

RECUPERAÇÃO DE NUTRIENTES DA URINA E SUA AVALIAÇÃO COMO FERTILIZANTE MINERAL NO CULTIVO DE GIRASSÓIS

Rafaela Camargo Cazanova – rafaelaccazanova@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)
Avenida Bento Gonçalves, 9500
CEP 91501-970 – Porto Alegre – RS

Alexandre Giacobbo – alexandre_giacobbo@yahoo.com.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)

Andréa Moura Bernardes – amb@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)

Salatiel Wohlmuth da Silva – salatiel.silva@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)

Resumo: O setor agrícola carece de soluções alternativas a fertilizantes comerciais. Uma destas alternativas promissoras que vem ganhando destaque é a estruvita, mineral constituído de alguns macronutrientes relevantes para culturas agrícolas, bem como interessante do ponto de vista do saneamento, visto que incentiva a utilização de excretas como matéria prima, valorizando-as ao invés de tratá-las como resíduo. Quanto a culturas vegetais, o girassol é uma das plantas de alto interesse econômico, sendo uma das mais consumidas a nível mundial. Dada a importância deste vegetal, bem como o crescente destaque dos fertilizantes minerais alternativos, este trabalho se propõe a avaliar o crescimento de uma cultura de girassóis sob condições de presença e ausência de fertilizante oriundo de urina. Assim, obteve-se que a aplicação de 333mL a 2,6 g/L de material precipitado de urina (contendo 90% de estruvita, seguida de formas análogas) resultou em valores de massa seca foliar, radicular e caulicular, bem como altura, levemente maiores para as culturas que receberam aplicações com estruvita. O mesmo não ocorreu no crescimento florístico, o qual tendeu a ser mais lento nas culturas com estruvita. Esses resultados sugerem que fertilizantes de liberação lenta, como estruvita e análogos, tendem a ser melhores para o desenvolvimento estrutural ao invés de florístico dos girassóis. Este trabalho também avaliou as características do fertilizante conforme a temperatura e tempo de secagem, obtendo que a secagem a 100°C, embora necessite de menos tempo, não privilegiou a formação de cristais. Dessa forma, caso se deseje obter um fertilizante mineral, com material cristalino identificável, a cinética da reação (com atenção ao tempo mínimo e temperatura máxima de secagem) é um fator determinante. Dada a lacuna de estudos relacionando tais fertilizantes minerais a girassóis, este trabalho contribui com algumas informações de desempenho da cultura vegetal escolhida, bem como critérios de atenção à formação deste fertilizante. Dados de desempenho vegetal relacionando à proporção necessária de fertilizante podem ainda serem cada vez mais aprimorados em estudos posteriores.

Palavras-chave: Estruvita, Urina, Girassol, Reutilização de Águas Residuais, Sustentabilidade Ambiental



NUTRIENTS RECOVERY FROM URINE AND ITS EVALUATION AS A MINERAL FERTILIZER FOR GROWING SUNFLOWERS

Abstract: *The agricultural sector lacks alternative solutions to commercial fertilizers. One promising alternative gaining attention is struvite, a mineral composed of essential macronutrients for crops. It is also interesting from a sanitation perspective as it promotes using excreta as raw material, valuing it instead of treating it as waste. Regarding plant crops, the sunflower is one of the most economically important plants and among the most consumed worldwide. Given the importance of this crop and the growing interest in alternative mineral fertilizers, this study aims to evaluate the growth of sunflowers under conditions with and without fertilizer derived from urine. It was found that the application of 333 mL at 2.6 g/L of urine precipitate material (containing 90% struvite, followed by analogous forms) resulted in slightly higher values for dry leaf, root, and stem mass, as well as height, in crops that received struvite applications. The same effect was not observed in floral growth, which tended to be slower in crops with struvite. These results suggest that slow-release fertilizers, such as struvite and its analogs, tend to be better for structural rather than floral development in sunflowers. This study also evaluated the characteristics of the fertilizer according to drying temperature and time, finding that drying at 100°C, while faster, did not favor crystal formation. Therefore, if the goal is to obtain a mineral fertilizer with identifiable crystalline material, the reaction kinetics (with attention to minimum time and maximum drying temperature) is a determining factor. Given the lack of studies linking such mineral fertilizers to sunflowers, this study provides some insights into the performance of the selected crop, as well as criteria to consider for fertilizer formation. Plant performance data related to the necessary fertilizer proportion can be further improved in future studies.*

Keywords: *Struvite, Urine, Sunflower, Wastewater Reuse, Environmental Sustainability*

1. INTRODUÇÃO

A agricultura desempenha um papel crucial na garantia da segurança alimentar global, sendo fundamental para a sustentação da vida humana. Diante da grande e crescente demanda por produção agrícola, torna-se necessário buscar fontes alternativas de fertilizantes minerais que não sejam provenientes da mineração, uma vez que essa prática provoca impactos como a depleção de recursos naturais finitos.

Nesse contexto, produtos de águas residuais, como a estruvita ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), têm ganhado destaque em trabalhos acadêmicos como uma fonte promissora de fertilizantes minerais. No caso da estruvita em específico, seu potencial agrícola e suas características, tais como ser um nutriente de liberação lenta (METCALF & EDDY, 2016), auxiliam nos processos vegetais e reduzem os riscos de perda por lixiviação e de eutrofização de corpos hídricos (DE MATOS, 2013). Essas vantagens são especialmente importantes em comparação com fertilizantes convencionais mais solúveis, que podem ser facilmente lixiviados em solos de alta porosidade ou quando aplicados em excesso, além da capacidade de absorção das plantas. Fertilizantes de liberação lenta, como a estruvita e a hazenita, são geralmente recuperados por meio de precipitação química das águas residuais (RANIRO, 2021).

Desta forma, acredita-se que nutrientes de liberação lenta, obtidos de fontes renováveis, recuperadas de excretas, são capazes de desempenhar um importante papel na manutenção da fertilidade do solo, no crescimento saudável das plantas e na sustentabilidade da agricultura, dentro do conceito de economia circular. Das diversas possibilidades de extração de estruvita de efluentes, uma das mais antigas e bem conhecidas é a oriunda de urina, devido à elevada concentração de minerais nessa parte da excreta humana. Inclusive, esses nutrientes podem se precipitar dentro do corpo humano, formando cálculos renais. Segundo COE ET AL. (2005), a formação de pedras de estruvita em aproximadamente 10% das pessoas afetadas por cálculos renais evidencia sua ocorrência comum na urina. Além disso, a



estruvita de urina, recuperada via precipitação química, pode ser facilmente obtida com satisfatório grau de pureza e segurança sanitária e agrícola (FILHO, 2019).

Entre as várias culturas agrícolas que podem se beneficiar de fertilizantes minerais, este trabalho destaca o girassol (*Helianthus annuus*). Originária da América (GAZZOLA et al., 2012), esta planta é uma das quatro maiores culturas oleaginosas utilizadas na produção de óleo vegetal comestível no mundo (UNGARO, 2017). Sua ampla utilização se deve, em parte, à resistência à seca e à adaptabilidade a diferentes regiões agrícolas, o que permite a expansão de sua área cultivada, inclusive no semiárido brasileiro (RIBEIRO & BARRETO, 2017). Ademais, a cadeia produtiva do girassol é semelhante à da soja, ocupando, em função da época de semeadura, períodos ociosos dos fatores de produção brasileiro existentes para soja e milho, seja na propriedade seja nas plantas industriais (CASTRO et al., 1996). O girassol tem diversos usos: flor ornamental, alimentação humana, produção de ração animal, forragem, silagem (NUNES, 2020) e biocombustíveis (GAZZOLA et al., 2012).

Apesar da importância dessa cultura, ainda são escassos os estudos relacionados à aplicação de nutrientes minerais de liberação lenta, obtidos de fontes renováveis, em cultivos de girassol, tanto a nível nacional quanto internacional. Considerando a relevância do girassol e a necessidade de entender melhor a aplicação de tais produtos, como a estruvita, em culturas agrícolas, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de um fertilizante mineral sustentável, derivado de urina humana, em cultivos de girassol. Para isso, o estudo abrange desde a produção do fertilizante até o plantio, crescimento e colheita da cultura escolhida.

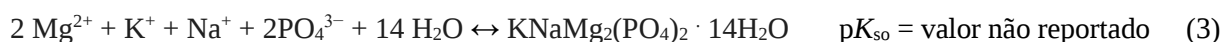
2. NUTRIENTES DE URINA

A precipitação de nutrientes presentes na urina tem sido cada vez mais estudada devido à alta relevância dos minerais precipitados para a agricultura. No entanto, a previsão do tipo de precipitado gerado ainda apresenta desafios. Segundo MORITA et al. (2019), mesmo com o uso de modelos computacionais, os resultados não correspondem ao que é observado empiricamente, tanto em escala laboratorial quanto em escala real. Assim, há dificuldades em prever com precisão a cristalização de acordo com as condições reais dos sistemas. Em geral, recorre-se ao método de tentativa e erro para otimizar as condições específicas que favoreçam a precipitação da estruvita.

A precipitação da estruvita, fertilizante mais comum de urina, requer inserção de magnésio, visto a estequiometria da sua reação de formação (METCALF & EDDY, 2016):



Contudo, diversas outras possibilidades podem precipitar com a inserção de Mg^{2+} além da estruvita. Logo abaixo há também a estequiometria das reações de formação da K-estruvita ($\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) e da hazenita ($\text{KNaMg}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$), obtidos de BENNETT et al. (2017) e de YEE (2018), respectivamente.



3. MATERIAIS E MÉTODOS

A urina foi recolhida em dois momentos. No primeiro momento, dos dias 05/10/2023 a 13/10/2023, foi coletado 29,75 litros. Este montante foi utilizado para a produção do fertilizante mineral aplicado na cultura de girassóis. No segundo momento, de 15/04/2024 a 18/04/2024, foram coletados 16,23 litros, com a finalidade de realizar uma duplicata do experimento, quanto ao ensaio de precipitação e teste de produção de fertilizante sob condição de secagem acelerada (100°C por 1,5h ao invés das 45°C por 24h utilizados no primeiro momento). Em ambas as situações, a urina foi armazenada em recipientes devidamente higienizados de até 5 litros, protegidos da luz solar. As análises do afluente



(urina) e efluente (urina pós ensaio de precipitação) foram feitas por cromatografia iônica (IC) e espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP).

O processamento da urina foi feito em 3 bateladas (cada batelada se refere a uma idade de urina: 1-2 dias, 2-6 dias, 6-8 dias), utilizando um reservatório de 20 L de capacidade. Para a ocorrência da reação, foi adicionado 0,774 g/L de hidróxido de magnésio – $Mg(OH)_2$ P.M. 58,32g/mol – à urina. Esta concentração foi estimada tendo por base uma quantia de fósforo (P), normal na urina humana, de 400 mg/L, e a proporção estequiométrica de fósforo para Magnésio (Mg) de $P:Mg = 1:1$. Após inserção de $Mg(OH)_2$ e agitação manual por cerca de 4 minutos, realizou-se a filtração lenta por 24h, por gravidade, do material decantado. Na sequência, ocorreu a secagem seguida de moagem, para análise por difração de raios-x (DRX).

O material precipitado seco a 45°C foi caracterizado e utilizado na cultura vegetal de girassóis. Como se tratavam de 3 bateladas, de forma a homogeneizar as variações de concentração no tempo, o material gerado por cada batelada corresponde a 1/3 em massa do fertilizante aplicado nos girassóis. Quanto ao processo de semeadura e seleção das mudas, no dia 05/10/23 foram semeadas cerca de 96 sementes de girassol miúdo em ambiente controlado e de pequenas dimensões. Estas sementes viáveis foram então transferidas para recipientes levemente maiores, até que elas atingissem o tamanho de muda. Todas as sementes estiveram adubadas em terra preta, antes de seu plantio nos vasos do experimento.

Quanto ao preparo dos vasos do experimento, no dia 29/10/23 foi realizada a escolha das mudas mais saudáveis e de tamanho semelhante, para plantio nestes recipientes. Os vasos de 10 litros foram homogeneizados ao fundo com cascalho, para garantir maior drenagem. Logo após, foi acrescentada a mesma quantidade volumétrica de substrato (8 litros) em todos os vasos. A organização do substrato utilizado em cada vaso se subdivide em 4 categorias: (1) terra preta sem estruvita – P0; (2) terra preta com estruvita – PE; (3) terra normal sem estruvita – N0; (4) terra normal com estruvita – NE. Cada uma dessas categorias foi realizada em triplicata.

“Terra preta” se refere ao composto orgânico obtido em casas de floricultura, e tem este nome devido à coloração do material. O preparo deste substrato foi elaborado misturando-se 3 compostos orgânicos de marcas distintas. A “Terra normal” se refere ao substrato relativamente pobre em matéria orgânica e nutrientes, comparado à terra preta (Figura 1). Esta última, por sua vez, tem coloração marrom-alaranjada e maior densidade. Para o mesmo volume de substrato posto nos vasos de iguais dimensões, foram acrescentados 7,5 kg de terra preta (P0), enquanto, para a terra normal, foram necessários 11,8 kg para se preencher o mesmo volume. Desta forma, a terra normal (N0) possui uma densidade cerca de 57% maior em relação à P0.

Como forma de reduzir a interferência do sol e demais condições ambientais, os vasos, em triplicada, após o plantio das mudas, foram dispostos de forma alternada, conforme a Figura 1.



Figura 1. Organização das amostras em triplicata (foto retirada em 30/10/23)



Após as plantas serem devidamente adicionadas nos vasos, com seus respectivos solos (terra preta ou normal), elaborou-se uma mistura de 5,2 g do material resultante do ensaio de precipitação em uma garrafa de 2 litros. Este volume foi então distribuído igualmente nas amostras, em triplicata, que deveriam receber estruvita (PE1, PE2, PE3, NE1, NE2, NE3). Assim, logo após o plantio das mudas, em 29/10/23, foram colocados, em cada um dos referidos vasos que continham a letra “E”, 2,6 g/L do fertilizante produzido, misturados a 333 mL de água de abastecimento urbano.

Quanto aos cuidados posteriores e observação do crescimento vegetal, nos dias consecutivos ao plantio das mudas e aplicação do fertilizante resultante do ensaio de precipitação, se realizou o cuidado diário das plantas com a devida rega e remoção de possíveis pragas, como lesmas que se refugiavam nas bordas dos vasos e pulgões.

Na etapa final (de poda, limpeza e preparo da massa seca vegetal), previamente ao corte vegetal (em 29/12/23), foram medidos os diâmetros de caule, capítulo (ou seja, flor do disco) e altura. Esta última foi medida a partir da base do caule, também denominado colo ou coleto, até a inserção do capítulo, conforme NETO *et al.* (2018) e de NOBRE DE ALMEIDA *et al.* (2011).

As folhas foram separadas do caule, bem como a inflorescência (flor de raio e de disco), e secadas separadamente a temperatura de 50°C por 24h. As raízes foram retiradas delicadamente do solo com auxílio de água em excesso, a fim de se obter a máxima separação entre as raízes e os grãos de solo. Após isso, efetuou-se também a secagem.

Posteriormente, a medição mássica de todos os componentes vegetais foi realizada. No caso das raízes, antes desta medição, foi feito também a agitação do material, a fim de remover grãos restantes no emaranhado vegetal.



4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados consideram a análise dos precipitados de urina naturais, químicos e o crescimento da cultura vegetal escolhida.

4.2. Precipitados naturais durante armazenamento

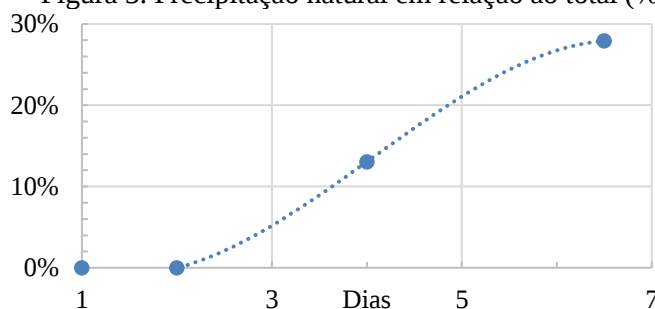
Durante etapa inicial de coleta e armazenamento da urina, notou-se, do pequeno espaço amostral analisado, que uma pessoa gera um valor próximo a 1 litro de urina por dia, a depender de sua massa corpórea e ingestão de líquido diária. Além disso, quanto ao tempo de armazenamento, no terceiro dia de armazenamento, observou-se o início da formação de um precipitado nas garrafas, o que corrobora com VO *et al.* (2022), ao afirmar que, a partir de dois dias, começa a haver precipitados ou decantados na urina. O cheiro também se altera, devido à liberação de amônia na forma gasosa, o que ocasiona perdas de Nitrogênio para a atmosfera. A Figura 2 ilustra o processo de precipitação natural que ocorreu com a urina, em um recipiente fechado, após o terceiro dia. A análise deste precipitado por DRX apontou se tratar de um material amorfo orgânico, de composição diversa.

Figura 2. Precipitação natural na garrafa (foto tirada no 4º dia de armazenamento)



De forma a entender a evolução da precipitação natural da urina, em 18/04/2024 fez-se a coleta do material decantado naturalmente antes do ensaio de precipitação de cada uma das 3 bateladas separadas por idade. Os valores obtidos pós secagem do precipitado foram divididos pelo volume total de material decantado (ou seja, incluindo os decantados da precipitação química com $Mg(OH)_2$). Assim, obteve-se a Figura 3, a qual apresenta a evolução da precipitação natural no decorrer do tempo, com relação ao total de precipitados gerados (química e natural referente a cada período temporal). Percebe-se aceleração da precipitação natural a partir do terceiro dia e leve desaceleração entre os dias 6 e 7 de armazenamento.

Figura 3. Precipitação natural em relação ao total (%)



Embora o percentual de precipitado natural em relação ao total cresça com o tempo, isso não significa que o precipitado total seja uma constante. Pelo contrário, conforme se observa na Tabela 1, há também tendência de aumento do precipitado total por litro de urina ao longo do tempo.



Tabela 1. proporção de precipitado total em relação ao volume de urina afluyente

	Precipitado Natural (g)	Precipitado quimicamente (g)	Volume da batelada (L)	Massa de precipitado por volume de urina (g/L)
Batelada 1	0	9	6,23	1,45
Batelada 2	1,0821	7,2103	5	1,66
Batelada 3	2,5376	6,553	5	1,82

4.2. Precipitação química

A urina fresca (com menos de 1 dia de armazenamento) obteve pH em torno de 6,8 a 7,12. Contudo, à medida que o tempo de armazenamento decorre, o pH tende a subir. No segundo dia o pH já apontava valores básicos entre 7,92 e 8,35. Dessa forma, no dia dos ensaios de precipitação, antes de se misturar $Mg(OH)_2$, o pH da urina estava básica, com valores em torno de 8. Depois da mistura com $Mg(OH)_2$, observou-se novamente o pH, o qual havia subido para valores em torno de 9. Essa mesma tendência de subida de pH naturalmente e também logo após a adição de $Mg(OH)_2$ se manteve em ambos os ensaios de precipitação, realizados em 13/10/2023 e em 18/04/2024.

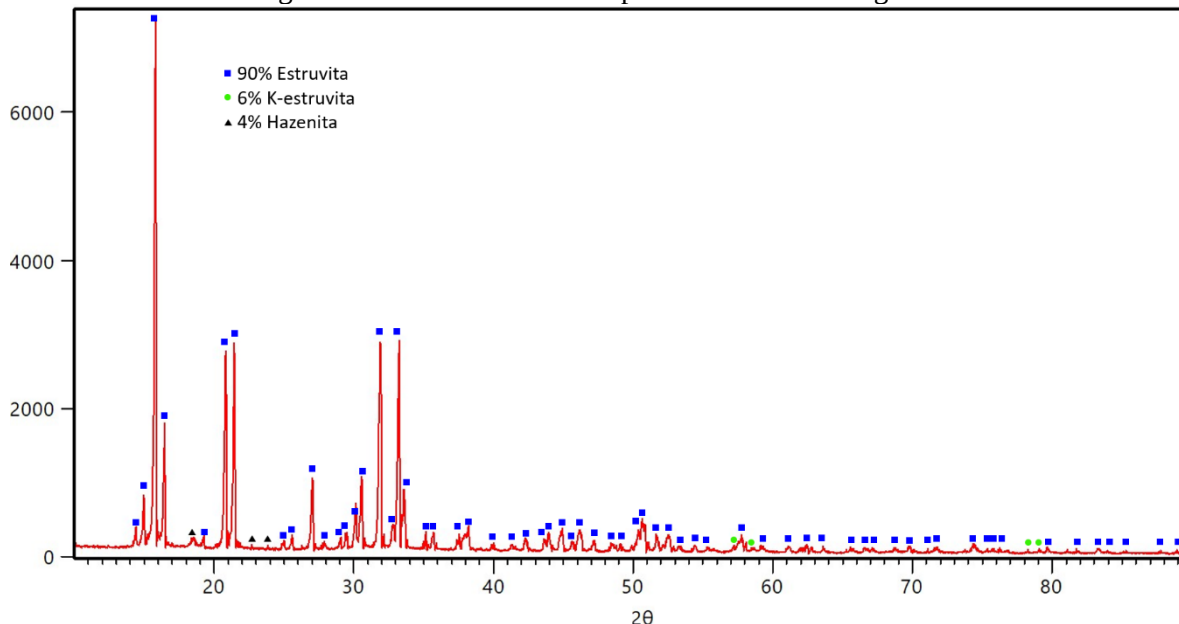
Após agitação seguida de repouso da mistura de urina com $Mg(OH)_2$, o decantado foi então filtrado, secado e pesado. Obteve-se 74,1 g de precipitado dos 29,75 litros de urina armazenada e decantada em 13/10/2024, sem contabilizar a totalidade dos precipitados formados naturalmente durante o período de armazenamento. A Figura 4 ilustra o resultado do processo de precipitação química, filtração e secagem do material obtido por cada batelada em 13/10/2024 seguida da mistura dos três componentes em mesmas proporções mássicas, anteriormente à sua aplicação nos girassóis. Trata-se de um material branco, tenro e com odor ameno.

Figura 4. Material filtrado seco, em processo de moagem



Para melhor caracterização deste material, foi feita a Difração de Raio X (DRX). Esta análise demonstrou que o material é cristalino, tendo como constituição cristalográfica predominante 90% de estruvita ($NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$), 6% de K-estruvita ($MgKPO_4 \cdot 6H_2O$) e 4% de hazenita ($KNaMg_2(PO_4)_2 \cdot 14H_2O$). A Figura 5 apresenta do resultado do difratograma obtido por DRX.

Figura 5: DRX do fertilizante aplicado na cultura de girassóis



Para a análise do afluente (ou seja, urina antes do ensaio de precipitação) e efluente (ou seja, pós-ensaio de precipitação) do processo, os resultados do ICP-OES estão presentes na Tabela 2, enquanto os resultados de IC estão na Tabela 3. Nas bateladas presentes nestas tabelas, a Batelada 3 é a mais antiga, se referindo a urina de aproximadamente 7 dias de armazenamento. Enquanto a Batelada 1 é a mais nova, de até 1 dia de armazenamento. A Batelada 2 corresponde a um tempo intermediário, de 4 a 5 dias de armazenamento.

Tabela 2. Resultado da análise elementar por Espectrômetro de Emissão Ótica (ICP-OES)

Elemento	Urina Fresca		Batelada 1		Batelada 2		Batelada 3	
			T0	TF	T0	TF	T0	TF
	Média	Desvio	Média	Média	Média	Média	Média	Média
Al	0,04	0,03	0,02	0,14	0,09	0,16	0,09	0,23
Ca	50,45	0,12	50,45	40,75	35,81	26,77	31,47	25,22
Cu	0,01	0,01	0,00	0,18	0,00	0,01	0,00	0,01
Fe	0,02	0,02	0,01	0,15	0,02	0,21	0,04	0,27
K	998,34	1,92	998,34	975,91	1202,43	1112,37	1436,16	1428,13
Mg	43,82	0,47	43,82	44,69	3,16	22,43	1,40	36,56
Mn	0,14	0,05	0,11	0,09	0,05	0,05	-	0,03
Ni	0,08	0,08	0,02	0,02	0,01	0,02	0,00	0,02
Zn	0,20	0,01	0,20	0,19	0,16	0,16	0,10	0,24
P	430,89	78,54	375,37	40,76	324,91	9,15	297,87	8,13
			Redução % de P	89%	Redução % de P	97%	Redução % de P	97%

T0: concentrações elementares do afluente ao ensaio de precipitação química (ppm); TF: concentrações elementares do efluente do ensaio de precipitação química (ppm).



Tabela 3. Resultado da análise de íons por Cromatografia Iônica (IC)

Íon	Urina Fresca		Batelada 1		Batelada 2		Batelada 3	
	Média	Desvio	T0	TF	T0	TF	T0	TF
Fluoreto	18,59	2,28	19,52	26,37	24,40	25,33	22,58	28,21
Cloreto	1978,80	879,49	1471,04	1506,63	2203,65	2098,77	3071,17	3183,43
Nitrito	97,74	3,92	97,74	103,34	178,92	174,73	145,87	148,33
Brometo	-	-	-	8,93	-	-	-	32,69
Nitrato	14,26	8,66	8,65	7,74	-	14,89	-	24,61
Fosfato	781,71	76,36	737,82	152,05	779,58	89,23	603,11	-
Sulfato	920,83	73,95	878,34	898,69	1017,98	973,17	1309,00	1300,15
Lítio	0,11	0,10	0,04	-	-	-	0,15	-
Sódio	1410,41	640,97	1040,45	1042,47	1338,59	1287,69	1930,80	1952,13
Amônio	511,73	28,78	495,34	260,93	800,50	667,27	1686,98	1502,00
Potássio	1039,67	14,39	1034,66	1036,27	1329,03	1256,66	1670,64	1681,77
Magnésio	99,69	2,96	98,62	131,53	88,77	107,74	93,74	156,05
Cálcio	141,39	17,19	134,57	111,79	162,63	131,53	217,96	206,78

T0: concentrações iônicas no afluente ao ensaio de precipitação química (mg/L); TF: concentrações iônicas no efluente do ensaio de precipitação química (mg/L).

Ambas as análises (ICP-OES e IC) destacam os altos teores de potássio, tanto antes quanto após a precipitação química. Isso indica que seria interessante um processo extra à precipitação da estruvita, com a finalidade de remover K, o qual possui valores apreciáveis no efluente.

Em termos de remoção de fósforo, a idade da urina não interfere na remoção química deste elemento. A remoção está muito mais associada à manutenção dos níveis de magnésio, de forma a possibilitar a precipitação química, do que fatores como a idade da urina, o qual demonstrou ser insignificante no período de tempo analisado. Notou-se também a presença de magnésio residual no efluente, o qual possuía concentrações maiores comparado ao afluente. De qualquer modo, o teor de 0,774 g/L $Mg(OH)_2$ P.M. 58,32g/mol proporcional ao volume de urina mostrou-se uma boa estimativa para precipitação de estruvita, levando em consideração a alta porcentagem de extração de P em todos os casos (desde urina mais recente até urina mais antiga). Tendo em vista que esta proporção se baseou em uma concentração padrão elementar de 400mg/L P e na estequiometria de $Mg:P = 1:1$, observa-se que este valor de 400mg/L P pode ser considerado em situações onde a medição de fósforo não foi realizada antes do ensaio de precipitação. Esta estimativa é especialmente útil quando se trata de processos de larga escala, os quais muitas vezes requerem padronização de alguns parâmetros com a finalidade de reduzir o custo em análises, aumentar o dinamismo dos processos e reduzir o tempo de processamento do produto. Além disso, urinas mais recentes são preferíveis para os ensaios, visto a menor liberação de gases fétidos. Somado a isso, também se notou um teor de magnésio residual maior nas bateladas mais antigas, mesmo usando a mesma proporção de reagente. Motivo este o qual reforça ainda mais o fato de ser interessante dar preferência para urinas mais recentes.

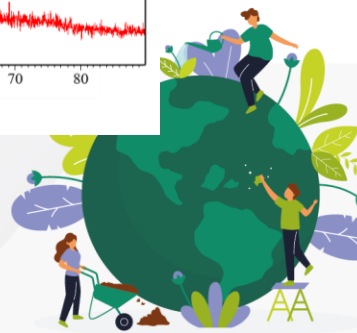
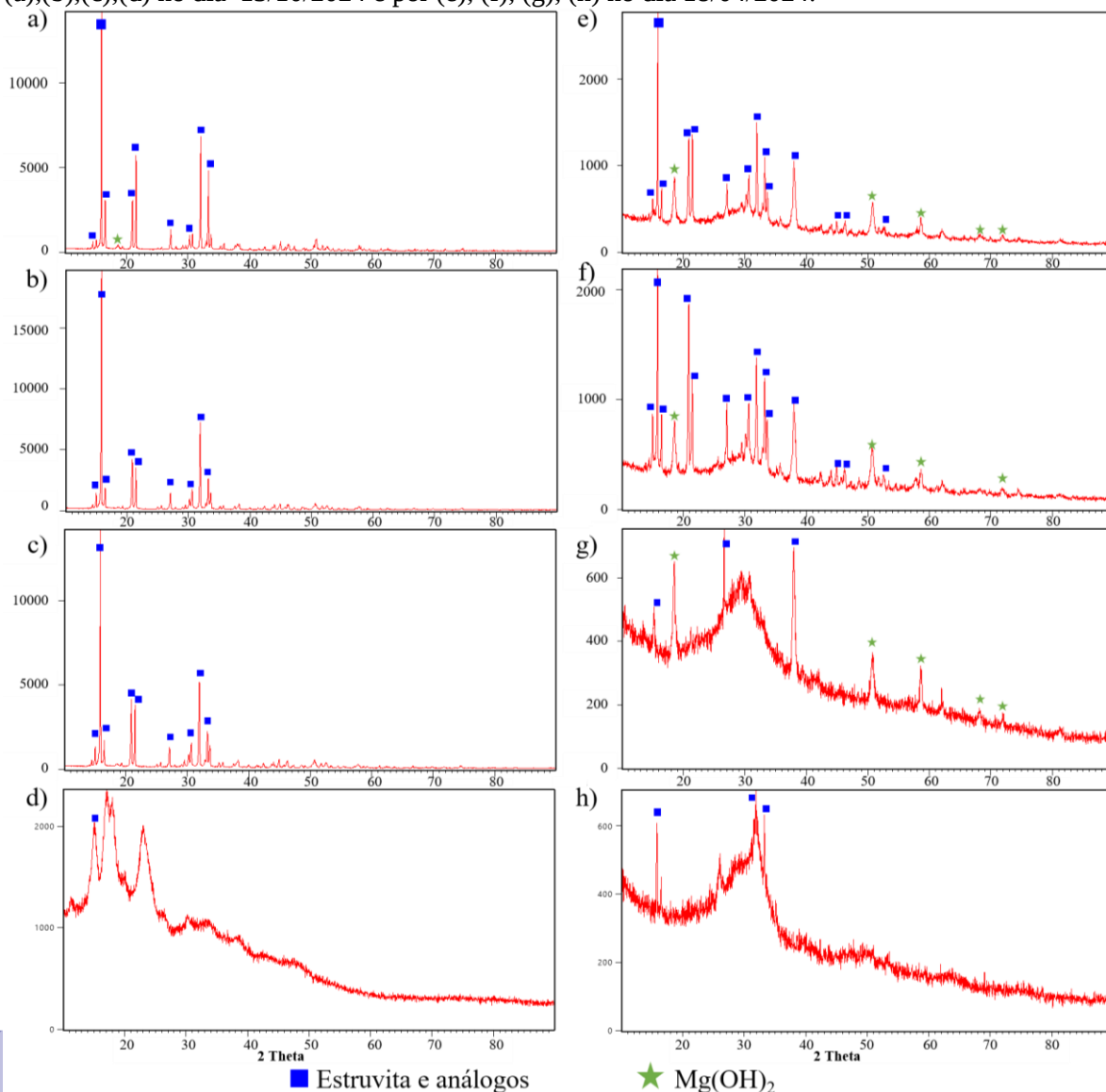
No que se refere à concentração de amônio, este não obteve uma queda tão brusca com a precipitação química comparada ao fosfato (Tabela 3). Dessa forma, o teor de precipitados contendo Potássio ao invés de Amônio (K-estruvita e hazenita) provavelmente se deve muito mais à alta concentração de Potássio do que à ausência do amônio em si. Normalmente o excedente de magnésio possibilita a precipitação de formas minerais com potássio, nutriente este que precipita apenas em condições de baixa concentração de amônio no líquido comparada ao teor total de potássio. Segundo SOARES et al. (2017), a redução do amônio na solução, após atividades como hidrólise ou degradação biológica, influem na precipitação de formas com potássio. Contudo, a previsibilidade da degradação das formas alternativas é complexa e nem sempre diretamente relacionável à degradação biológica. A análise DRX com Rietveld das bateladas isoladamente apresentou 100% de estruvita nas bateladas 2 e



3 (cujas idades de urina são mais antigas – Figura 6b e 6c), enquanto a batelada 1 (Figura 6a) apresentou também traços de formas análogas (K-estruvita e hazenita).

Além do ensaio de precipitação realizado para produção do fertilizante aplicado na cultura de girassóis (oriundo dos 29,75 litros de urina), também foi realizado um ensaio de precipitação, seguida de secagem acelerada (100°C por 1,5h), conforme anteriormente relatado. Como resultados do ensaio deste segundo momento, também foi possível identificar a predominância dos picos cristalinos (60% neste caso) como sendo estruvita – Figura 6e, 6f e 6g. Contudo, este segundo material também apresentou constituintes amorfos, os quais não foram analisados e $Mg(OH)_2$. Isso indica que o tempo de filtração de 24h seguida de secagem a 100°C por 1,5h não foi suficiente para a formação dos cristais, visto que não fornece o tempo necessário para os elementos se arranjam em estruturas cristalinas bem definidas, diferentemente do que ocorreu no primeiro ensaio seguido de secagem lenta (45°C por 24h) – cujo cristalograma está presente na Figura 5 e as bateladas nas Figura 6a, 6b e 6c –, apresentando um material bastante cristalino. Isso indica também a importância em se atentar para a cinética lenta de formação da estruvita, de forma a fornecer as condições suficientes de tempo e temperatura para a formação dos cristais desejados.

Figura 6. DRX por batelada 1, 2, 3 e precipitado natural, representados, respectivamente, por (a),(b),(c),(d) no dia 13/10/2024 e por (e), (f), (g), (h) no dia 18/04/2024.



Quanto às propriedades de disponibilização de nutrientes às plantas, ambos os fertilizantes (estruvitas e hazenita) são de liberação lenta (RANIRO, 2021), se solubilizando aos poucos no solo e disponibilizando os nutrientes ao longo do tempo, evitando assim maiores perdas do produto ao corpo hídrico. Além disso, em rotação de cultura, a presença de fertilizantes de liberação lenta, a depender das condições do solo, como porosidade ou declividade, pode ser bastante interessante para manter nutrientes residuais no solo, permitindo assim o acesso a esses nutrientes por demais culturas, sem necessidade de inserção de nutriente de forma muito frequente.

4.2. Crescimento vegetal

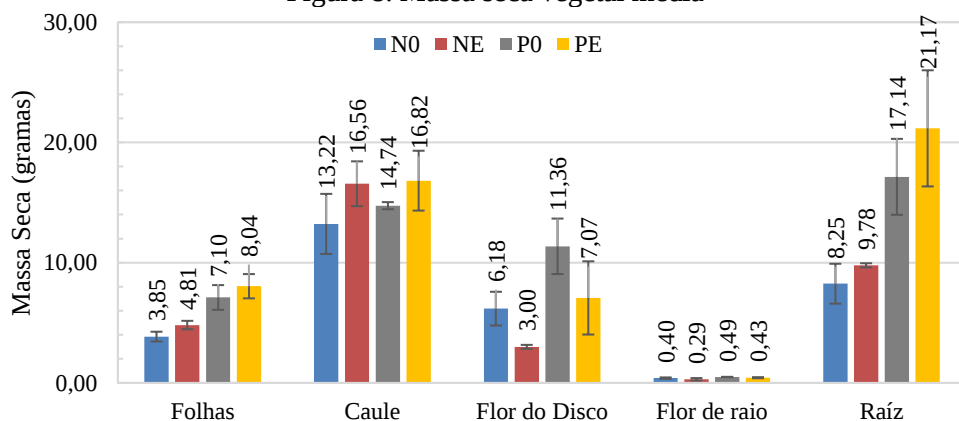
A Figura 7 apresenta o crescimento vegetal inicial para seleção das mudas viáveis. Das 96 sementes plantadas, nasceram 58 (Figura 7b). Ou seja, cerca de 60% das sementes mostraram-se viáveis para plantio. A Figura 7c apresenta o ponto de muda para o plantio.

Figura 7. a) semeadura em 05/10/23; b) estágio de desenvolvimento em 13/10/23; c) estágio de desenvolvimento em 28/10/23



Após o crescimento e corte da cultura, foi medida a massa seca (Figura 8).

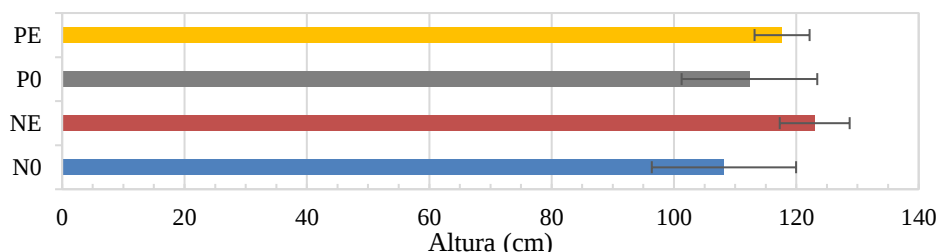
Figura 8. Massa seca vegetal média



Observa-se, na Figura 8, maior massa seca nas folhas, caule e raiz das plantas fertilizadas com estruvita, independentemente do tipo de solo (normal ou terra preta). O mesmo não ocorre com a inflorescência, que apresentou maior massas para os casos sem fertilização das estruvita. Esses resultados sugerem que a presença da estruvita tem expressão maior no desenvolvimento estrutural da planta e menor no desenvolvimento florístico para culturas de girassóis. Há que se realizar, contudo, novos testes com concentrações maiores de fertilizante, visto que foi adicionado apenas uma pequena quantidade ao início do experimento.

Da mesma maneira, conforme aponta a Figura 9, os resultados também indicam maior altura vegetal para os solos fertilizados com estruvita, seja terra preta, seja terra normal.

Figura 9. Altura vegetal média



No que se refere aos diâmetros de caule (DAP) e diâmetros de flor do disco, o primeiro não apresentou diferença significativa entre os resultados. Com exceção do N0, com 3,6 cm de DAP média, as demais tiveram resultados de aproximadamente 4 cm, com variação de 0,2 cm entre si (Tabela 4).

Tabela 4. DAP e Flor do disco, em centímetros.

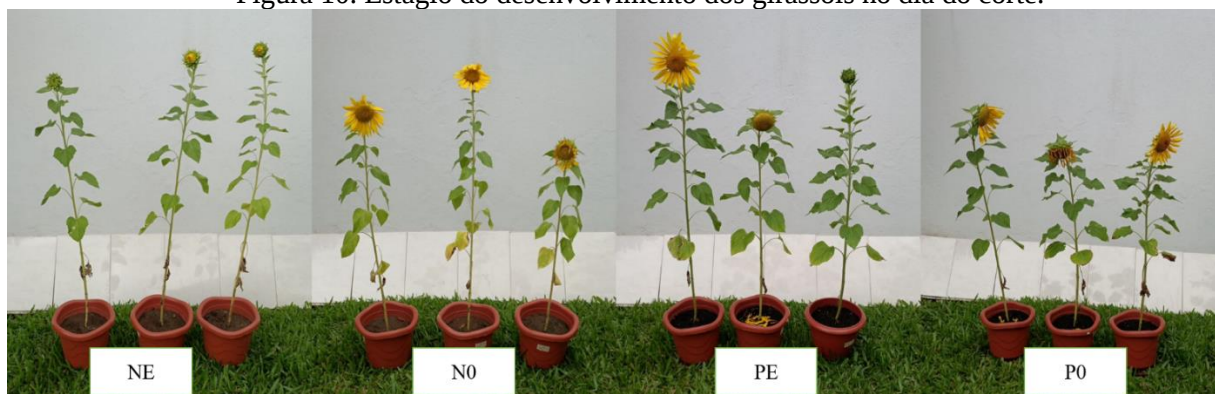
	N0	NE	P0	PE
DAP (cm)	3,6	4	4,2	4
Flor do disco (cm)	6,6	4,9	7,8	6,3

Com relação à Flor do disco, N0 apresentou 3 flores em uma de suas plantas. Tomando o maior diâmetro delas como referência e se realizando a média com as demais replicatas, se obteve uma média de 6,6 cm. Percebe-se, em termos de diâmetro de flor do disco, que a estruvita não contribui positivamente para o crescimento neste aspecto, produzindo flores de tamanho relativamente menores para o período de tempo analisado.

Observa-se que os resultados com estruvita geraram um crescimento da infrutescência mais tardio comparado aos resultados sem estruvita. Isto é possível de se observar nas amostras NE em relação às N0 (Figura 10). Já nas amostras PE, os resultados de crescimento florístico foram mais variáveis. Uma das características dos principais minerais encontrados no material precipitado de urina (estruvita e análogos) é a sua liberação lenta. Ao se comparar os resultados do presente trabalho com girassóis, tanto em termos estruturais quanto florísticos, com o trabalho desenvolvido por RANIRO (2021), observou-se que o desempenho da cultura frente a fertilizantes de liberação lenta, como esses dois minerais especificamente elencados, varia conforme a espécie vegetal e suas demandas nutricionais específicas. Em geral, percebe-se que fertilizantes de liberação lenta são bastante úteis para plantas que demandam crescimento estrutural, conforme se observa no trabalho desenvolvido pelo autor, o qual utiliza esses fertilizantes de liberação lenta para avaliar o seu desempenho em cultura de cana-de-açúcar. Como resultados, este autor observou que tais fontes recicladas de fósforo geraram desempenho superior na planta, em termos de recuperação de fósforo, comparado ao fertilizante convencional superfosfato triplo (TSP). Desta forma, destaca-se a importância das fontes recicladas de fósforo, dentre as quais a mais comum é a estruvita, como forma de otimizar o aproveitamento de fósforo pela planta por maior período, especialmente para culturas de mais longa duração, como a cana-de-açúcar, em comparação à cultura de girassol, que tem um ciclo de vida menor.



Figura 10. Estágio do desenvolvimento dos girassóis no dia do corte.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao explorar o potencial da estruvita proveniente da urina e de outros fertilizantes de liberação lenta, é possível promover práticas agrícolas mais sustentáveis, reduzindo a dependência de fertilizantes convencionais e ajudando a preservar os recursos minerais. Além de serem recursos renováveis, esses fertilizantes alternativos liberam nutrientes de forma gradual, minimizando as perdas para os corpos hídricos. Como consequência, por se tratarem de fontes alternativas, essas práticas contribuem tanto para a segurança alimentar global quanto para a conservação ambiental.

Ao compreender melhor o potencial da estruvita de urina (bem como demais fertilizante minerais de liberação lenta) na agricultura podemos promover práticas agrícolas mais sustentáveis e reduzir um pouco a dependência de fertilizantes minerais convencionais, buscando contribuir assim para a conservação do meio ambiente e para a segurança alimentar global, bem como prolongar a duração das reservas naturais de minérios usados na produção de fertilizantes.

Tendo em vista a importância mundial da cultura do girassol para biocombustíveis, alimentação e demais usos, bem como a importância em se investigar fontes alternativas de fertilizantes, este trabalho contribui com informações adicionais acerca do comportamento deste nutriente em seus tecidos: foliar, caulicular, radicular e inflorescência.

Como resultados gerais, observou-se um maior crescimento estrutural (foliar, caulicular e radicular) nas culturas fertilizadas com estruvita. O mesmo não ocorreu no desenvolvimento florístico, no qual observou-se um desenvolvimento predominantemente retardado nas culturas com estruvita em comparação com aquelas sem estruvita. Dessa forma, isso leva a inferir que a característica do fertilizante obtido do precipitado de urina, cuja disponibilização dos nutrientes é mais lenta que os fertilizantes convencionais, não prejudica o crescimento estrutural do girassol, diferentemente do crescimento florístico. Sendo assim, nas condições estudadas, a estruvita mostrou-se mais eficaz para o crescimento vegetativo do que para a floração.

Contudo, mais estudos são necessários, tais como testes com maiores dosagens de fertilizante a fim de se avaliar diferentes medidas responsivas. O resultado obtido para o fertilizante aplicado nos girassóis apontou uma pureza satisfatória para a estruvita (90% de estruvita seguida de formas análogas). Além da estruvita, seus análogos contendo potássio, como K-estruvita e hazenita, também podem ter contribuído para o crescimento vegetal. Do rol de estudos ainda necessários, abarca-se também estudos envolvendo ensaios com uma quantidade maior de girassóis e análises de tecido, a fim de entender de forma mais precisa quais nutrientes de fato fizeram algumas plantas terem desenvolvimento precoce ao invés de outras, elaborando-se assim análises cada vez mais complexas, robustas e aprofundadas. De qualquer modo, considerando a ausência de dados na literatura acerca da aplicação de estruvita (bem como demais fertilizantes de liberação lenta oriunda de águas residuárias)



em culturas de girassóis, este trabalho contribui com resultados promissores para este crescente campo de estudo.

Destaca-se também que a adição de $Mg(OH)_2$ à urina induziu a produção de cristais, no entanto, também deve-se prestar atenção às questões de cinética da produção do fertilizante, visto que o fertilizante analisado não é apenas de liberação lenta, mas também de cinética lenta quanto a sua produção. Logo, condições aceleradas de produção devem levar em conta uma temperatura máxima e tempo de secagem mínimo do processo, a depender do volume de material produzido. Neste estudo, temperaturas máximas de 45°C se mostraram adequadas para o exercício de secagem do material de forma a se produzir um fertilizante cristalino.

Agradecimentos

Os autores agradecem às instituições que apoiam os pesquisadores envolvidos neste estudo: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), financiadora de Estudos e Projetos (FINEP inovação e pesquisa).

6. REFERÊNCIAS E CITAÇÕES

BENNETT, A. M. *et al.* Improving potassium recovery with new solubility product values for K-struvite. **Journal of Environmental Engineering and Science**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 93–103, 2017.

CASTRO, C. de; CASTIGLIONI, V.B.R.; BALLA, A.; LEITE, P.M.V.B.de C.; KARAM, D.; MELLO, H.C.; GUEDES, L.C.A.; FARIAS, J.R.B. **A cultura do girassol**. Londrina, EMBRAPA-CNPSo. 1996. 38p. (EMBRAPA-CNPSo. Circular técnica. 13).

COE, F. L.; EVAN, A.; WORCESTER, E. Kidney stone disease. **Journal of Clinical Investigation**, v. 115, n. 10, p. 2598–2608, 2005.

DE MATOS, Antônio Teixeira. **Poluição ambiental: impactos no meio físico**. Editora UFV, 2020.

FILHO, N. B. B. **ESTRUVITA: IDENTIFICAÇÃO DE POTENCIAIS PERIGOS E EVENTOS PERIGOSOS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO, PERCEPÇÃO E ACEITABILIDADE DE AGRICULTORES QUANTO AO SEU USO AGRÍCOLA**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

GAZZOLA, A; FERREIRA JR, C.T.G; CUNHA, D.A.; BORTOLINI, E.; PAIAO, G.D.; PRIMIANO, I.V.; PESTANA, J.; D'ANDRÉA, M.S.C.; OLIVEIRA, M.S. **A CULTURA DO GIRASSOL**. 2012. ESALQ/USP, Piracicaba - SP, 2012. Disponível em <https://www.bibliotecaagptea.org.br/agricultura/culturas_anuais/livros/A%20CULTURA%20DO%20GIRASSOL.pdf>

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. Tradução: Ivanildo Hespanhol; José Carlos Mierzwa. 5. ed. Porto Alegre. AMGH: McGraw Hill Brasil, 2016.

MORITA, D. M.; AVILA, R. D. L.; AIDAR, F. N. Nucleação na formação de estruvita: estado da arte. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 4, p. 637–654, 2019.

NETO, M. R. B., DA SILVA, R. D. C. B., COELHO, F. J. S., SILVA, M. A. A., BORGES, T. S. H.. CARACTERIZAÇÃO DO GIRASSOL PARA BIOMASSA. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar – CBENS. **Anais CBENS 2018**. 2018. Gramado, RS: Associação Brasileira de Energia Solar. <https://doi.org/10.59627/cbens.2018.603>



NOBRE DE ALMEIDA, J. P. et al. Composição de substratos alternativos com capítulo de girassol na produção de mudas de mamoeiro. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 6, n. 1, p. 36, 2011.

NUNES, J. L. da S. **Importância da cultura do girassol**. 2020. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/culturas/girassol/informacoes-da-cultura/informacoes-gerais/importancia-da-cultura-do-girassol_438043.html> Acesso em: 4 abr. 2024.

VO, T.-D.-H. *et al.* Effects of storage conditions, pH and Mg:P ratio on the precipitation process for phosphate recovery. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 5, p. 100188, 2022.

RANIRO, H. R. **Phosphate sources derived from wastewater and sewage sludge: agronomic potential**. 2021. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2021. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-10092021-083907/>>. Acesso em: 4 abr. 2024.

RIBEIRO, J. L.; BARRETO, A. L. H. **Girassol: a importância da cultura**. EMBRAPA, 2017. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1081210/girassol-a-importancia-da-cultura>>. Acesso em: 4 abr. 2024.

SOARES, A. et al. Nutrients recovery from wastewater streams. In: LEMA, J. M.; SUAREZ, S. (org.). **Innovative Wastewater Treatment & Resource Recovery Technologies: Impacts on Energy, Economy and Environment**. IWAed. IWA Publishing, 2017. p. 369–398.

UNGARO, M. R. G. Girassol - Importância e utilização. 2017. Disponível em: <<https://sitioduascachoeiras.org.br/girassol-importancia-e-utilizacao/>>. Acesso em: 4 abr. 2024.

YEE, R. A. **The Occurrence of Residual Biological and Chemical Hazards in Recovered Struvite from Blackwater**. 2018. - University of Alberta, Canada, 2018.

