade é definida através da condutividade elétrica (CE) da solução, resultado da dissociação iônica dos sais em meio aquoso. O valor do índice salino pode ser calculado com o uso da equação 1, onde IS é o índice salino e CE a condutividade elétrica.

$$IS = \left(\frac{CE_{\text{amostra}}}{CE_{\text{NaNO}_3}} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Os valores de condutividade e resistividade elétrica têm relação inversa e podem ser convertidos facilmente a partir da equação 2, onde σ é condutividade e ρ a resistividade

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (\text{Equação 2})$$

A Tabela 1 traz uma comparação entre alguns valores de índice salino para os principais fertilizantes a base de potássio.

Tabela 1 – Índice salino de fertilizantes potássicos

Fertilizantes potássicos	% de K ₂ O	Índice salino	Por unidade de nutriente
Nitrato de sódio		100	
Nitrato de potássio	47	74	1,22
Cloreto de potássio	60	116	1,94
Sulfato de potássio	54	46	0,85
Sulfato de potássio e magnésio	22	43	1,97

Fonte: AGROLINK. Fertilizantes minerais potássicos. Disponível em:
https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/nutrientes/fertilizantes-minerais-potassicos_361446.html.

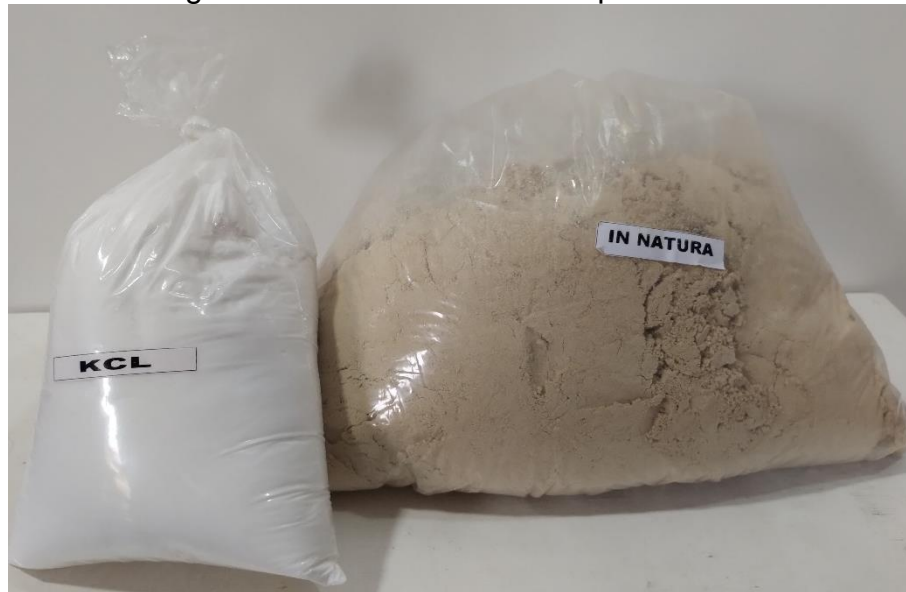
Acesso em: 11 ago. 2024.

Para reduzir o impacto do índice salino tem-se optado pelo uso de fertilizantes derivados de minerais de liberação mais lenta, como rochas finamente moídas ou fertilizantes de liberação controlada, que apesar manter o alto índice salino, liberam os sais de forma lenta sem picos de salinidade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram recebidas amostras dos fertilizantes para estudo, ilustradas na Figura 1. O fertilizante KCl comercialmente tem seu grau de pureza expresso em percentual (%) de K₂O, a amostra recebida tem teor informado 60% K₂O.

Figura 1 – Materiais recebidos para estudo



Fonte: do autor

Pode parecer estranho o fato de o fertilizante ter um teor maior de outra substância do que a substância que dá nome a ele, mas este é o padrão adotado comercialmente. Isso se deve ao fato de que nutricionalmente as plantas necessitam de muito mais potássio que cloro, desta forma o K_2O tem estequiometricamente maior teor de potássio (83%) em comparação com o KCl (52%), além de não deixar excesso de cloro no solo o que, como foi exposto, prejudica a plantação.

O gesso agrícola foi recebido na forma in natura, como costuma ser aplicado no solo. Como se trata de um minério não beneficiado pode conter resíduos de outros elementos além do $CaSO_4$.

3.1 CALCINAÇÃO DO GESSO AGRÍCOLA

O gesso agrícola vem sempre vem na forma de minério bruto in natura, pois na agricultura não é necessário que o gesso fique sólido e endureça após a hidratação, diferente do que acontece no setor da construção civil.

No entanto, para desenvolver o encapsulamento é necessário que o gesso forme uma superfície sólida em volta do fertilizante de KCl , para restringir sua liberação. Para isso foi necessário inicialmente calcinar este minério para que o gesso pudesse endurecer ao entrar em contato com a água. Uma vez que o minério já estava

hidratado, a adição de água não teria a capacidade de ligar quimicamente as moléculas já em equilíbrio.

O procedimento é simples e consiste em aquecer o minério a temperaturas próximas de 180°C até promover a desidratação da água constitucional. Após o procedimento, as moléculas ficam total (anidrida, em temperaturas maiores) ou parcialmente desidratadas ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$, para temperaturas menores) e ao adicionar água no material acontece a hidratação constitucional, onde essas moléculas ficam retidas na sua composição ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), deixando o material ligado quimicamente.

Durante a calcinação, o gesso dá sinais do estágio em que está no processo: inicialmente o gesso na forma de pó tem um escoamento bem limitado, formando grumos com muita facilidade.

Ao atingir temperaturas próximas de 150°C a desidratação começa a acontecer e vapor d'água é liberado de cada grão de pó, os afasta e por consequência o pó passa a escoar com muita facilidade se comportando de forma similar a um líquido. Nesta etapa também é possível ver borbulhamentos de vapor saindo do material.

Quando a água constitucional vai acabando, o pó passa a se comportar como um sólido novamente, mas agora como já há mais umidade significativa, pode ser peneirado com muita facilidade. Na Figura 2 está representada esta etapa, onde é possível o pó com uma umidade muito baixa e sem formação de grumos.

Figura 2 – Calcinação do minério de gesso



Fonte: do autor

A título de comparação, foram confeccionadas duas pastilhas de teste, sendo uma feita do gesso agrícola estudado e outra de um gesso comum de construção, que já vem de calcinado de fábrica. A resistência mecânica e aparência de ambas foi bastante similar, diferindo apenas na coloração mais escura por conta de impurezas na composição, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Comparação entre o gesso agrícola e de construção



Fonte: do autor

3.2 ELABORAÇÃO DOS GRANULOS DE FERTILIZANTE

Preparado o gesso, foram confeccionados os grânulos (pellets) de fertilizante para ensaio. Eles foram padronizados em moldes cilíndricos com 8,5mm de altura por 8,5mm de diâmetro.

Embora no interior do grânulo a matéria prima principal seja o KCl, foi adicionada uma pequena quantidade do gesso e água para dar solidez aos grânulos e impedir que esfarelassem com facilidade. A adição de gesso ao grânulo também restringe a liberação do KCl, uma vez que o gesso envolverá as partículas de KCl, dificultando seu contato com a água.

Foram confeccionados grânulos com diferentes combinações de KCl, gesso agrícola e água a fim de ver qual proporção teria o melhor resultado. As proporções

adotadas foram: 2:0,7:0,4 (KCl:gesso:água), 2:1:1 e 2:1:2, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 – Confeção dos grânulos de fertilizante



Fonte: do autor

A proporção 2:1:2 continha excesso de água e ao moldar os grânulos era possível ver líquido gotejando, levando consigo uma parte do KCl diluído. Já a proporção 2:0,7:0,4 tinha estequiometricamente água suficiente apenas para a hidratação do gesso e então não apresentou gotejamentos durante a moldagem. A proporção 2:1:1 foi uma combinação intermediária entre ambos, onde só havia gotejamentos se o molde fosse fortemente pressionado.

3.3 APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO

Para realizar a aplicação do revestimento de gesso haviam duas formas possíveis: por imersão do granulo em uma mistura de gesso hidratado, escorrendo o excedente. Ou molhar o grânulo e posteriormente jogá-lo sobre o gesso em pó para que o gesso absorva a água ficando retido na superfície úmida.

As duas formas de aplicação do revestimento foram testadas, mas optou-se por primeiro molhar rapidamente os grânulos, remover o excesso de água e então mergulhá-los no gesso em pó, conforme Figura 5. O procedimento deve ser rápido para evitar o início da dissolução dos sais na água.

Figura 5 – Aplicação do revestimento com gesso em pó



Fonte: do autor

Esta técnica foi adotada porque, sem aditivação, o tempo de trabalhabilidade do gesso é muito restrito, apresentando muita variação nas espessuras de camada, conforme visto na Figura 6, onde os pellets acima foram revestidos por imersão no gesso hidratado e abaixo por imersão no gesso em pó. Observa-se que os pellets imersos no pó tiveram uma repetitividade muito maior nos resultados.

Figura 6 – Comparação entre as formas de aplicação do revestimento



Fonte: do autor

Por imersão em gesso hidratado foi necessário usar proporções muito acima da estequiométrica para hidratação do gesso, o que tende a resultar em poros adicionais. Proporções abaixo de 1:2 (gesso:água) resultaram em uma consistência muito densa e pastosa, de difícil controle. Já proporções acima de 1:4 resultaram em revestimentos muito frágeis e misturas com princípio de segregação de fases.

Através da técnica adotada, a espessura do revestimento pode ser controlada através da quantidade de repetições no processo e também através do controle da quantidade de água presente na superfície do grânulo durante a imersão no pó, uma vez que um grânulo mais úmido tem capacidade de reter uma maior quantidade de partículas de gesso.

Para uma única aplicação, com secagem do granulo antes da imersão a espessura de camada ficou em aproximadamente 0,7mm, como poder ser visto na Figura 7, onde é comparado um grânulo revestido e um sem revestimento.

Figura 7 – Comparação entre grânulo com e sem revestimento



Fonte: do autor

3.4 METODOLOGIA

Uma vez que o fertilizante em estudo já foi desenvolvido nas etapas anteriores, nas etapas seguintes serão realizados ensaios de diluição deste fertilizante

em condições controladas, posteriormente o fertilizante será testado em solo para correlacionar os dados obtidos com os valores esperados na natureza. Por fim, uma simulação computacional será realizada a fim de visualizar os gradientes de concentração ao longo do fertilizante e identificar possíveis problemas.

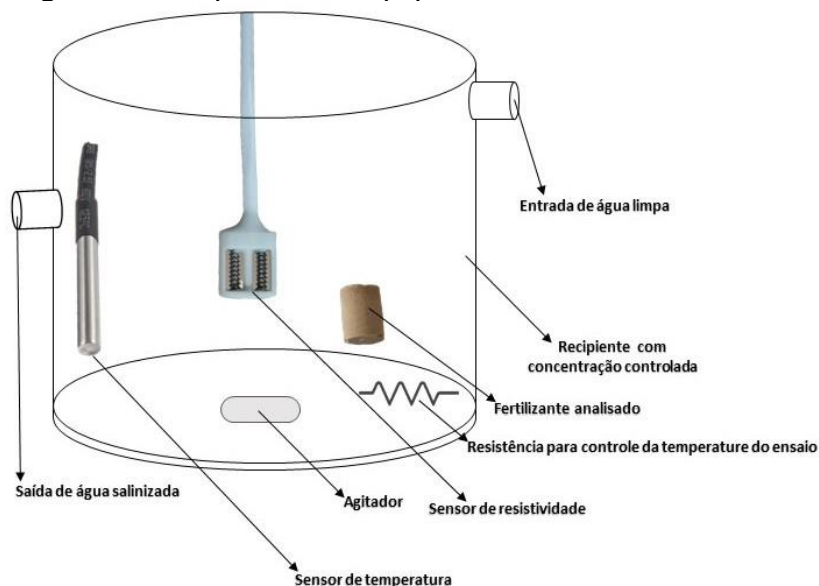
3.4.1 Equipamento utilizado para diluição do fertilizante

O equipamento desenvolvido para este estudo foi projetado para simular a condição do fertilizante no solo, onde o solo é considerado de volume infinito em comparação ao fertilizante. Assim, a concentração do solo nunca entra em equilíbrio com a do fertilizante, mas gera um gradiente de concentração ao redor dele, levando embora o excesso de fertilizante por lixiviação.

Conforme a lei de Darcy, a água pode fluir através dos poros do solo de maneira semelhante ao fluxo de um rio, mas limitada pela estrutura porosa do solo. Desta forma, pode-se considerar que há um fluxo de entrada que sempre leva água do solo até às plantas e um fluxo de saída, responsável por lixiviar os minerais em excesso da superfície (GOES, 2024).

Para simular estas condições foi montado um equipamento para ensaios conforme ilustrado na Figura 8 e Figura 9, onde o fertilizante é depositado em um recipiente com 320mL de água que diluirá o fertilizante.

Figura 8 – Esquema do equipamento usado nos ensaios



Fonte: do autor

Figura 9 – Equipamento utilizado nos ensaios



Fonte: do autor

A salinidade da água no recipiente é monitorada em tempo real por um sensor de resistividade, configurado para, ao atingir $1550 \Omega \cdot \text{cm}$, acionar a circulação de 35 mL de água pelo sistema (injetando água limpa e expelindo água salinizada), mantendo a concentração estável ao longo do ensaio. Vale lembrar que o KCl é um sal hidrossolúvel e com alto índice salino, portanto sua concentração impacta fortemente na resistividade da solução. A título de comparação, a Tabela 2 traz algumas referências de resistividade esperadas no solo.

Tabela 2 – Resistividade típica de materiais que compõem o solo

Meio físico	Faixa de resistividades (Ωm)
Água do mar	~0,3
Água de rio	~30
Água destilada	300
Alagadiço, limo, húmus, lama	<150
Argila	300 – 5 000
Calcário	500 – 5 000
Areia	1 000 – 8 000
Granito e basalto fraturados	500 – 10 000
Granito e basalto íntegros	>10 000

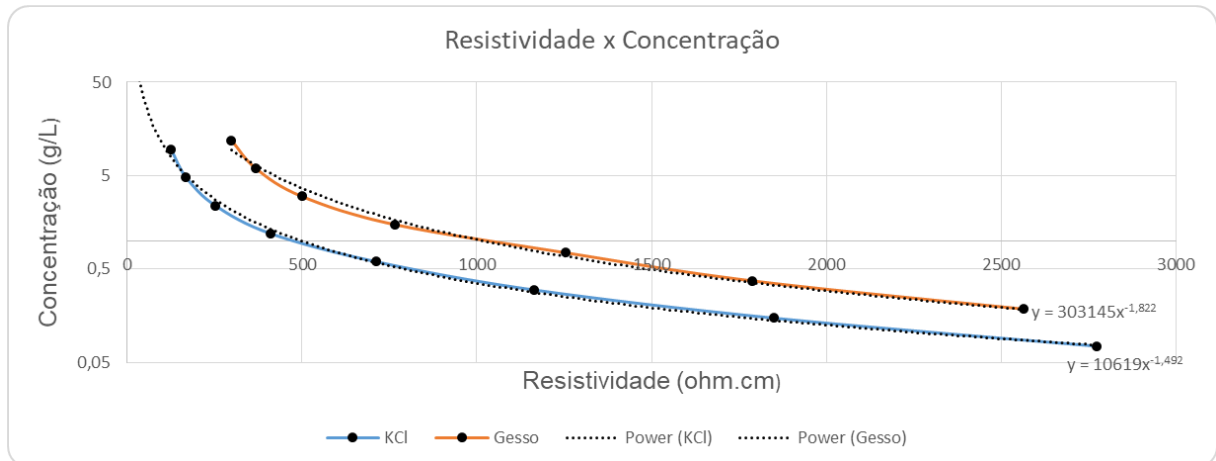
Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7117-1: Fertilizantes – Determinação de nutrientes – Parte 1: Métodos gerais. Rio de Janeiro, 2020.

Um detalhe a ser observado é que na natureza as chuvas são escassas e os altos valores de resistividade nos solos não indicam necessariamente baixa presença de sais, mas também pode indicar baixa presença de umidade.

Para homogeneizar a concentração no recipiente e estabilizar as leituras, o recipiente fica sob agitação com agitador magnético 8x20mm a 180 rotações por minuto (RPM). Enquanto acontece a difusão do fertilizante, a temperatura da solução é monitorada e estabilizada em 31°C.

Para correlacionar os valores de resistividade às respectivas concentrações dos fertilizantes, foi realizado um teste no qual quantidades controladas dos fertilizantes eram diluídas em água e sua resistividade monitorada. O gesso agrícola, por conter impurezas do minério, apresentou alguns precipitados insolúveis e uma salinidade elevada, sendo apenas cerca de 2,5 vezes menor que a do KCl, conforme observado na Figura 10

Figura 10 – Correlação entre concentração e resistividade dos fertilizantes estudados



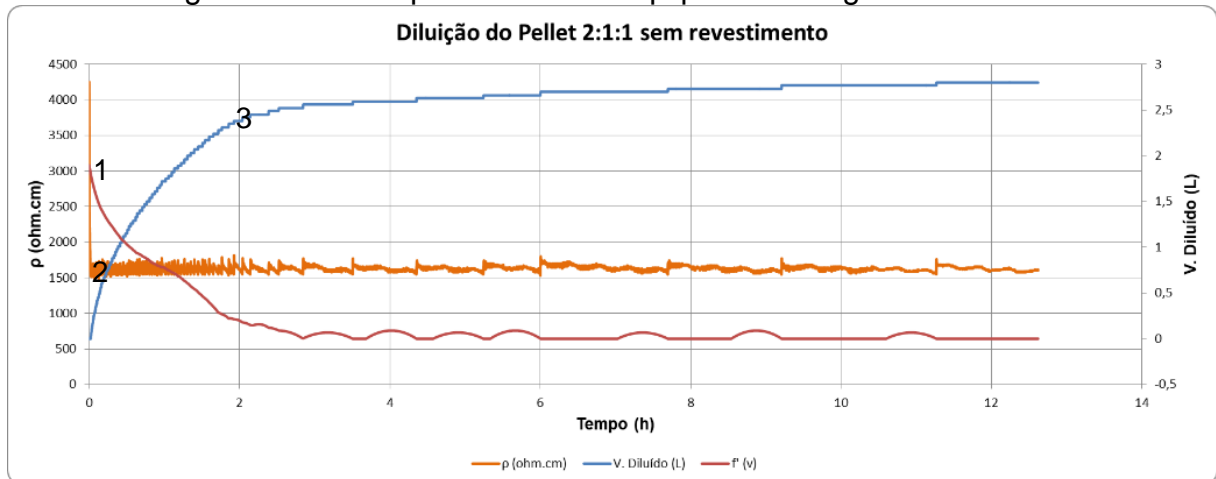
Fonte: do autor

3.4.1.1 Interpretação dos dados do equipamento

O resultado dos ensaios é registrado em um gráfico conforme a Figura 11, onde é possível acompanhar as leituras de resistividade lidas pelo sensor (ρ) ao longo do tempo (t). No eixo secundário é possível ver uma curva referente ao volume de água (V) que foi necessário para diluir a solução e deixá-la em uma salinidade de

1550 Ω .cm, que corresponde a uma concentração equivalente a cerca de 0,18g/L de KCl.

Figura 11 – Exemplo de como o equipamento registra os dados.



Fonte: do autor

Com o volume de água diluída podemos estimar a quantidade de fertilizante que foi eliminada ao longo do ensaio, uma vez que a salinidade de ambos já foi estimada para suas respectivas concentrações.

A partir da curva V, foi extraída a sua taxa de variação ($f'(v)$), calculada com base nos seus quatrocentos pontos de leitura subsequentes, esta curva também usa o seixo secundário para referência de valores. A temperatura (t) também foi registrada ao longo do tempo, mas ela se apresentou bastante estável a $31 \pm 1^\circ\text{C}$ e não será exibida a fim de facilitar a visualização das demais curvas.

Das curvas será possível perceber que inicialmente a resistividade do líquido é sempre bastante alta, pois representa a resistividade apenas da água ainda sem os sais do fertilizante. Com o passar do tempo a resistividade vai caindo devido à liberação dos fertilizantes na água, até ser alcançado o valor de controle, onde a água limpa começa a entrar no sistema diluindo a solução e mantendo-a sempre no mesmo gradiente de concentração.

A curva de taxa de variação de V foi criada pois facilita a interpretação da liberação inicial que acontece no fertilizante. A partir das três curvas foram definidos três pontos de comparação entre os fertilizantes. Os estágios de degradação do fertilizante definidos neste estudo estão identificados no gráfico da Figura 11 e foram:

1. Taxa de variação inicial. A taxa de variação de V para $t=0$, representa o pico de liberação que aconteceu nos primeiros quatrocentos pontos de leitura, o que corresponde a aproximadamente 40 minutos. Ela indica a facilidade com que a água alcança o KCl, iniciando sua liberação imediata. Este parâmetro pode indicar a presença de KCl na superfície do grânulo ou defeitos no revestimento.

2. Tempo até atingir a salinidade de controle. Este parâmetro avalia o comportamento do fertilizante na condição mais crítica, onde há a maior diferença de concentração até a salinidade de controle ser alcançada. Caso o revestimento de gesso esteja cumprindo seu papel, é esperado que a salinidade da água aumente lentamente, sem um grande pico inicial. Este parâmetro é capaz de avaliar a eficácia do revestimento de gesso contra os ataques iniciais.

3. Razão entre a quantidade de água total e a liberada nas primeiras 2h de ensaio. Este parâmetro será expresso em porcentagem (%) e avalia o quanto do fertilizante foi liberado do grânulo após 2h de ensaio.

4 RESULTADOS

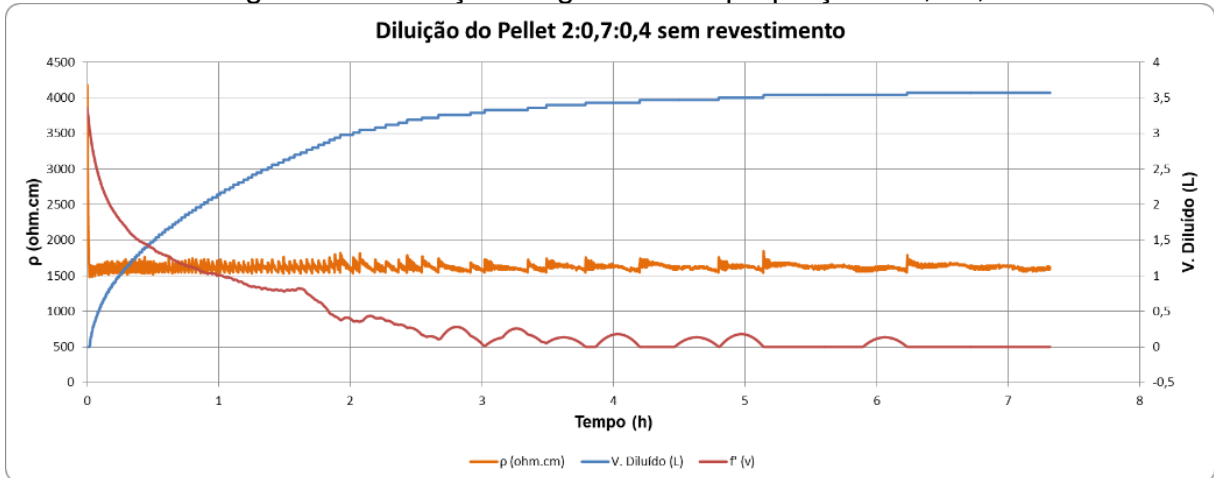
4.1 DISSOLUÇÃO DO FERTILIZANTE

Inicialmente, foram testados grânulos sem revestimento para determinar qual proporção de mistura teria o melhor desempenho. Considerou-se que proporções maiores de gesso tendem a restringir a liberação de KCl, mas também reduzem a densidade disponível de KCl, devido à competição por volume. Além disso, quanto maior a proporção de KCl, maior deverá ser a massa final do grânulo, pois o KCl tem uma densidade maior que o gesso e não é evaporado com facilidade como a água.

4.1.1 Dissolução dos grânulos sem revestimento

Para o ensaio com grânulo na proporção 2:0,7:0,4 (KCl:gesso:água), representado na Figura 12, a taxa de variação inicial foi de 2,26 L/h. Levou-se 54 segundos para alcançar a salinidade de controle e 83% do fertilizante foi dissolvido nas primeiras 2h de ensaio. A massa do grânulo ensaiado foi de 0,74 g (grânulos mais massivos têm maior concentração de fertilizante, conseqüentemente requerem maior volume de água para serem diluídos).

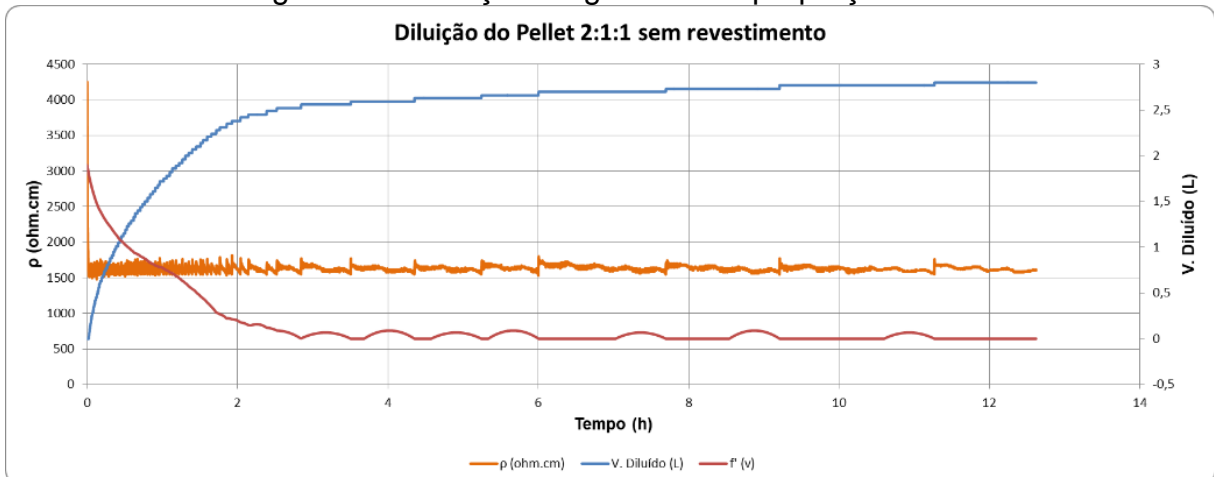
Figura 12 – Diluição do grânulo em proporção 2:0,7:0,4



Fonte: do autor

Para o ensaio com grânulo na proporção 2:1:1, representado na Figura 13, a taxa de variação inicial foi de 1,89 L/h. Levou-se 66 segundos para alcançar a salinidade e 85% do fertilizante foi dissolvido nas primeiras 2h de ensaio. A massa do grânulo ensaiado foi de 0,61 g.

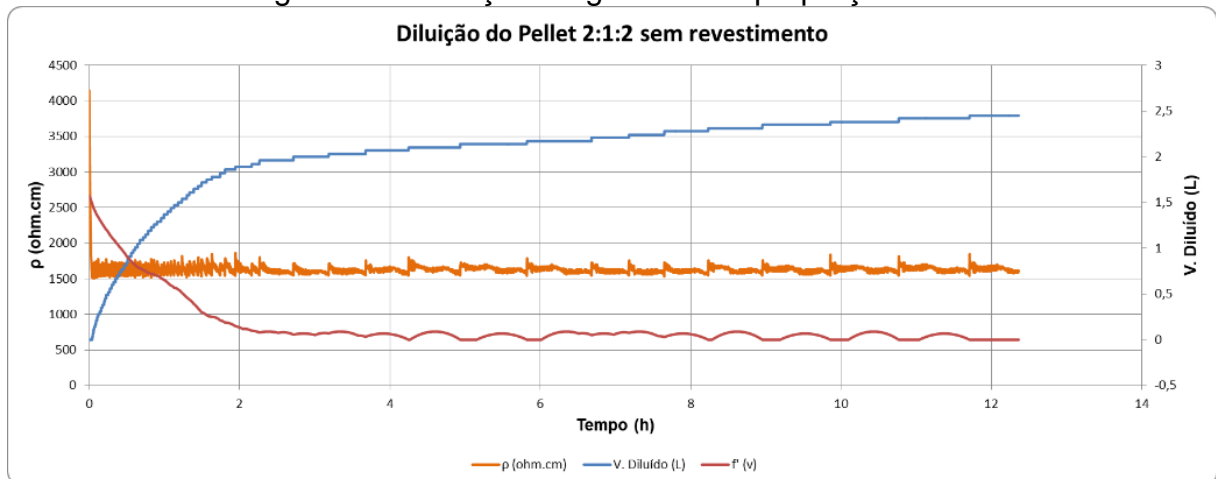
Figura 13 – Diluição do grânulo em proporção 2:1:1



Fonte: do autor

Para o ensaio com grânulo na proporção 2:1:2 (KCl:gesso:água), representado na Figura 14, a taxa de variação inicial foi de 1,57 L/h. Levou-se 2 minutos para alcançar a salinidade de controle e 77% do fertilizante foi dissolvido nas primeiras 2h de ensaio. A massa do grânulo ensaiado foi de 0,49 g.

Figura 14 – Diluição do grânulo em proporção 2:1:2



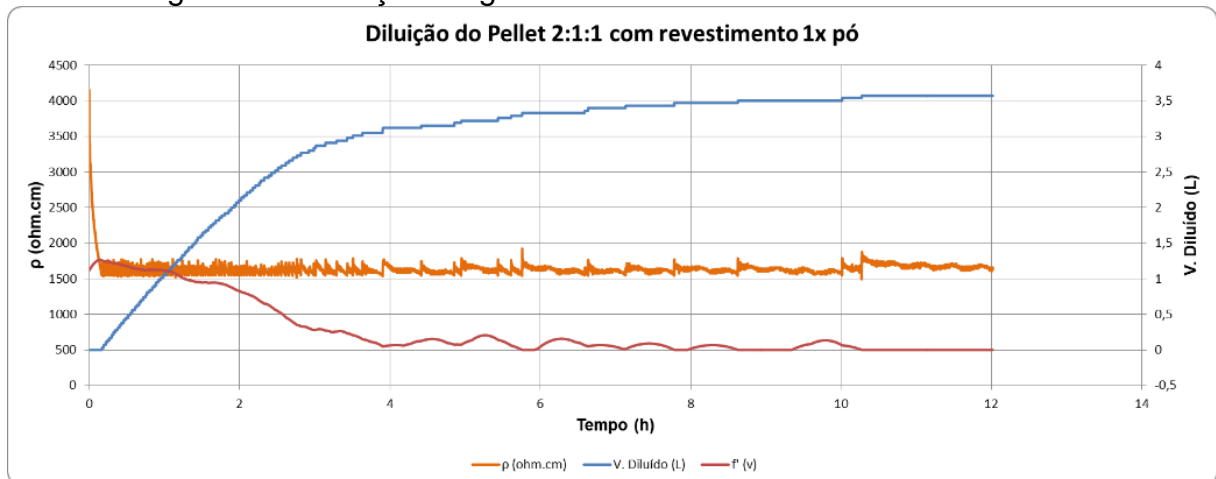
Fonte: do autor

4.1.2 Dissolução dos grânulos revestidos

Os grânulos com maior proporção de gesso tiveram uma liberação inicial do fertilizante mais reduzida, no entanto tinham uma massa inferior, devido ao volume ocupado pelo gesso, que tem menor densidade, além de a água em excesso evaporar na secagem. Portanto o fertilizante de proporção 2:1:1 foi adotado como referência padrão para os ensaios seguintes, já que apresentou um resultado intermediário, longe de extremos, tendo bom equilíbrio entre trabalhabilidade e desempenho.

Para o ensaio com grânulo padrão (2:1:1) revestido com uma camada de gesso, representado na Figura 15, a taxa de variação inicial foi de 1,12 L/h. Levou-se 9 minutos e 49 segundos para alcançar a salinidade de controle e 58% do fertilizante foi dissolvido nas primeiras 2h de ensaio. A massa do grânulo ensaiado foi de 0,71 g.

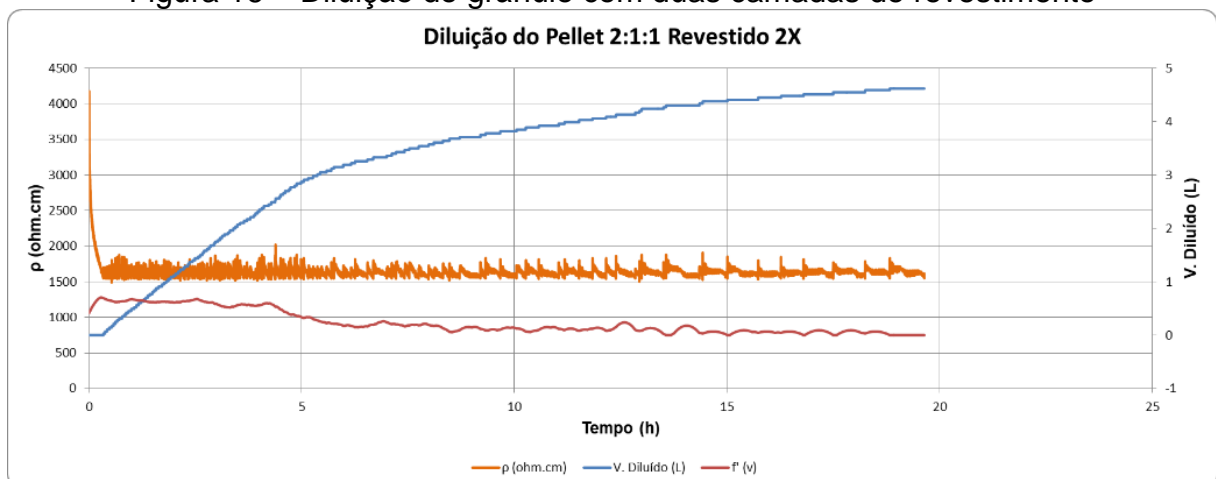
Figura 15 – Diluição do grânulo com uma camada de revestimento



Fonte: do autor

Para o ensaio com grânulo revestido com duas camadas de gesso, representado na Figura 16, a taxa de variação inicial foi de 0,42 L/h. Levou-se 19 minutos e 38 segundos para alcançar a salinidade de controle e 24% do fertilizante foi dissolvido nas primeiras 2h de ensaio. A massa do grânulo ensaiado foi de 1,13 g e o diâmetro 11,05 mm, indicando que a espessura das duas camadas ficam com 1,36mm, um valor bem próximo dos 0,7mm obtidos para apenas uma camada.

Figura 16 – Diluição do grânulo com duas camadas de revestimento



Fonte: do autor

Em ambos os casos, foi possível verificar que a inclusão do revestimento adicionou um trecho linear às curvas, onde a liberação é constante. Isto caracteriza um estado de difusão em caráter estacionário, onde as concentrações interna e

externa não variam. Esta condição se estende até o momento onde todo o fertilizante já foi diluído e a concentração interna começa a cair.

4.2 TESTAGEM DO FERTILIZANTE EM SOLO

A testagem aconteceu no solo não irrigado artificialmente, porém com bastante umidade natural. O ensaio se passou entre os dias 16 e 18 de agosto, na cidade de Florianópolis, onde os registros meteorológicos apontam para dias com presença de nevoeiro, umidade relativa de 95% e uma temperatura média de 19°C. O solo utilizado no teste possuía um pH 6,9 e uma resistividade em torno de 8.500 Ω .cm seco e 3.200 Ω .cm quando encharcado.

Figura 17 – Fertilizantes testados em solo



Fonte: do autor

O solo foi revolvido e aerado, os grânulos foram enterrados a cerca de 2cm de profundidade e mantidos ali por 48 h, conforme ilustrado na Figura 17. Foram usados os grânulos na proporção adotada como padrão (2:1:1), com massas iniciais de: 0,71g para o fertilizante sem revestimento, 0,78g para o fertilizante revestido com uma camada de gesso e 1,21g para o fertilizante revestido com duas camadas de gesso.

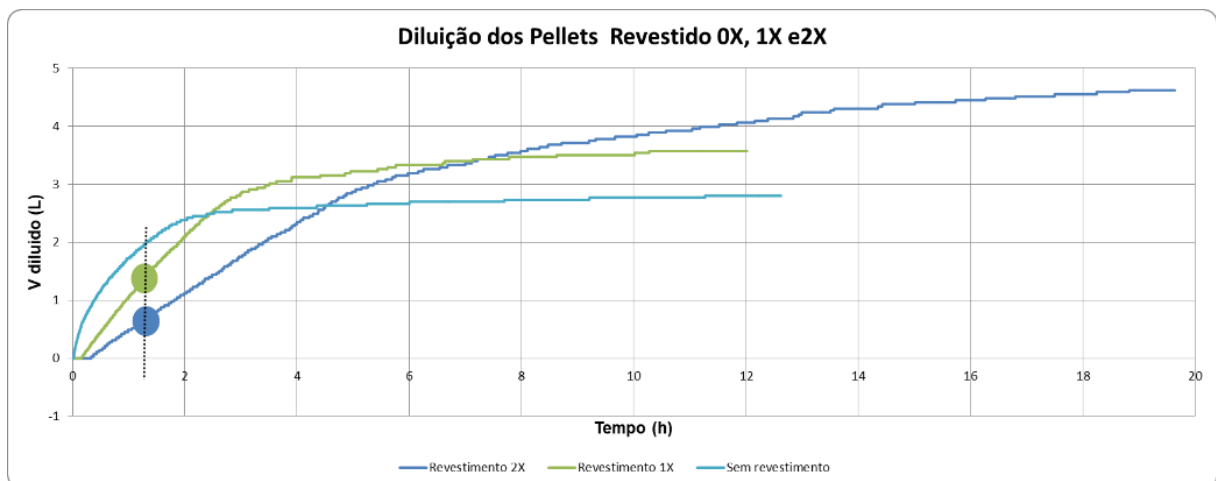
Após as 48h foram encontrados no solo os grânulos com uma e duas camadas de revestimento, no entanto o grânulo sem revestimento não foi encontrado, podendo ter se degradado completamente ou ter se desintegrado durante a remoção.

A massa dos grânulos após a limpeza e secagem foi de 0,45 g para o fertilizante revestido com uma camada de gesso e 1,00 g para o fertilizante revestido com duas camadas de gesso, indicando perdas de massa no solo de 42% e 17%, respectivamente.

Ao correlacionar as perdas de massa no solo com os ensaios laboratoriais, é possível ver que, no ensaio do fertilizante revestido com uma camada, a perda equivalente a 42% do volume total diluído ocorre em aproximadamente 1 hora e 24 minutos. Assim, podemos estabelecer uma equivalência onde esse tempo de ensaio corresponde a 48 horas de liberação no solo

Ao repetir a correlação para o fertilizante de 2 camadas, vemos que a perda equivalente a 17% do total diluído acontece no tempo de 1 h e 28 min, um valor muito próximo para ambos ensaios, conforme representado na Figura 18. O que sugere que a diluição feita em laboratório corresponde ao esperado na natureza cerca de 34 vezes mais acelerado.

Figura 18 – Comparação entre o volume diluído e a quantidade de revestimentos



Fonte: do autor

Embora o grânulo sem revestimento não tenha sido encontrado, sua curva também foi incluída na comparação. Observa-se que, próximo de 1,3 h de ensaio, o grânulo sem revestimento já deveria ter diluído mais de 70% do volume total dos sais em água. Isso confirma a possibilidade de que o grânulo tenha desaparecido no solo, pois a maior parte dele já teria sido degradada.

Com base nisto, podemos estimar os valores reais a partir dos ensaios controlados. No ensaio controlado, 80% do fertilizante é diluído no tempo $t=2,9$ com uma camada de revestimento e $t=8,6h$ com duas camadas de revestimento, o que equivale a cerca de 4 e 12 dias respectivamente.

Vale lembrar que o ensaio aconteceu em uma condição muito restrita, onde o ambiente era úmido, com orvalho e nevoeiro. A presença de micro-organismos no solo, animais e chuvas podem alterar os resultados, portanto esta correlação não serve de regra para todos os tipos de solo e condições.

4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Na simulação, o valor do coeficiente de difusividade foi calculado a partir da primeira lei de Fick, com os dados obtidos nos ensaios. Através desta lei é possível obter o coeficiente de difusividade a partir do fluxo difusivo e gradiente de concentração conforme equação 3 (CALLISTER, 2012).

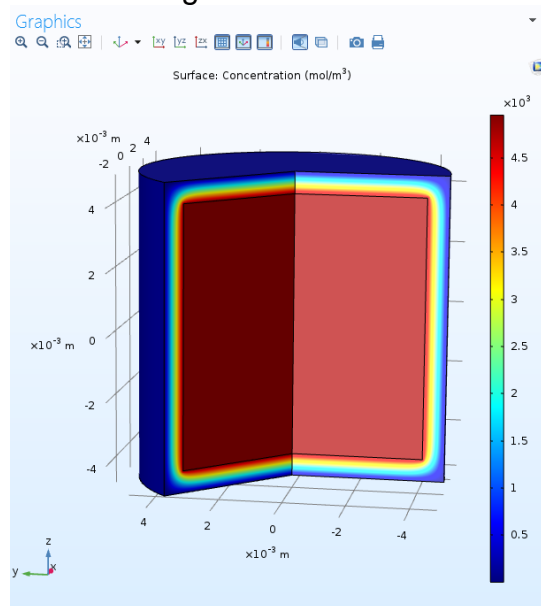
$$J = -D \cdot \frac{dC}{dx} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde (J) é o fluxo de massa, (D) o coeficiente de difusão e dc/dx o gradiente de concentração.

Foi tomado como referencia o fertilizante com uma camada de revestimento, onde sua área era de 446 mm^2 e a taxa de variação das curvas no intervalo de liberação constante foi de $1,12 \text{ L/h}$, o que pela concentração de controle correspondem a $0,20$ gramas de fertilizante expelidas a cada hora. A espessura do revestimento foi de $0,7 \text{ mm}$. Ao aplicar na equação obtemos um coeficiente de difusividade de aproximadamente $2,3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

Os dados obtidos foram transmitidos como valores de entrada para o software de simulação Comsol Multiphysics versão 5.3^a, através da física do tipo transporte de espécies diluídas (TDS). Foi adotada a malha “extremamente fina” (esta nomenclatura já vem definida pelo software). O software realiza diversas vezes o cálculo da lei de Fick ao longo de todos os pontos da malha e como resultado exibe uma representação gráfica, conforme ilustrado na Figura 19.

Figura 19 – Simulação computacional, ilustrando os gradientes de concentração ao longo do fertilizante.

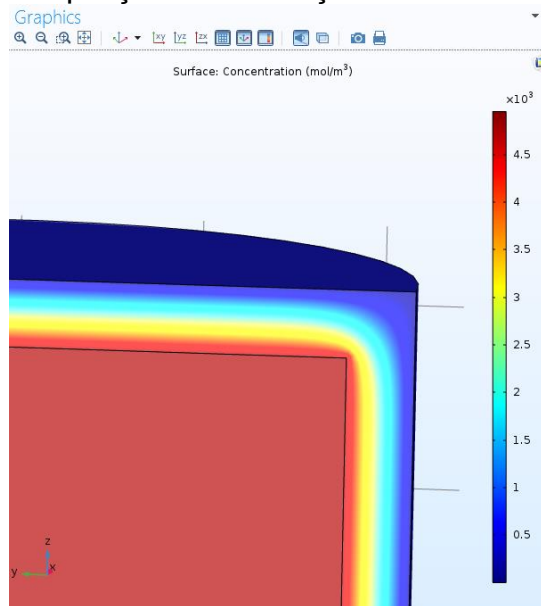


Fonte: do autor. Simulado em Comsol Multiphysics versão 5.3^a

Como esperado para a condição de difusão de fase líquida em caráter estacionário, a concentração no interior do grânulo é equivalente ao limite de solubilidade do fertilizante na água, e na superfície externa, a concentração se iguala à concentração do meio.

Na imagem também é possível observar que por conta da geometria do fertilizante, acontece uma distorção nas linhas de gradientes concentração do revestimento ao longo das arestas, fato que pode ser visto melhor ao ampliar a imagem, conforme Figura 20.

Figura 20 – Ampliação da simulação na aresta do fertilizante.



Fonte: do autor. Simulado em Comsol Multiphysics versão 5.3ª

Ao ampliar é possível visualizar os gradientes de concentração em mais detalhes e fica evidente que nas arestas as regiões de baixa concentração ocupam um volume maior do revestimento enquanto que as regiões de alta concentração parecem ocupar um volume menor do que no restante do revestimento. Sendo assim, é possível que aconteça um fluxo maior do fertilizante pelas arestas, o que pode resultar em um desgaste prematuro desta parte do revestimento.

Caso a aresta do revestimento se degrade antes de todo o fertilizante no interior do grânulo ser diluído, a taxa de liberação tenderia a aumentar subitamente durante o ensaio. No entanto isto não foi observado, uma vez que após o trecho de liberação linear nos gráficos das figuras 15 e 16, a taxa de liberação caiu gradualmente, indicando que o revestimento resistiu durante todo o intervalo onde a liberação é controlada.

5 CONCLUSÃO

Conforme observado, o revestimento de gesso possui grande eficácia no controle da liberação do cloreto de potássio. No estudo, o grânulo revestido com duas camadas liberou apenas 24% do fertilizante nas 2h iniciais do ensaio, o grânulo revestido com uma camada liberou 59% do fertilizante nas 2h iniciais de ensaio, enquanto no grânulo sem revestimento a liberação foi de 77%. Foi observada liberação em caráter de difusão estacionária apenas nos fertilizantes revestidos, o que confirma sua funcionalidade.

A técnica utilizada também permite a aplicação de múltiplas camadas a fim de restringir a liberação na intensidade desejada, além de possibilitar o uso de múltiplas camadas com tempos de degradação diferentes o que permite mudar a taxa de liberação conforme o desenvolvimento do cultivo.

Foi possível perceber que, mesmo sem um revestimento, a adição de gesso na mistura do grânulo de KCl impacta na sua taxa de liberação, principalmente nos instantes iniciais onde a diferença de concentração entre o meio e fertilizante é maior. Indicando que a massa de gesso adicionada ao grânulo encobre o KCl em seu volume. Nos ensaios, uma quantidade maior de gesso e água resultava em menor uma taxa de liberação inicial menor e um maior tempo para alcançar a salinidade de controle.

O índice salino do cloreto de potássio é reportado como um problema em várias fontes referenciadas enquanto o índice salino do gesso agrícola não costuma ser reportado na literatura como um problema. Entretanto neste estudo foi encontrado um valor de salinidade elevado no gesso agrícola, apenas 2,5 vezes abaixo do KCl, mas que por ter uma dissolução lenta acaba não sendo um fator crítico.

O cálculo do índice salino não leva em consideração o tempo de liberação, desta forma se ele for calculado para uma solução recém misturada e uma solução misturada ha algum tempo, elas terão resultados diferentes caso contenham elementos de liberação controlada. Nos testes com gesso agrícola foram avistadas pequenas partículas em suspensão na água, que poderiam ser diluídas futuramente, podendo indicar, que devido a sua baixa solubilidade, ele se comporta naturalmente como um tipo de fertilizante de liberação lenta.

A testagem dos fertilizantes em solo revelaram que a liberação esperada na natureza é cerca de 34 vezes mais lenta que a liberação observada em laboratório, onde os parâmetros são mais severos para acelerar a degradação.

A simulação computacional revelou um gradiente de concentração constante no interior do grão, uma vez que mesmo havendo excesso de fertilizante em fase sólida, a água não consegue diluí-lo além do seu limite de solubilidade. A análise do gradiente de concentração ao longo do revestimento revelou que ele não é uniforme e isto pode favorecer um fluxo difusivo diferente nas arestas do fertilizante e um desgaste prematuro nessa região, embora nos ensaios o revestimento tenha resistido satisfatoriamente.

A geometria do fertilizante pode servir como sugestão para futuros estudos, uma vez que em fertilizantes com maiores tempos de vida as arestas podem não resistir o tempo necessário, além de também impactar na taxa de liberação resultante.

REFERÊNCIAS

- AGROLINK. Fertilizantes minerais potássicos. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/nutrientes/fertilizantes-minerais-potassicos_361446.html. Publicado em: 12 set. 2016. Acesso em: 11 ago. 2024.
- AGROLINK. Cloro nas plantas: tudo o que você precisa saber. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/nutrientes/cloro-nas-plantas---tudo-o-que-voce-precisa-saber_470005.html. Publicado em: 06 set. 2022. Acesso em: 14 ago. 2024.
- AGROMOVE. Gessagem: como o gesso atua no solo? Disponível em: <https://blog.agromove.com.br/gessagem-solo/>. Publicado em: 16 nov. 2020. Acesso em: 14 ago. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7117-1: Fertilizantes – Determinação de nutrientes – Parte 1: Métodos gerais. Rio de Janeiro, 2020.
- BRASIL ESCOLA. Revolução Verde. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/revolucao-verde.htm>. Acesso em: 08 ago. 2024.
- BRASIL, E. C.; CRAVO, M. da S.; VIEGAS, I. de J. M. (Ed.). Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará: Uso de gesso na agricultura. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. cap. 11, p. 133-145. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1127247>. Acesso em: 14 ago. 2024.
- CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- CAMPO E NEGÓCIOS. Fertilizante de liberação controlada. Revista Campo e Negócios, 2023. Disponível em: <https://revistacampoenegocios.com.br/fertilizante-de-liberacao-controlada/>. Acesso em: 15 ago. 2024.
- COELHO, Eduardo. O uso do Cloreto de Potássio (KCl) como fertilizante na agricultura pode ser prejudicial para a sua produtividade?. Blog Verde, 2023. Disponível em: <https://blog.verde.ag/pt/nutricao-de-plantas/cloreto-de-potassio-kcl-como-fertilizante/>. Acesso em: 8 ago. 2024.
- ELLSWORTH, T. R.; et al. The potassium paradox: Implications for soil fertility, crop production and human health. Renewable Agriculture and Food Systems, 2020. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/renewable-agriculture-and-food-systems/article/the-potassium-paradox-implications-for-soil-fertility-crop-production-and-human-health/123456789>. Acesso em: 13 ago. 2024.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Solos do Brasil. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-solos-brasileiros/solos-do-brasil>. Publicado em: 2011. Acesso em: 13 ago. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Uso de gesso na agricultura. In: Recomendação de corretivos e fertilizantes em solos do estado do Pará. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/218403/1/LV-RecomendacaoSolo-2020-135-147.pdf>. Publicado em: 2020. Acesso em: 14 ago. 2024.

FAO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2021. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/sofi/2021/en/>. Acesso em: 8 ago. 2024.

FORTIFOL. Fertilizantes de Liberação Controlada, eficiência no uso de fertilizantes e sustentabilidade. 2020. Disponível em: <https://fortifol.com.br/2020/11/03/fertilizantes-de-liberacao-controlada-eficiencia-no-uso-de-fertilizantes-e-sustentabilidade/>. Acesso em: 19 ago. 2024.

GOES, Pedro. A Lei de Darcy e sua aplicação na hidrogeologia. Dicionário do Petróleo, 2024. Disponível em: <https://dicionariodopetroleo.com.br/darcy-lei-hidrodinamica/>. Acesso em: 11 ago. 2024.

HANS. O que é um fertilizante de liberação lenta? 2024. Disponível em: <https://www.hans-chem.com/pt/o-que-e-um-fertilizante-de-liberacao-lenta/>. Acesso em: 19 ago. 2024.

MACHADO, Anderson Wolf. Cloreto de Potássio (KCl) - vantagens e manejo do adubo. Portal Agrolink, 27 abr. 2022. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/adubacao-mineral/adubo—cloreto-de-potassio_465049.html. Acesso em: 8 ago. 2024.

MADDISON, Angus. Historical Statistics of the World Economy: 1-2008 AD. University of Groningen, 2010.

MALISZEWSKI, Eliza. Nanotecnologia pode gerar fertilizante de liberação lenta. Agrolink, 11 out. 2021. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/noticia/nanotecnologia-pode-gerar-fertilizante-de-liberacao-lenta_457074.html. Acesso em: 8 ago. 2024.

MALTHUS, T. R.. An Essay on the Principle of Population. 1. ed. London: J. Johnson, 1798.

MORAES, Wagner Diogo; BARBOZA, Marcos Roberto. O uso de gesso agrícola no processo de lixiviação de nutrientes em diferentes coberturas de solo. EngAgro, 2022. Disponível em: <https://www.repositorio.camporeal.edu.br/index.php/engagro/article/view/529/288>. Acesso em: 13 ago. 2024.

NAÇÕES UNIDAS. População mundial atinge 8 bilhões de pessoas. ONU News, 15 nov. 2022. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2022/11/1805342>. Acesso em: 8 ago. 2024.

RESENDE, A. V.; BORGHI, E.; GONTIJO NETO, M. M.; FONTOURA, S. M. V.; BORIN, A. L. D. C.. Estratégias para aumentar a eficiência do uso de fertilizantes. Nota Técnica, 2022. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2022-03/nota_tecnica_fertilizantes_finalizada_18_03_2022.pdf. Acesso em: 8 ago. 2024.

RUIZ, S. R. Fertilizantes de liberação controlada: uma revisão. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/31129/1/2017_tcc_srruiz.pdf. Acesso em: 15 ago. 2024.

SANTOS, Luiz Fernando dos; GOULART, Mariana B. Gabos; KRAHL, Luise Lottici; OLIVEIRA, Maria Inês; LEITE, Albano; MARTINS, Éder de Souza. Determinação do índice salino de fontes minerais de nutrientes. Brasília: Embrapa Cerrados, 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/150099/1/CPAC-12.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2024.

SILVA, F. F. Fertilizantes de liberação controlada: eficiência e impacto ambiental. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Instituto Federal Goiano, 2024. Disponível em: https://repositorio.ifgoiano.edu.br/bitstream/prefix/4496/1/TCC_Franciaele_Freitas_Silva_Agronomia_2024.pdf. Acesso em: 15 ago. 2024.

SILVA, João Carlos da. Práticas de Conservação do Solo e Recuperação de Áreas Degradadas. Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/498802/1/doc90.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2024.

SINERGIA CIENTÍFICA. Cloreto de potássio: o que é, fórmula, propriedades e aplicações. Disponível em: <https://www.sinergiaceutifica.com.br/cloreto-de-potassio>. Publicado em: 6 set. 2023. Acesso em: 13 ago. 2024.

TRINDADE, D. A. R. Fertilizantes de liberação controlada na agricultura moderna. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2020. Disponível em: <https://www.ica.ufmg.br/tcc/2020/TCC-DaniloAparecidoRodriguesTrindade.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2024.

YARA BRASIL. Uso de Fertilizantes Premium vs. Tradicionais: Quais Os Impactos Na Sua Produção?. 2023. Disponível em: <https://www.yarabrasil.com.br/conteudo-agronomico/blog/fertilizantes-premium-vs-tradicionais/>. Acesso em: 8 ago. 2024.