

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Jonata dos Santos

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO DA URINA
SEPARADA NA FONTE POR MEIO DE UMA ESTAÇÃO CENTRALIZADA: estudo
de caso do município de Florianópolis**

Florianópolis

2024

Jonata dos Santos

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO DA URINA
SEPARADA NA FONTE POR MEIO DE UMA ESTAÇÃO CENTRALIZADA: estudo
de caso do município de Florianópolis**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de
Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Sanitária e Ambiental
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Elisa Magri.

Florianópolis

2024

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

Santos, Jonata dos
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO DA
URINA SEPARADA NA FONTE POR MEIO DE UMA ESTAÇÃO
CENTRALIZADA :estudo de caso do município de
Florianópolis / Jonata dos Santos ; orientadora, Maria
Elisa Magri, 2024.
68 p.

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

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Recuperação de
nutrientes. 3. Urina. 4. Saneamento Ecológico. 5.
Estruvita. I. Magri, Maria Elisa. II. Universidade Federal
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental. III. Título.

Jonata dos Santos

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO DA URINA
SEPARADA NA FONTE POR MEIO DE UMA ESTAÇÃO CENTRALIZADA: estudo
de caso do município de Florianópolis**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 03 de Julho de 2024.

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof^ª. Maria Elisa Magri, Dr^ª.
Orientador(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^ª. Juscelia Padilha.
Avaliadora
IFSC Câmpus Xanxerê

Prof. Nelson Libardi Junior, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a todos que de alguma forma se esforçaram para melhorar o mundo.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer imensamente a minha mãe Chirlen, irmã Juliana e cunhado e amigo Alexandre, os quais são simplesmente as melhores pessoas que poderiam existir, me apoiaram durante todos esses anos de graduação e fizeram com que tudo isso fosse possível.

Agradeço também aos meus colegas e amigos, por serem algumas das pessoas mais incríveis que já conheci e por toda parceria durante esse tempo. Em especial aos excepcionais Suelen, Ana Luiza, Rafaela, Renata, Fabrício, Rafael, Marcelo, Vinícius, Tiago, Luana, Julia e Felipe.

A professora e orientadora Dr^a Maria Elisa Magri, pelo auxílio no desenvolvimento desse trabalho e pelas aulas inspiradoras que me fizeram escolher esse tema, além de todos os outros professores que tive durante o curso, pelo empenho e qualidade do ensino.

Por fim, uma menção especial aos senhores Akira Toriyama, Kazuki Takahashi, Funky Black Cat e LuanGameplay, pelos momentos de alegria proporcionados, que foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

Este estudo investigou a recuperação de fósforo da urina segregada na fonte por meio de uma estação centralizada em Florianópolis, com uso de dados secundários obtidos em pesquisas científicas. Foram analisando três cenários: instituições de ensino públicas, instituições de ensino públicas, privadas e grandes geradores, e toda a população do município. No primeiro cenário, a segregação em instituições de ensino públicas permitiu a recuperação de 1,94 toneladas de fósforo e 9,71 toneladas de estruvita por ano. No segundo, expandido para instituições privadas e grandes geradores, a recuperação foi de 3,43 toneladas de fósforo e 17,17 toneladas de estruvita anuais. No terceiro cenário, envolvendo toda a população, foram recuperadas 79,41 toneladas de fósforo e 397,06 toneladas de estruvita por ano. O tratamento escolhido foi a precipitação de estruvita e água do mar como fonte de magnésio, com custos operacionais positivos de R\$ 7.373,00, R\$ 13.048,00 e R\$ 301.682,00 anuais para os três cenários, respectivamente, com o preço de venda da estruvita a R\$ 2,50 por kg. Custos de operação podem ser reduzidos com energia solar e outros métodos. A recuperação de fósforo mostrou-se uma boa solução para a ciclagem de nutrientes e redução da dependência de fertilizantes tradicionais, embora desafios como a falta de sanitários segregadores, transporte eficiente e falta de legislação específica precisam ser superados.

Palavras-chave: Recuperação de nutrientes; fósforo; urina; saneamento ecológico; estruvita.

ABSTRACT

This study investigated the recovery of phosphorus from source-separated urine through a centralized station in Florianópolis, using secondary data obtained from scientific research. Three scenarios were analyzed: public educational institutions, public and private educational institutions along with large generators, and the entire population of the municipality. In the first scenario, segregation in public educational institutions allowed for the recovery of 1.94 tons of phosphorus and 9.71 tons of struvite per year. In the second scenario, expanded to include private institutions and large generators, the recovery was 3.43 tons of phosphorus and 17.17 tons of struvite annually. In the third scenario, involving the entire population, 79.41 tons of phosphorus and 397.06 tons of struvite were recovered per year. The chosen treatment was struvite precipitation, using seawater as the magnesium source, with positive operational costs of R\$ 7,373.00, R\$ 13,048.00, and R\$ 301,682.00 per year for the three scenarios, respectively, with the selling price of struvite at R\$ 2.50 per kg. Operational costs can be reduced with solar energy and other methods. Phosphorus recovery proved to be a good solution for nutrient cycling and reducing dependence on synthetic fertilizers, although challenges such as the lack of segregating toilets, efficient transport, and specific legislation need to be overcome.

Keywords: Nutrient recovery; phosphorus; urine; ecological sanitation; struvite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do percurso de nutrientes predominante atualmente.	19
Figura 2 – Sanitário segregador com descarga a água (direita) e sanitário segregador seco (esquerda)	22
Figura 3 – Esquema de funcionamento dos sanitários segregadores seco e com descarga.....	22
Figura 4 – Esquema do manejo da urina segregada na fonte com tratamento em estação centralizada.....	31
Figura 5 – Esquema processo de precipitação de estruvita com dosagem de Mg automática .	39
Figura 6 – Mapa de localização do município de Florianópolis.	43
Figura 7 – Estimativa da redução do consumo de água em Florianópolis devido aos sanitários segregadores	50
Figura 8 - Esquema de manejo das excretas humanas proposto para Florianópolis	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relação entre as condições de armazenamento, prováveis patógenos e culturas recomendadas	35
Quadro 2 – Dados sobre as ETE de Florianópolis.....	44
Quadro 3 - Resumo das vantagens e desvantagens da segregação da urina com recuperação de fósforo em estação centralizada.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Concentrações médias de nutrientes na urina humana.	25
Tabela 2 – Caracterização qualitativa da urina humana in natura (campanha de coleta de 24h).	26
Tabela 3 – Eficiência da precipitação de estruvita da urina de acordo com a fonte de Mg	36
Tabela 4 – Número de estudantes e docentes de instituições de ensino públicas de Florianópolis.	45
Tabela 5 – Número de estudantes e docentes de escolas e universidades (públicas e privadas) de Florianópolis	46
Tabela 6 – Circulação de pessoas em milhões por ano.	46
Tabela 7 – Médias do volume de urina excretados diariamente por uma pessoa adulta.	49
Tabela 8 – Volume de urina gerado pelos diferentes grupos analisados.....	50
Tabela 9 – Concentração média de fósforo total na urina humana	51
Tabela 10 – Massa de fósforo excretado nos diferentes grupos analisados	52
Tabela 11 – Massa de fósforo recuperada e de estruvita produzida em cada cenário	52
Tabela 12 – Estimativa dos custos operacionais e da receita venda de estruvita recuperada em uma estação centralizada	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRASCE	Associação Brasileira de Shopping Centers
EAWAG	Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Inep	Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira
OMS	Organização Mundial de Saúde
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral.....	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	Revisão bibliográfica	18
2.1	SANEAMENTO ECOLÓGICO.....	18
2.2	MODOS DE FECHAR O CICLO DOS NUTRIENTES	20
2.3	SEPARAÇÃO DE EXCRETAS NA FONTE.....	21
2.4	CARACTERIZAÇÃO DA URINA	23
2.4.1	Características quantitativas	24
2.4.2	Características físico-químicas	24
2.4.3	Características biológicas.....	27
2.5	PRECIPITAÇÃO DE ESTRUVITA	28
2.6	LEGISLAÇÃO	29
2.7	ETAPAS PARA RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO DA URINA SEPARADA NA FONTE EM MEIO URBANO	29
2.7.1	Coleta	31
2.7.2	Estocagem.....	32
2.7.3	Transporte	34
2.7.4	Tratamento	34
2.7.4.1	<i>Higienização.....</i>	34
2.7.4.2	<i>Recuperação de fósforo</i>	35
2.7.4.3	<i>Secagem.....</i>	39
2.7.4.4	<i>Remoção de Micropoluentes.....</i>	40
2.7.5	Aplicação	40

3	METODOLOGIA.....	42
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO.....	42
3.2	CENÁRIOS ANALISADOS.....	45
3.3	LEVANTAMENTO DE DADOS EM DIFERENTES CENÁRIOS.....	45
3.4	ANÁLISE DE CUSTOS.....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1	RESULTADOS EM DIFERENTES CENÁRIOS.....	49
4.2	POTENCIAL DE FÓSFORO A SER RECUPERADO.....	52
4.3	CUSTOS.....	53
4.4	MANEJO PROPOSTO PARA URINA SEPARADA NA FONTE EM FLORIANÓPOLIS.....	55
4.5	VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	58
5	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS.....	61
	APÊNDICE A – Tabela de Cálculos.....	15

1 INTRODUÇÃO

A recuperação de nutrientes a partir de excretas humanas tem ganhado destaque como uma alternativa sustentável para a agricultura e a gestão de resíduos. A crescente demanda por fertilizantes, associada à escassez de recursos naturais e aos impactos ambientais negativos causados pela produção de fertilizantes tradicionais, torna essencial a busca por soluções inovadoras e ecologicamente viáveis. Entre essas soluções, a recuperação de fósforo a partir da urina humana surge como uma estratégia promissora, dada a alta concentração deste nutriente nas excretas e os benefícios associados ao seu reaproveitamento.

Historicamente, o fósforo é um elemento vital para o crescimento das plantas e, portanto, crucial para a agricultura. No entanto, as reservas naturais de fosfato, das quais são produzidos fertilizantes, estão se esgotando rapidamente, estimativas indicam que as reservas naturais só conseguiriam suprir a demanda mundial atual por mais 350 anos (IFA; ARGUS, 2023). Além disso, a mineração e o processamento do fosfato causam significativos danos ambientais, incluindo a contaminação de corpos hídricos e a emissão de gases de efeito estufa. Dessa forma, a recuperação de fósforo de fontes alternativas, como a urina humana, apresenta-se como uma solução sustentável e necessária para mitigar esses problemas (ZHANG; LIU; SONG, 2022).

Outro problema advindo da dinâmica atual de uso de fertilizantes são as perdas econômicas, já que o Brasil importa mais de 80% da sua demanda por fertilizantes (BRASIL, 2020a), pois a maioria das reservas disponíveis estão concentradas em poucos países, sendo os principais, China, Rússia e Marrocos (IFA; ARGUS, 2023). Uma das formas de reduzir os impactos causados pela produção de fertilizantes sem reduzir seu consumo é o reaproveitamento dos elementos que o compõem, com sua reinserção na cadeia produtiva, promovendo a cadeia de produção circular.

Uma das principais fontes para recuperação de nutrientes são as excretas humanas, por possuírem altas concentrações, representando cerca de 22% da demanda de fósforo global, segundo Mihelcic, Fry e Shaw (2011). A urina humana contém cerca de 50% a 65% do fósforo excretado pelo corpo e representa apenas 1% do volume dos efluentes domésticos, sendo um recurso potencialmente valioso para a produção de fertilizantes (LARSEN; UDERT; LIENERT, 2013). A separação da urina na fonte e seu tratamento específico podem facilitar a recuperação eficiente deste nutriente, transformando resíduos em recursos valiosos. Além disso,

essa prática contribui para a economia circular, onde resíduos são reciclados e reintegrados ao ciclo produtivo, reduzindo a dependência de recursos naturais não renováveis.

Em termos ambientais, a recuperação de fósforo a partir da urina pode ajudar a mitigar a eutrofização de corpos hídricos, um problema significativo causado pela descarga de efluentes ricos em nutrientes sem tratamento adequado (SHARPLEY et al., 2015). A eutrofização leva à proliferação excessiva de algas, que consomem oxigênio e prejudicam a vida aquática. A remoção do fósforo antes que a urina seja descartada no sistema de esgoto pode prevenir este fenômeno, promovendo a saúde dos ecossistemas aquáticos.

Além dos benefícios ambientais, a recuperação de fósforo da urina pode trazer vantagens econômicas e operacionais para os sistemas de saneamento. A separação da urina na fonte reduz a carga de nutrientes nos sistemas de tratamento de esgoto, melhorando sua eficiência e diminuindo os custos operacionais (MATAR et al., 2022). Isso é particularmente relevante em áreas urbanas densamente povoadas, onde os sistemas de tratamento precisam tratar grandes volumes de efluentes.

Este trabalho se propõe a investigar o potencial de recuperação de fósforo da urina humana em Florianópolis. A análise será realizada considerando diferentes cenários de coleta de urina separada na fonte, visando avaliar as vantagens e principais desafios da implementação de uma estação centralizada para a recuperação de fósforo em Florianópolis. Os cenários analisados focam em ambientes com grande circulação de pessoas e pela presença de mictórios nos banheiros masculinos, facilitando a coleta da urina. Além disso, instituições como escolas e universidades são locais ideais para a disseminação de tecnologias sustentáveis, contribuindo para a formação de uma sociedade mais consciente e ambientalmente responsável.

Ao abordar esses aspectos, este estudo pretende contribuir e estimular a implementação de sistemas de recuperação de fósforo a partir da urina humana, promovendo a sustentabilidade e a eficiência na gestão de recursos. A transição para práticas mais sustentáveis no manejo de excretas humanas é essencial para enfrentar os desafios ambientais atuais e futuros, garantindo a disponibilidade de nutrientes para a agricultura e a proteção dos ecossistemas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de recuperação de fósforo da urina humana no município de Florianópolis por meio de uma estação centralizada, em diferentes cenários de coleta de urina segregada na fonte.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estimar a carga de fósforo excretada por meio da urina em Florianópolis, em três cenários de implantação de sistemas hidráulicos de coleta separada na fonte;
- Propor alternativas de manejo e processamento da urina para recuperação de fósforo em uma estação centralizada;
- Identificar vantagens e desvantagens da recuperação de fósforo da urina segregada na fonte em grande escala;
- Estimar custos para recuperação de fósforo da urina por meio da precipitação de estruvita em uma estação centralizada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SANEAMENTO ECOLÓGICO

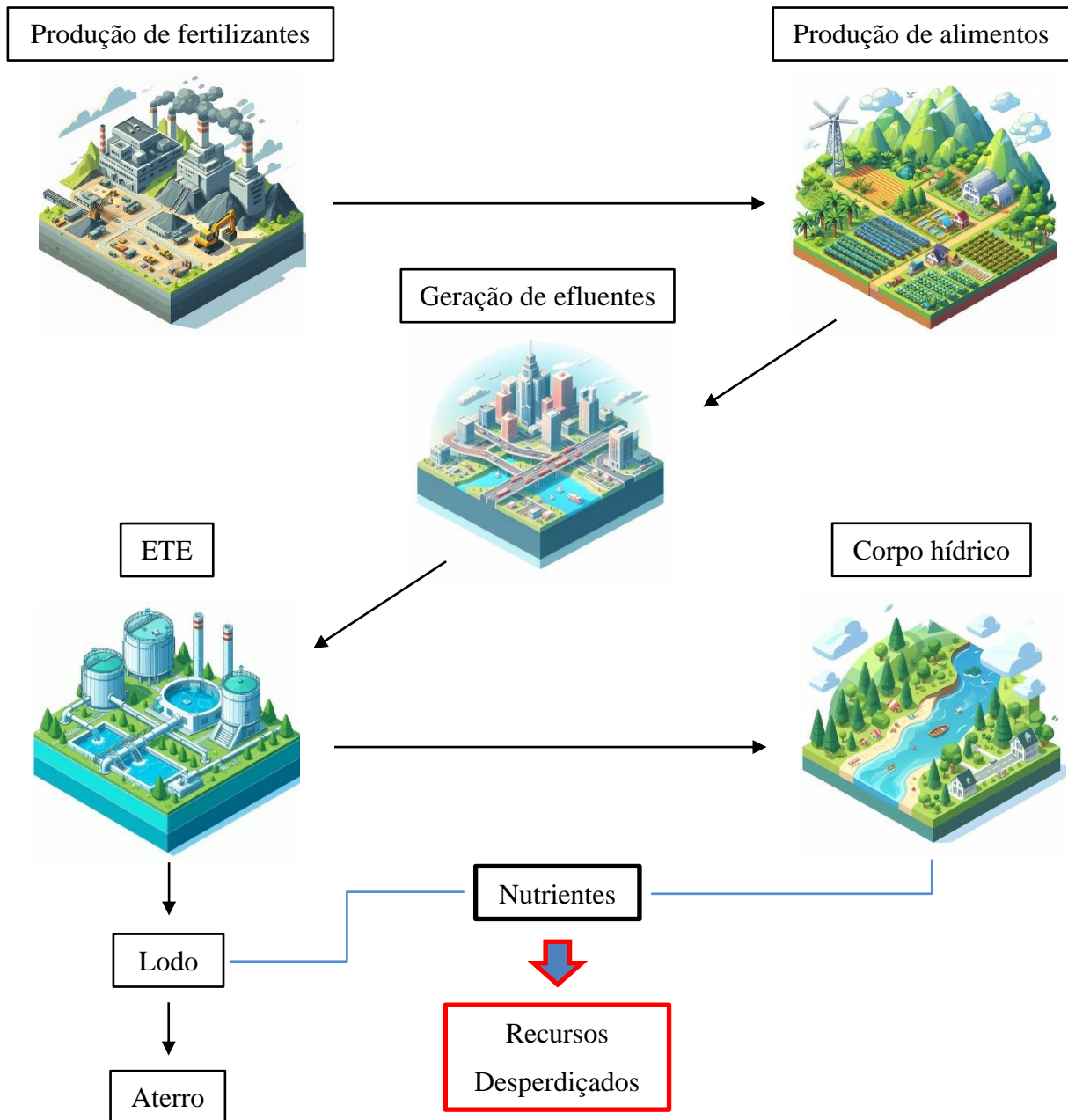
A concentração de pessoas em grandes centros urbanos fez a falta de saneamento se tornar um grande problema social e ambiental. Entre o século V e XVIII a maioria das excretas dos habitantes das cidades europeias eram jogadas nas ruas, o que era responsável pela disseminação de diversas doenças. No Brasil a situação não foi muito diferente, sendo palco de diversas epidemias nos centros urbanos a medida que a população crescia, com agravante do clima tropical, que favorece a propagação de diversos patógenos e vetores doenças (LENS; ZEEMAN; LETTINGA, 2015).

Como uma forma de tentar evitar novas epidemias e outros problemas sanitários, surgiu o movimento higienista sanitarista em meados do século XIX. Esse movimento consistia em uma resposta a problemas de saúde pública e as condições insalubres das cidades após a revolução industrial. As ideias higienistas influenciaram políticas públicas de saúde, levando à criação de sistemas de abastecimento de água potável, sistemas de esgoto, regulamentações sanitárias, e melhorias nas condições de habitação e trabalho. Além disso, o higienismo também teve um impacto significativo no campo da medicina, promovendo a importância da prevenção e da higiene pessoal no cuidado da saúde (FARIAS FILHO; ALVIM, 2022).

Apesar dos avanços alcançados no saneamento devido ao higienismo, o tratamento convencional de efluentes foi fundamentado em uma filosofia que considera as excretas humanas como “lixo”, algo sem valor que deve ser afastado o mais rápido possível das pessoas (ESREY et al., 2001). O tratamento convencional consiste no transporte das excretas pela água, muitas vezes por vários quilômetros de tubulação, até uma estação de tratamento de esgoto (ETE), onde ocorre o tratamento biológico e posterior despejo do efluente tratado em um corpo hídrico. Esse tipo de tratamento fim-de-tubo não promove nenhum reaproveitamento de recursos no processo, apenas promove a redução dos impactos ambientais em relação ao efluente despejado in natura (LANGERGRABER; MUELLEGGER, 2005).

Essa situação é um problema especialmente do ponto de vista da ciclagem de nutrientes, já que nas ETE convencionais os nutrientes provenientes da cadeia alimentar humana terminam em corpos hídricos ou aterros industriais, promovendo um percurso linear (HUANG et al., 2017), assim representado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema do percurso de nutrientes predominante atualmente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O manejo atual dos efluentes sanitários causa diversos problemas ambientais, entre eles a eutrofização dos corpos hídricos, devido à grande carga de nutrientes remanescentes do tratamento, as emissões de carbono promovidas pela mineração de fosfato para produção de fertilizantes, o excesso de água potável e energia elétrica utilizadas para o transporte das excretas, dificuldades no tratamento devido à alta diluição do efluente, etc. (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009).

Como investida para solução desse e de diversos outros problemas surgiu o conceito de saneamento ecológico (EcoSan), podendo também ser chamado de saneamento focado na recuperação de recursos. Consiste na combinação de tecnologias tradicionais e modernas, bem como em princípios ecológicos, para tratar eficientemente os resíduos humanos e reaproveitar os nutrientes de forma sustentável, visando a promoção da circularidade (LANGERGRABER; MUELLEGGER, 2005). Devido ao conceito de Saneamento Ecológico, as ETE estão progressivamente passando a ser consideradas estações de recuperação de recursos, o que inclui produção de energia, recuperação de água e de nutrientes (BESSON et al., 2024). Contudo, os nutrientes podem ser recuperados de diversas formas e em diversas etapas de seu percurso, por isso se faz necessário avaliar as melhores opções para cada realidade.

2.2 MODOS DE FECHAR O CICLO DOS NUTRIENTES

Achar meios de recuperar nutrientes das excretas humanas para que possam ser utilizados como fertilizantes na agricultura e assim promover a circularidade na cadeia alimentar humana é essencial. Essa prática não só reduz os impactos ambientais provenientes do despejo dos efluentes sanitários, mas também prolonga a vida útil das reservas de recursos não renováveis utilizados na fabricação de fertilizantes tradicionais (ALEMAYEHU; ASFAW; TERFIE, 2020).

Algumas tecnologias que podem ser utilizadas para promover a circularidade dos nutrientes excretados pelas pessoas incluem a precipitação química, utilização do lodo de ETE na agricultura, biodesfosfatação para produção de fertilizantes ou alimentos, utilização do efluente tratado na agricultura, segregação das excretas, compostagem, entre outras. Cada uma dessas tecnologias possui suas características específicas e situações em que seu uso é mais vantajoso, dependendo de fatores como a escala de aplicação, infraestrutura disponível e tipo de cultura agrícola a ser beneficiada.

Dentre essas tecnologias, a recuperação de nutrientes da urina segregada na fonte vem se destacando nos últimos anos devido aos seus vários benefícios. O período de 2011 a 2021, se comparado ao de 2001 a 2010, apresentou um aumento significativo no número de artigos científicos publicados relacionados à separação da urina na fonte e tecnologias para recuperação dos nutrientes da urina, de 94,9% e 671,4% respectivamente (ALIAHMAD et al., 2022). Esse crescimento evidencia o interesse crescente e a viabilidade técnica dessa tecnologia.

2.3 SEPARAÇÃO DE EXCRETAS NA FONTE

A separação de excretas humanas na fonte é uma abordagem ecológica no tratamento de resíduos humanos, que visa separar eficientemente a urina e as fezes desde o ponto de origem. Sua concepção fundamenta-se no reconhecimento da necessidade de uma gestão mais eficaz dos resíduos humanos, visando tanto a preservação do meio ambiente quanto a otimização dos recursos disponíveis.

As práticas para separar a urina do fluxo de águas residuais têm uma longa história de aplicação em várias regiões do mundo, lugares como China, Iêmen e alguns lugares da Europa já fazem a separação da urina das fezes há muito tempo, com objetivos que variam entre a reutilização de nutrientes na agricultura e a facilidade no manejo e tratamento de uma fração fecal seca mais higiênica (JOHANSSON, 2000).

Consiste no princípio da separação física das excretas, a partir do momento da descarga. Isso é alcançado por meio de uma infraestrutura de encanamento adaptada e de dispositivos específicos instalados nas instalações sanitárias. Esses dispositivos são projetados para direcionar a urina e as fezes para caminhos distintos, permitindo assim o tratamento separado de cada tipo de resíduo.

Os vasos sanitários separadores podem secos ou com descarga, o primeiro possui a vantagem de não necessitar de água, pode funcionar por gravidade ou a vácuo, as excretas ficam armazenadas em contentores na parte inferior da edificação até que sejam propriamente manejadas. Já o segundo modelo usa a água para transporte das excretas, tem a vantagem de usar menos água para transporte da urina se comparado com um sanitário tradicional. Geralmente é utilizado em lugares atendidos por estação de tratamento de esgoto, as fezes são direcionadas para ETE enquanto a urina pode ser segregada e armazenada na edificação até que seja reaproveitada.

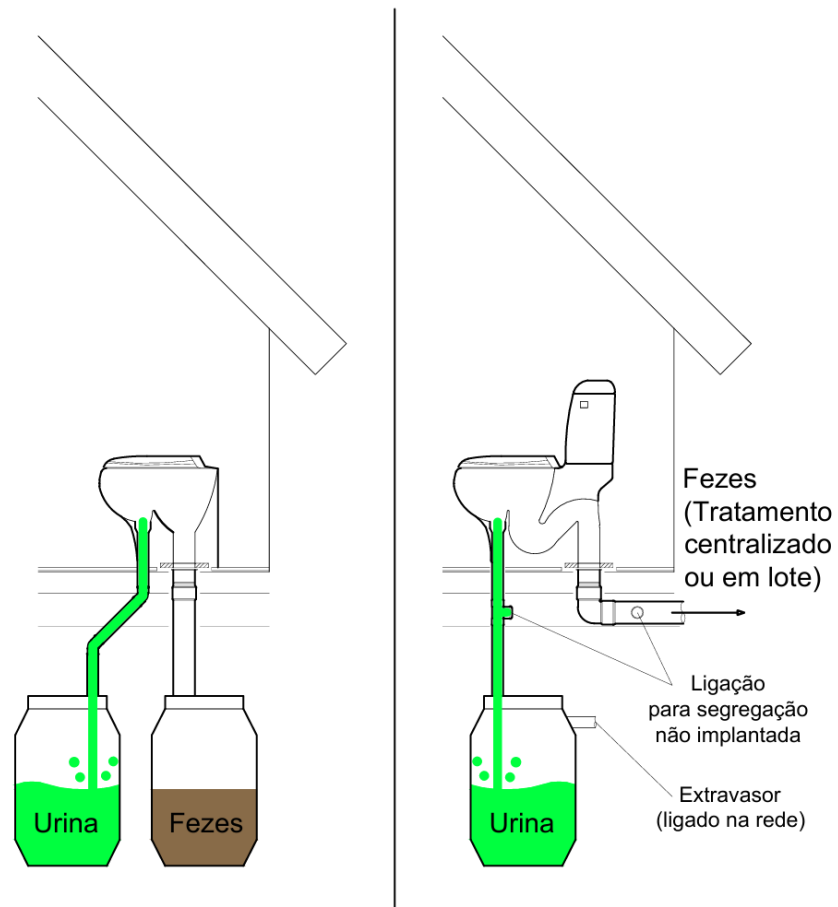
A Figura 2 apresenta um sanitário segregador de banheiro seco (direita) de um projeto-piloto que fez parte de um estudo desenvolvido por Magri (2013), foi instalado Centro de Treinamento (CETRE) da Empresa de Pesquisa e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri) e um sanitário segregador com descarga (esquerda) comercializado pela Roediger Vacuum GmbH, sediada na Alemanha. Já a Figura 3 contém um desenho esquemático do funcionamento desses vasos sanitários.

Figura 2 – Sanitário segregador com descarga a água (direita) e sanitário segregador seco (esquerda)



Fonte: MAGRI (2013) e Roediger Vacuum GmbH (2024).

Figura 3 – Esquema de funcionamento dos sanitários segregadores seco e com descarga



Fonte: Elaborado pelo autor.

A aceitação pública de vasos sanitários segregadores enfrentam diversos desafios, apesar das vantagens ambientais e econômicas do seu uso, muitas pessoas reagem inicialmente com ceticismo à ideia de separação de urina, segundo Lienert (2007) no 63º relatório do *Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology* (EAWAG). Além disso, há a preocupação de que os agricultores se oporiam ao uso de fertilizantes à base de urina e que os consumidores não comprariam produtos cultivados com esses fertilizantes.

Um estudo conduzido na Suécia por MCCONVILLE; METSON; PERSSON, (2023) analisou a aceitação do público no uso de fertilizantes derivados da excreta humana. As pessoas se mostraram favoráveis ao uso desses fertilizantes na agricultura, os resultados mostraram 85% das pessoas foram a favor do uso de fertilizante a base de estruvita em plantas não comestíveis e que 67% das pessoas comeriam plantas fertilizadas com esse fertilizante.

Outros estudos, realizados com agricultores demonstrou que 57% dos agricultores da Suécia achavam fertilizantes a base de urina uma boa ideia, enquanto 78% dos agricultores da Alemanha achavam uma boa ideia, as maiores preocupações foram com a presença de micropoluentes e fármacos (LIENERT et al., 2003; MUSKOLUS; ELLMER, 2007).

Um questionário realizado com 480 pessoas por Lienert (2007) demonstrou que a informação é um importante fator para a aceitação de sanitários separadores pelo público. Somente 41% das pessoas que não haviam lido nenhuma informação sobre os sanitários separadores os achavam uma boa ideia, enquanto para as que leram esse número subiu para 74%.

Para superar as preocupações com higiene, odor e manutenção, é necessário que a indústria sanitária melhore os designs, funcionalidades e aumente a oferta dos vasos segregadores. Soluções técnicas que reduzam os problemas de entupimento e melhorem a eficiência de limpeza são cruciais para aumentar a aceitação pública.

Algumas alternativas para reduzir a resistência aos sanitários segregadores podem ser a implantação de projetos piloto em instituições com grande fluxo de pessoas, onde o odor e manutenção afetam menos o usuário e a instalação em escolas, para disseminar informações sobre o benefício ambiental de tais equipamentos.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DA URINA

A urina humana é um fluido residual do organismo, é proveniente da filtração do sangue pelos rins e excretado pela uretra, é caracterizando-se pela presença de compostos de

baixo peso molecular, uma vez que as proteínas não são permeáveis ao processo de filtração renal (KARAK; BHATTACHARYYA, 2011).

Composta principalmente de água (cerca de 95%), a urina também contém uma variedade de substâncias dissolvidas, incluindo sais, ureia, creatinina, ácido úrico, e outros metabólitos.(ALEMAYEHU; ASFAW; TERFIE, 2020). A presença de outras substâncias como metais pesados e resíduos de pesticidas são muito baixos nas excretas, principalmente na urina, que contém apenas 10% dos elementos traços eliminados, a concentração depende diretamente da quantidade presente nos alimentos consumidos (BLANCO BENÁ FILHO, 2019; JÖNSSON et al., 2004).

Diferentemente dos metais pesados, grande parte dos hormônios produzidos e ingeridos por meio de medicamentos são excretados pela urina, entretanto, são hormônios semelhantes aos excretados por outros mamíferos, o que fez com que os microorganismos presentes no solo se adaptassem ao longo do tempo para degradar essas substâncias. O mesmo não aconteceu em corpos hídricos, que tiveram uma exposição muito menor no decorrer do tempo, tornando a separação da urina na fonte ainda mais interessante se comparado ao tratamento convencional (JÖNSSON et al., 2004).

2.4.1 Características quantitativas

Segundo Rauch et al. (2003) o volume de urina excretado por uma pessoa é de aproximadamente 1,5 litros por dia, com flutuações entre 1,0 e 2,5 L, quantidade que varia principalmente devido à quantidade de líquido ingerido e perdas por transpiração. Ao ano o volume de urina seria de cerca de 550 L por pessoa, o que representa o mesmo valor em massa, cerca de 550 kg, já que a densidade da urina é próxima da água, variando de 1,010 a 1,030 kg/L (BLANCO BENÁ FILHO, 2019; SCHÖNNING; LEEMING; STENSTRÖM, 2002). Não se observou diferenças significativas entre a quantidade de urina excretada entre homens, mulheres e idosos, contudo, o volume para crianças de até 10 anos foi de 700 mL, cerca da metade do valor em relação aos outros indivíduos (ZANCHETA, 2007).

2.4.2 Características físico-químicas

A urina contém a maioria dos nutrientes provenientes das excretas humanas, cerca de 80–90% do total de nitrogênio (N), 50–80% de fósforo (P) e 80–90% de potássio (K) enquanto

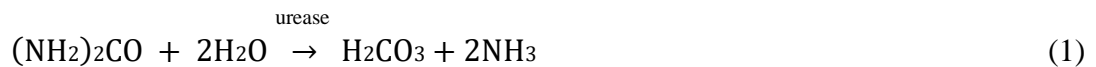
representa apenas 1% do volume de esgoto convencional, o que faz com que tenha grande potencial de reaproveitamento.(JÖNSSON et al., 1997; JÖNSSON et al., 2004; VINNERÅS, 2001).

Na Tabela 1 é possível observar a quantidade de N, P e K excretados por uma pessoa ao ano por meio da urina.

Tabela 1 – Concentrações médias de nutrientes na urina humana.

Autor	Fósforo (Kg.p⁻¹a⁻¹)	Nitrogênio (Kg.p⁻¹a⁻¹)	Potássio (Kg.p⁻¹a⁻¹)
KIRCHMANN; PETTERSSON, (1995)	0,8	3,4	0,9
JÖNSSON et al., (1997)	0,2	1,8	0,5
MAURER; SCHWEGLER; LARSEN, (2003)	0,2	3,2	0,8
FITTSCHEN; HAHN, (1998)	0,3	3,9	0,9
(VINNERÅS, 2001)	0,3	4,0	1,1

O nitrogênio é um dos nutrientes mais abundantes encontrados na urina, aproximadamente 85% do nitrogênio excretado está na presente na forma de ureia (CO(NH₂)₂), o qual é não volátil, porém na presença da urease a ureia é rapidamente degradada em amônia e íons bicarbonato (equação 1), sendo a amônia uma substância volátil e responsável pelo odor característico da urina (SENECAL; VINNERÅS, 2017).



A urease é uma enzima cuja função é catalisar a hidrólise da ureia, é produzida por diversos microorganismos e geralmente se acumula no sistema de canalização do esgoto doméstico, fazendo com que a ureia seja hidrolisada em apenas algumas horas, causando mau odor (CIURLI et al., 1999; SCHÖNNING; LEEMING; STENSTRÖM, 2002).

O pH da urina fresca varia de neutro para levemente ácido, como pode ser observado na Tabela 2, que se trata dos resultados obtidos da análise da urina de uma campanha de coleta conduzida por MAGRI, (2013).

Tabela 2 – Caracterização qualitativa da urina humana in natura (campanha de coleta de 24h).

Parâmetros	Urina masculina 24h	Urina feminina 24h
pH	5,84	6,12
Alcalinidade (mg.L⁻¹ CaCO₃)	1120	1160
CE (mS.cm⁻¹)	25	25
DBO₅ (mg.L⁻¹)	4260	5020
DQO t (mg.L⁻¹)	10170	8430
N-NO₄⁺ (mg.L⁻¹)	1700	875
N-NO₂⁻ (mg.L⁻¹)	0,0	0,0
N-NO₃⁻ (mg.L⁻¹)	18	16
NTK (mg.L⁻¹)	4592	5012
N orgânico (mg.L⁻¹)	2892	4137
NT (mg.L⁻¹)	4610	5028
P-PO₄⁻³ (mg.L⁻¹)	638	408
SST (mg.L⁻¹)	400	430
ST (mg.L⁻¹)	26495	27109
STF (mg.L⁻¹)	13322	11767
STV (mg.L⁻¹)	13172	15341
Coliformes totais (NMP.100L⁻¹)	2,4E+03	4,1E+03
<i>Escherichia coli</i> (NMP.100L⁻¹)	Nd ³	Nd ³
<i>Enterococcus faecalis</i> (NMP.100L⁻¹)	Nd ³	Nd ³

Fonte: MAGRI, (2013).

O pH da urina armazenada tende a aumentar com o tempo, devido aos íons hidróxidos produzidos durante a hidrólise da ureia. Segundo estudo conduzido por Botto, (2013) em apenas cinco dias após a coleta, o pH da urina já se estabilizou. Inicialmente, os valores do pH variam entre 6,7 e 7,9, equilibrando-se depois na faixa de 9,5 a 9,9.

De acordo com Münch e Winker (2011), o aumento do pH da urina armazenada, que ocorre naturalmente com o tempo, é responsável pela precipitação de cristais de estruvita e fosfato de cálcio na presença de magnésio e cálcio.

2.4.3 Características biológicas

A urina armazenada na bexiga humana é estéril em indivíduos saudáveis, porém, podem ocorrer contaminações no seu percurso para fora ou nas superfícies que entrar em contato em seguida, que podem conter patógenos advindos principalmente das fezes, já que elas contêm a maioria dos patógenos excretados pelos humanos (LANGERGRABER; MUELLEGGER, 2005; MAGRI, 2013; WINKER, 2009).

Alguns patógenos podem ser transmitidos pela urina caso o indivíduo esteja contaminado, mas apenas o *Schistosoma haema tobiium* representa um risco considerável no contexto de reuso da urina humana segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2006). Este patógeno se trata de um verme que pode causar a esquistossomose, o qual é uma doença tropical negligenciada, no entanto, o risco de transmissão é baixo e se concentra em algumas regiões endêmicas (MONNIER et al., 2020; OMS, 2006). O principal problema relacionado a transmissão de patógenos pelo reuso da urina está na contaminação cruzada com as fezes (KARAK; BHATTACHARYYA, 2011), em um estudo conduzido por Schönning, Leeming e Stenström, (2002), 22 a 37% das amostras de urina armazenada apresentaram contaminação por fezes.

Os principais fatores que influenciam a permanência de organismos na urina são o pH, amônia, diluição, temperatura e o tempo de armazenamento (OMS, 2006). Como visto anteriormente, o pH da urina armazenada tende a aumentar com o tempo, criando um ambiente mais hostil aos microorganismos presentes, logo, apenas armazenar a urina em tanques ou recipientes selados por tempo suficiente se mostrou uma maneira simples, barata e eficiente de higienizar a urina (SCHÖNNING; STENSTRÖM, 2004). O tempo ideal de armazenamento varia principalmente com o uso pretendido da urina e a temperatura ambiente, segundo Jönsson (2000). O armazenamento de ao menos 6 meses a uma temperatura não inferior a 20°C se mostrou eficiente para eliminação de todos os organismos, para o caso de mesmo tempo e temperatura não inferior a 4°C alguns vírus ainda poderiam ser encontrados, ainda assim, a utilização da urina em culturas de alimentos que não são consumidos crus, foi considerada segura.

2.5 PRECIPITAÇÃO DE ESTRUVITA

A precipitação de estruvita é uma das tecnologias mais promissoras para recuperação de fósforo da urina humana, em razão do grande número de estudos publicados, da sua alta eficácia e simplicidade (CIEŚLIK; KONIECZKA, 2017). Tem sido objeto de pesquisa e desenvolvimento devido ao seu potencial para recuperar fósforo de forma sustentável e reduzir a poluição ambiental causada pela descarga de urina em sistemas de esgoto convencionais. Essa tecnologia tem aplicabilidade em diversas áreas, incluindo tratamento de águas residuais, agricultura e indústria.

A estruvita é um composto de fosfato de amônio e magnésio hexa-hidratado ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), se forma a partir da solução aquosa quando as concentrações dos íons amônio (NH_4^+), fosfato (PO_4^{3-}) e magnésio (Mg_2^+) excedem a sua solubilidade, como mostrado na equação de formação da estruvita (2), sendo $n = 0, 1$ ou 2 (LE CORRE et al., 2009). Este fenômeno é particularmente relevante em sistemas aquáticos, como águas residuais, e em sistemas de tratamento de águas e efluentes industriais, onde a presença desses íons em concentrações elevadas pode levar à formação de incrustações indesejadas em tubulações e equipamentos.



A formação de cristais de estruvita foi observada pela primeira em 1937, acumulado em tubulações de um sistema de tratamento de águas residuais. Desde então sua principal aplicação está sendo no tratamento de efluentes industriais, com intuito de evitar incrustações nas tubulações, atingir parâmetros de qualidade e/ou recuperar fósforo para reutilizá-lo como insumo em processos produtivos (LE CORRE et al., 2009).

Os fatores que influenciam a precipitação de estruvita incluem pH, temperatura, concentração de íons metálicos (principalmente magnésio) e a concentração de íons fosfato. O pH da solução desempenha um papel crucial na formação de estruvita, pois afeta a disponibilidade dos íons em solução. Em geral, a faixa de pH favorável para a precipitação de estruvita é de aproximadamente 8 a 10. Valores de pH mais elevados promovem a formação de íons de hidroxila (OH^-) que reagem com o fosfato e o amônio para formar estruvita (XIA et al., 2016).

A temperatura também influencia a cinética de precipitação, com temperaturas mais elevadas geralmente acelerando o processo de formação de estruvita (LE CORRE et al., 2009). A relação molar entre os íons presentes na solução (amônio, fosfato e magnésio) é outro fator determinante na precipitação de estruvita e no formato de seus cristais (FRANCO, 2020). Uma proporção molar ideal entre esses íons é necessária para que a formação de estruvita ocorra de maneira eficiente.

2.6 LEGISLAÇÃO

Poucos países possuem regulamentações para o uso de excretas humanas na agricultura. Alguns dos mais avançados nessa área são a Suécia e Finlândia, que apesar de ainda não possuírem legislações específicas, já permitem o uso de excretas na agricultura por meio de permissões excepcionais (KUISMA, 2008).

No Brasil, o uso de excretas humanas como fertilizante é um tema complexo e relativamente restrito devido a preocupações sanitárias, ambientais e regulatórias. Atualmente, não há uma legislação específica que permita explicitamente o uso direto de excretas humanas como fertilizante na agricultura, apenas há regimentos como a Lei 6.894/80 e um conjunto de instruções normativas que regulamentam a inspeção, fiscalização, produção e comércio de fertilizantes no país.

Contudo, existem regulamentações e diretrizes que abordam o reaproveitamento do lodo residual do tratamento de esgoto, como a Resolução CONAMA n.º 498, de 19 de agosto de 2020, que *“Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências”* (BRASIL, 2020, p. 1).

2.7 ETAPAS PARA RECUPERAÇÃO DE FÓSFORO DA URINA SEPARADA NA FONTE EM MEIO URBANO

Atualmente o reaproveitamento dos nutrientes da urina humana na agricultura não é muito praticado, mesmo em locais com grande atividade agrícola (ALEMAYEHU; ASFAW; TERFIE, 2020), se restringe a poucos locais com coleta em edificações multifamiliares e residências rurais com posterior transporte e utilização in natura em plantações, principalmente em países como Suécia e China. Esse manejo apresenta alguns desafios em centros urbanos mais densamente povoados, sendo o principal as grandes distâncias e volumes a serem

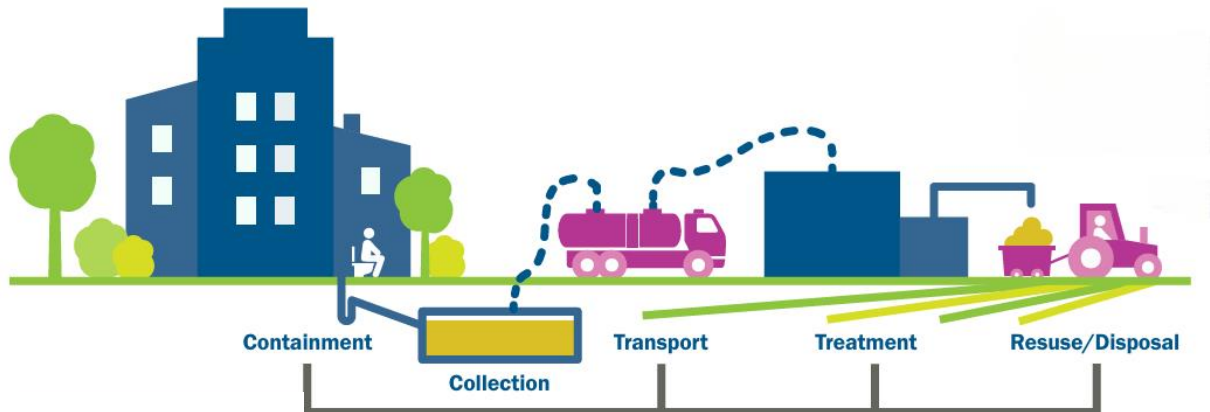
transportados até a área de cultivo, tornando os custos muito elevados, além de reduzir a aceitação do agricultor, que terá que lidar com um fertilizante consideravelmente menos concentrado que os convencionais e com risco de estar contaminado com patógenos.

Uma estação centralizada para recuperação de fósforo é uma alternativa para centros urbanos, devido à logística mais simplificada. Centralizar o processo de recuperação de fósforo simplifica a logística de coleta, transporte e armazenamento da urina bruta e dos produtos finais. Isso reduz a complexidade operacional e os custos associados à gestão de múltiplas instalações. Outros benefícios de uma estação centralizada para processamento da urina são o maior controle sobre os processos de recuperação de fósforo, a maior facilidade na implementação de padrões de qualidade consistentes, resultando em produtos finais mais confiáveis e de melhor qualidade.

Para o fósforo poder ser recuperado da urina da maneira mais eficiente possível, ele deve estar concentrado e não contaminado com fezes, para tal a sua segregação no ato de excreção se mostra a melhor alternativa. O uso de vasos sanitários segregadores é uma ótima alternativa tanto para locais com boa infraestrutura de saneamento quanto para lugares sem acesso ao mesmo, pois apresentam vantagens mesmo que não se tenha intuito de recuperar nutrientes. Entre elas estão a não necessidade de instalações complexas, economia de água e eficiência na higienização das excretas (SENECAL; VINNERÅS, 2017).

O manejo da urina segregada na fonte pode sofrer variações conforme a forma de reaproveitamento e características locais, mas no caso do processamento em uma estação centralizada, é semelhante ao que é feito no tratamento de efluentes em lote por meio de tanque séptico. A urina é armazenada na propriedade em um reservatório subterrâneo impermeável, após cheio é coletada por um caminhão especializado que transportará a urina até uma estação centralizada, que tratará o efluente de modo a recuperar o fósforo para produção de fertilizantes, como representado na Figura 4.

Figura 4 – Esquema do manejo da urina segregada na fonte com tratamento em estação centralizada



Fonte: SATTERTHWAITE et al., (2019).

2.7.1 Coleta

A coleta da urina separada na fonte consiste em equipamentos capazes de desviar as fezes e urina evitando sua mistura, são essencialmente vasos sanitários separadores e mictórios. Os mictórios são uma tecnologia bem disseminada no Brasil, presentes na maioria dos ambientes públicos de grande movimento, principalmente devido à economia de água que proporciona em relação a um sanitário convencional. Coletar a urina dos mictórios se mostra a primeira e mais fácil alternativa para dar início ao reaproveitamento do fósforo em larga escala, pois já estão implantados em diversos ambientes de grande fluxo de pessoas, não necessitam de grandes alterações das instalações hidráulicas e já possuem grande aceitação social. O principal problema dos mictórios é sua viabilidade apenas nos banheiros masculinos e a não coleta da urina excretada no ato de defecar, reduzindo consideravelmente o potencial de recuperação do fósforo.

Uma alternativa para aumentar o potencial de coleta da urina é a substituição dos sanitários convencionais por sanitários separadores. Podem ser sanitários separados secos ou com descarga, mas como visto anteriormente, um dos principais desafios do uso dessa tecnologia é a aceitação do público, logo, a utilização de sanitários com descarga em um cenário de tentativa de disseminação do seu uso e do conhecimento da sua importância (em um local que não sofra com problemas de falta de água), se mostra a primeira vista, a alternativa mais indicada.

Um problema dos sanitários segregadores com descarga é sua baixa oferta, durante a execução desta monografia não foram encontrados vasos sanitários desse tipo para comercialização no Brasil. Países como Suécia, Suíça e Alemanha já possuem empresas que comercializam esses sanitários, sendo algumas delas *Dubblotten, Gustavsberg, Roediger e Wost Man Ecology*.

Outro problema desses sanitários é a diluição da urina pela adição da água da descarga, aumentando o volume e conseqüentemente os custos de transporte, além de aumentar potencialmente a precipitação espontânea de estruvita e outros sólidos, causada pela adição de magnésio e demais minerais presentes na água. Apesar da água fornecida pelas companhias de saneamento possuir magnésio, a concentração é inferior à concentração de magnésio naturalmente presente na urina, o que faz com que a mistura diluída de água tenha uma concentração de magnésio menor que a urina pura. Essa condição faz com que ocorra menos precipitação na urina diluída em relação à urina não diluída, apesar da adição de minerais pela água, segundo relatório publicado pelo EAWAG, (2007). De acordo com UDERT; LARSEN; GUJER, (2003) foram cristalizados 1400 mg de sais em 1 litro de urina não diluída, enquanto na urina com diluição na proporção 1:1 foram 900 mg.

Sanitários segregadores com descarga permitem que a atual infraestrutura de ETE continue sendo utilizado no tratamento das fezes, com a vantagem de reduzir a diluição do efluente, além de também poder receber eventualmente a urina que seja redirecionada devido ao enchimento do reservatório.

2.7.2 Estocagem

A estocagem da urina segregada é uma importante etapa para o bom funcionamento do sistema, é responsável por evitar a contaminação da urina pelo ambiente, bem como que o inverso aconteça. Consiste em um sistema de tubulação adicional ao de transporte de fezes, que levará a urina até um reservatório em que ficará armazenada até o transporte para algum tratamento ou uso final.

A tubulação para condução da urina é a mesma de um sistema convencional, com a vantagem de poder ter um diâmetro menor, já que o volume a ser transportado será menor. Contudo, recomenda-se o menor uso de curvas possível, além de sempre manter a tubulação inclinada em no mínimo 1% para sistemas com vários sanitários interligados em um único

tanque e 4% para sanitários individuais, com intuito de minimizar incrustações devido à precipitação (MÜNCH; WINKER, 2011).

Os dispositivos utilizados para armazenar a urina podem ser pequenos contentores (geralmente de até 20 L), de fácil acesso, que podem ser removidos do sistema para transporte, são mais utilizados em pequenos sistemas, seu manejo requer um contato mais próximo da urina o que pode aumentar o risco de contaminação. Uma alternativa utilizada para armazenar a urina são grandes reservatórios subterrâneos capazes de acomodar um volume maior.

O volume do reservatório dependerá do espaço disponível, número de usuários do sistema, urina produzida por usuário ao dia, fração de tempo que o usuário permanece no local e tempo de armazenamento desejado, logo, o volume pode ser estimado por meio da equação 6 (MÜNCH; WINKER, 2011).

Recomenda-se o tempo de armazenamento mínimo de 30 dias para sistemas com vários sanitários, para reduzir custos e tráfego de caminhões.

$$V = N * t * f * (p + n * vd) \quad (3)$$

Onde:

V = volume (L);

N = número de usuários;

t = tempo de armazenamento desejado (d);

f = fração do dia em que o usuário permanece no local;

p = produção de urina por usuário ao dia ($1,5 \text{ L} \cdot \text{u}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$);

n = número de descargas diárias (5 - 6);

vd = volume de cada descarga (L).

O reservatório deve ser projetado com um extravasor para prevenir situações de transbordamento. Este extravasor pode ser conectado tanto à rede de coleta de esgoto quanto a um sistema de tratamento em lote, dependendo da infraestrutura disponível e das necessidades específicas do projeto. Além disso, é imprescindível a instalação de uma válvula de retenção. Esta válvula tem a função de evitar a contaminação da urina em casos de entupimento da rede à qual o reservatório está conectado. Assim, garantimos que o sistema opere de maneira segura e higiênica.

2.7.3 Transporte

O transporte da urina armazenada em tanques subterrâneos pode ser feito com caminhões limpa fossa convencionais, porém devem ser limpos antes da coleta para evitar contaminações.

Uma das principais desvantagens do reaproveitamento de urina segregada na fonte é aumento de tráfego de veículos e o consumo de diesel para tal, mas segundo Johansson, (2000) caso a distância de deslocamento for inferior a 95 km, esse sistema se mostra mais eficiente, apresentando menor consumo energético graças a redução no consumo nas ETE convencionais e produção de fertilizantes tradicionais.

2.7.4 Tratamento

O tratamento utilizado dependerá dos objetivos que se deseja obter com o tratamento da urina, bem como tecnologias disponíveis e custos do processo. Nesse estudo serão descritos e indicados tratamentos para obtenção de um fertilizante a base de estruvita, contudo é possível obter outras substâncias da urina, inclusive utilizá-la diretamente na agricultura após sua estabilização e higienização.

2.7.4.1 Higienização

A urina pode conter patógenos, principalmente devido à contaminação por fezes, tornando necessário sua higienização. A higienização de um líquido pode ser feita por meio de calor, UV, alta pressão, substâncias químicas capazes de matar os patógenos, entre outros métodos. No entanto, nenhuma dessas alternativas é atrativa para a higienização da urina, devido aos altos custos de energia elétrica e insumos.

Para a higienização da urina, aproveita-se a característica de elevação do pH com o tempo, devido à hidrólise da ureia. O alto pH resultante é responsável por eliminar os patógenos, tornando necessário apenas armazenar a urina por tempo suficiente para ser higienizada adequadamente. Este método é mais econômico e sustentável comparado aos métodos tradicionais.

O tempo de armazenamento da urina dependerá de sua utilização final. O Quadro 2 apresenta o tempo de armazenamento proposto por Johansson, (2000) para o uso da urina in

natura como fertilizante, conforme o tipo de cultura que irá recebê-la. Para culturas comestíveis, por exemplo, o tempo de armazenamento deve ser mais longo para garantir a completa eliminação de patógenos. Em contraste, para culturas não comestíveis, o tempo de armazenamento pode ser relativamente mais curto.

Quadro 1 – Relação entre as condições de armazenamento, prováveis patógenos e culturas recomendadas

Temperatura de armazenamento	Periodo de armazenamento	Patógenos prováveis na urina após o armazenamento	Culturas recomendadas
4°C	≥ 1 mês	Vírus, protozoários	Culturas alimentares e de forragem que serão processadas
4°C	≥ 6 meses	Vírus	Culturas alimentares que serão processadas e culturas de forragem
20°C	≥ 1 mês	Vírus	Culturas alimentares que serão processadas e culturas de forragem
20°C	≥ 6 meses	Provavelmente nenhum	Todos tipos de cultura

Fonte: JOHANSSON, (2000).

O tempo de armazenamento e sua respectiva recomendação foram feitas considerando a aplicação in natura da urina com o armazenamento como a única forma de higienização, em caso da adição de outras formas de higienização e diferentes processamentos da urina o tempo de armazenamento necessário pode variar.

2.7.4.2 Recuperação de fósforo

A recuperação do fósforo da urina pode ser feito de diversas formas, porém, o método mais utilizado é por meio da precipitação de minerais fosfóricos, dentre eles a estruvita. Esse método é amplamente utilizado devido a sua relativa simplicidade, necessitando apenas a adição de uma fonte externa de magnésio, desde que o pH esteja em um valor adequado.

A razão molar entre o Mg, o fósforo e o pH da solução são os principais fatores que influenciam na precipitação de estruvita, variam conforme a fonte de Mg e as condições operacionais do reator. Na Tabela 3 encontram-se as eficiências obtidas por diversos autores em diferentes condições de operação.

Tabela 3 – Eficiência da precipitação de estruvita da urina de acordo com a fonte de Mg

	Fonte de Mg	Concentração inicial de P (mg/L)	pH	Razão molar Mg/P	P precipitado (%)
LIU et al., (2013)	Água do mar	344	9,3	1,1	99,0
		680	9,2	0,3	95,4
RUBIO-RINCÓN et al., (2014)	Água do mar	680	9,0	1,3	99,9
		680	9,0	1,6	99,9
		680	9,0	3,9	99,9
FRANCO, (2020)	MgCl ₂	322	9,1	3,3	92,0
	Sal marinho	322	9,1	3,2	86,3
BRADFORD-HARTKE; RAZMJOU; GREGORY, (2021)	Água do mar	100	8,5	1,3	76,4
	Salmoura	100	8,5	1,3	95,9
AGUADO et al., (2019)	MgCl ₂	196	8,8	1,0	>90
	Água do mar	196	8,8	1,0	>90
BARBOSA et al., (2016)	Mg(OH) ₂	550	8,5	1,5	93
	MgCl ₂	550	8,5	2,0	89
	MgO	550	8,5	2,0	99

Pode-se observar que independente da fonte de Mg utilizado, a porcentagem de fósforo recuperado ficou entre 85 e 99% nas condições de pH e razão molar otimizadas para a maioria dos estudos. Logo, o custo da fonte de Mg se torna o principal característica de sua escolha, podendo representar 50 a 70% dos custos de produção (SHADDEL et al., 2020).

Um estudo realizado no Nepal comparando os custos entre a utilização de granulado de sulfato de magnésio hepta-hidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), magnesita (MgCO_3) e a salmoura residual remanescente após a extração de sal (NaCl) da água do mar, como fontes de Mg para a recuperação de fósforo da urina por meio da precipitação de estruvita, feito por Etter et al., (2011) demonstrou ser possível obter lucro ou pelo menos reduzir consideravelmente os custos de operação ao utilizar uma fonte de Mg de baixo custo. Para o MgSO_4 se obteve um prejuízo de R\$ 46,80 ao ano, considerando 4.000 L de urina processada por dia, produção anual de 1.400 kg de estruvita com valor de mercado de R\$ 0,74 (valores convertidos com base na cotação da rupia nepalesa para real de 0,018:1 de 2011), já para a salmoura e magnesita obteve lucro de R\$ 327,60 e R\$ 577,80 respectivamente, para as mesmas condições. A análise de custos não considerou despesas de transporte e de mão de obra, o que faz com que em um cenário real seja necessário processar uma quantidade consideravelmente maior de urina para zerar as despesas ou obter lucro. Outro estudo feito por Pinatha, Polprasert e Englande (2020) obteve margem de lucro de R\$ 2,48 a R\$ 8,48 por kg de cristais de fósforo recuperado (valores convertidos com base na cotação do dólar americano para real de 4,06:1 de 2011), utilizando sal marinho, contudo, só se considerou os custos dos insumos e energia elétrica.

Além dos custos do Mg, o impacto ambiental de sua produção também deve ser considerado para que o saldo ambiental da recuperação do fósforo da urina seja positivo. É necessário escolher fontes de Mg que possuam o menor processamento industrial e que estejam próximas do local de utilização, ótimas alternativas são o sal marinho, salmoura e água do mar in natura, pois apresentam grandes quantidades de Mg, são abundantes e geralmente apresentam baixo custo de obtenção. Segundo Shaddel et al., (2020) a pegada de carbono da utilização da água do mar para produção de estruvita é entre 8 a 40% menor se comparado ao uso de um composto químico processado como o cloreto de magnésio (NaCl), enquanto os custos são entre 30 a 50% menores.

Com estas informações é presumível que a utilização de Mg advindo da água do mar é uma boa alternativa para municípios costeiros. Um estudo conduzido por Franco (2020) em Florianópolis, reportou uma eficiência de remoção de fósforo de 86,3% ao utilizar o sal marinho como fonte de Mg a uma razão molar de Mg:P de 3,2:1, o que resultou na produção de 1,4 g de estruvita para 1 L de urina ou 5 mg de estruvita por mg de PO_4^{3-} .

O sal marinho foi obtido por meio de um destilador solar com produtividade média estimada de $1,5 \text{ L} \cdot \text{d}^{-1}$, o uso desse tipo de equipamento em larga escala necessitaria de grandes áreas e mais mão de obra para sua operação e manutenção, aumentando os custos de produção.

Idealmente, os rejeitos do processo de dessalinização de água do mar e do refino do sal marinho (NaCl) poderiam ser obtidos somente com o custo de seu transporte (ETTER et al., 2011), o que promoveria a reciclagem, já que não são aproveitados pela indústria, contudo a distância dessas indústrias é um fator crucial para tornar essa solução atrativa.

A utilização da água do mar in natura é uma alternativa que não necessita de nenhum tipo de beneficiamento, contudo a baixa concentração de Mg em relação a outros compostos faz com que sua utilização seja inviável na maioria das localidades. Porém, municípios com área costeira possibilitam que uma estação de produção de estruvita a partir da urina utilizasse essa característica ao seu favor. Uma estação próxima da orla poderia utilizar a água do mar in natura como fonte de Mg utilizando um sistema simples de bombeamento, evitando o transporte por rodovias e reduzindo supostamente o custo de insumos.

Rubio-Rincón et al., (2014) reportaram até 99% de remoção de fósforo da urina utilizando a água do mar in natura como fonte de Mg, para razão molar de água do mar e urina de 1,0:1,7. Os autores também reportaram que a precipitação é eficiente até a razão molar água do mar/urina de 3,3:1,0, fazendo necessário a redução da razão molar em sistemas de urina coletada na fonte com descarga, pois a mesma já estaria previamente diluída.

Tendo conhecimento da relação Mg/P que promove a maior precipitação de estruvita, se faz necessário análises constantes da concentração de P da urina armazenada para que a solução de Mg seja dosada na quantidade correta, aumentando a eficiência e reduzindo custos de operação. Uma das formas de descobrir rapidamente a concentração de P da urina é por meio da condutividade elétrica, como apresentado na equação 7 (ETTER et al., 2011).

$$|\text{PO}_4 - \text{P}| = 15 * \text{EC}_{25^\circ\text{C}} - 200 \quad (4)$$

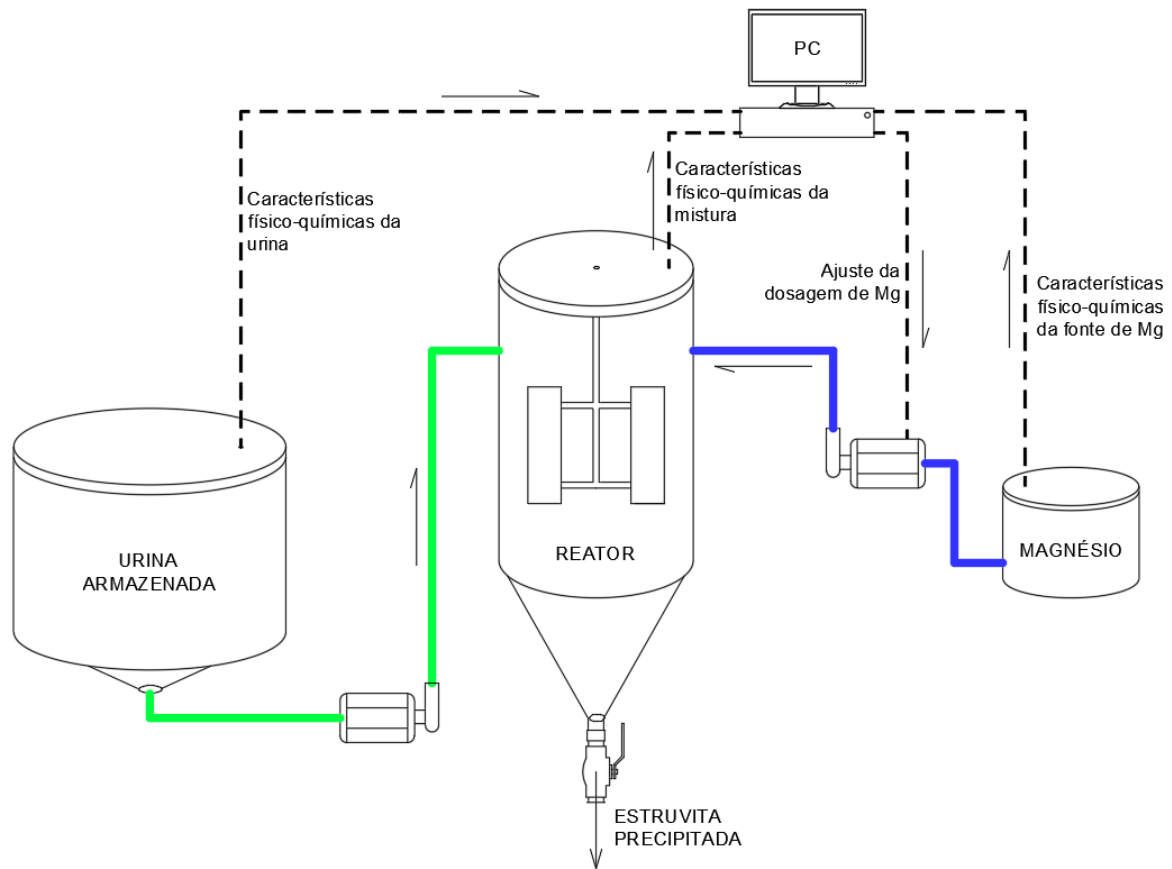
Onde:

$|\text{PO}_4 - \text{P}|$ = concentração de fosfato (mg.L^{-1});

$\text{EC}_{25^\circ\text{C}}$ = condutividade elétrica compensada para 25°C (mS.cm^{-1});

Segundo Etter et al., (2011) as concentrações estimadas pela equação apresentaram desvio padrão menor em relação às análises padrões pelo espectrofotômetro (22 contra 65 mg.L^{-1}), indicando boa precisão, além de ser muito mais barato e não requerer manuseio de produtos químicos como na determinação por análise química direta, podendo ser feita automaticamente, como ilustrado na Figura 7.

Figura 5 – Esquema processo de precipitação de estruvita com dosagem de Mg automática



Fonte: Adaptado de AGUADO et al., (2019).

2.7.4.3 Secagem

O processo de secagem é um método utilizado para remover a umidade de um material sólido, transformando-o em um estado seco. Pode ser removida por evaporação, sublimação ou outro processo de remoção de umidade, dependendo das propriedades do material e das condições de secagem, sendo que a evaporação é o processo mais simples para remoção de água da urina e seus derivados (MAURER; PRONK; LARSEN, 2006).

Em geral, o processo de secagem envolve a aplicação de calor e/ou redução da pressão para promover a evaporação da água. Isso pode ser realizado de várias formas, incluindo o uso de ar quente, vácuo, radiação infravermelha, micro-ondas, entre outros métodos. Durante o processo de secagem, o calor é transferido para o material sólido, aumentando a energia cinética

das moléculas de água ou solvente presentes no material. Isso leva à sua evaporação, transformando-os em vapor, sendo então removido do sistema.

Pradhan et al., (2019) obtiveram um consumo de energia de $2,5 \text{ kWh.kg}^{-1}$ para secagem de sulfato de amônia e estruvita obtidas no processo de precipitação com uso de membranas. Há possibilidade de fazer a secagem utilizando a radiação solar ou instalar painéis fotovoltaicos para produção de energia que será utilizada nos equipamentos de secagem tradicionais, de maneira a reduzir os impactos e custos de energia elétrica.

Para reduzir os custos de secagem pode ser utilizado filtros anteriormente a esse processo, de modo a reduzir a quantidade de água no precipitado. Segundo Franco, (2020) os cristais de estruvita possuem tamanho médio de $2,0 \pm 3,8 \text{ mm}$, podendo variar entre $15 \text{ }\mu\text{m}$ e $3,5 \text{ mm}$.

2.7.4.4 Remoção de Micropoluentes

A presença de hormônios e compostos farmacêuticos na urina é uma preocupação crescente devido ao potencial impacto dessas substâncias na saúde humana e no meio ambiente. Tanto os hormônios endógenos produzidos pelo corpo quanto os compostos farmacêuticos introduzidos externamente podem ser excretados na urina e persistir no ambiente, causando efeitos adversos.

Os principais tratamentos para remoção de micropoluentes são a eletrodialise, nanofiltração e ozonização (MAURER; PRONK; LARSEN, 2006). A remoção de micropoluentes de um efluente tem custo elevado e pode não ser necessária em certas ocasiões. Segundo Jönsson et al., (2004) dispor os micropoluentes no solo é uma melhor opção que os descartar em meios aquáticos, pois o solo está mais adaptado e consegue degradar hormônios e substâncias sintéticas com mais facilidade. Também relatou haver fortes indicações que os micropoluentes presentes em fertilizantes advindos da urina não representam riscos reais.

2.7.5 Aplicação

O grande benefício da cristalização de estruvita é o potencial de comercialização do produto recuperado, que pode ser utilizado como fertilizante, material de construção ou adsorvente, por exemplo. Tais aplicações ajudam a superar o custo do processo (LI et al., 2019).

A estruvita se dissolve lentamente no solo, a uma taxa facilmente absorvida pelas culturas. Sua solubilidade limitada impede que a estruvita cause problemas comuns associados aos fertilizantes tradicionais, como o escoamento dos nutrientes causado pela precipitação (NKOVA, 2014; TAO; FATTAH; HUCHZERMEIER, 2016) Isso faz com que a estruvita possa ser usada para controlar a liberação de nutrientes, reduzir a perda de nutrientes e assim apoiar o crescimento das plantas de forma sustentada. Isto é ótimo para pastagens e florestas, já que os fertilizantes são aplicados apenas uma vez a cada poucos anos.

A composição N, P, K, Mg da estruvita é 5,7 – 28,9 – 0 – 9,9 (TAO; FATTAH; HUCHZERMEIER, 2016). Fica evidente a necessidade de complementação com outros fertilizantes, principalmente a base de potássio, sendo um nutriente essencial na agricultura e que não está presente na estruvita.

3 METODOLOGIA

O presente estudo trata-se de uma pesquisa descritiva de fontes secundárias desenvolvido em três etapas principais de modo a alcançar os objetivos propostos. Sendo a primeira etapa focada na pesquisa bibliográfica de fontes confiáveis, sintetizando e analisando informações pertinentes para ser possível fazer estimativas quantitativas de recuperação de fósforo em diferentes cenários propostos.

A pesquisa bibliográfica é um componente essencial do processo de produção de conhecimento, fornecendo uma base sólida de informações, embasando teoricamente o trabalho, contribuindo para o estado da arte em um determinado campo e promovendo a integridade acadêmica, mas para tal é necessário a utilização de fontes confiáveis. Dentre algumas fontes utilizadas na pesquisa bibliográfica estão:

- Site de Periódicos ScienceDirect;
- Site de Periódicos da CAPES;
- TCCs e dissertações Publicados na UFSC;
- Base de dados do IBGE;
- Arquivos Técnicos da OMS;
- Base de dados do SNIS.

Com base nos resultados da pesquisa bibliográfica, a segunda fase envolveu a identificação e classificação das etapas necessárias para a recuperação de fósforo por meio de uma estação centralizada, bem como as técnicas de manejo e recuperação mais indicadas para o município de Florianópolis, considerando suas características, custos, facilidade de implantação/operação e eficiência.

A terceira e última etapa consistiu no cálculo e discussão da quantidade de fósforo passível de ser recuperado em cada cenário proposto, bem como quais os benefícios que traria para sociedade e meio ambiente caso efetivamente fosse recuperado e reinsertado no ciclo dos nutrientes.

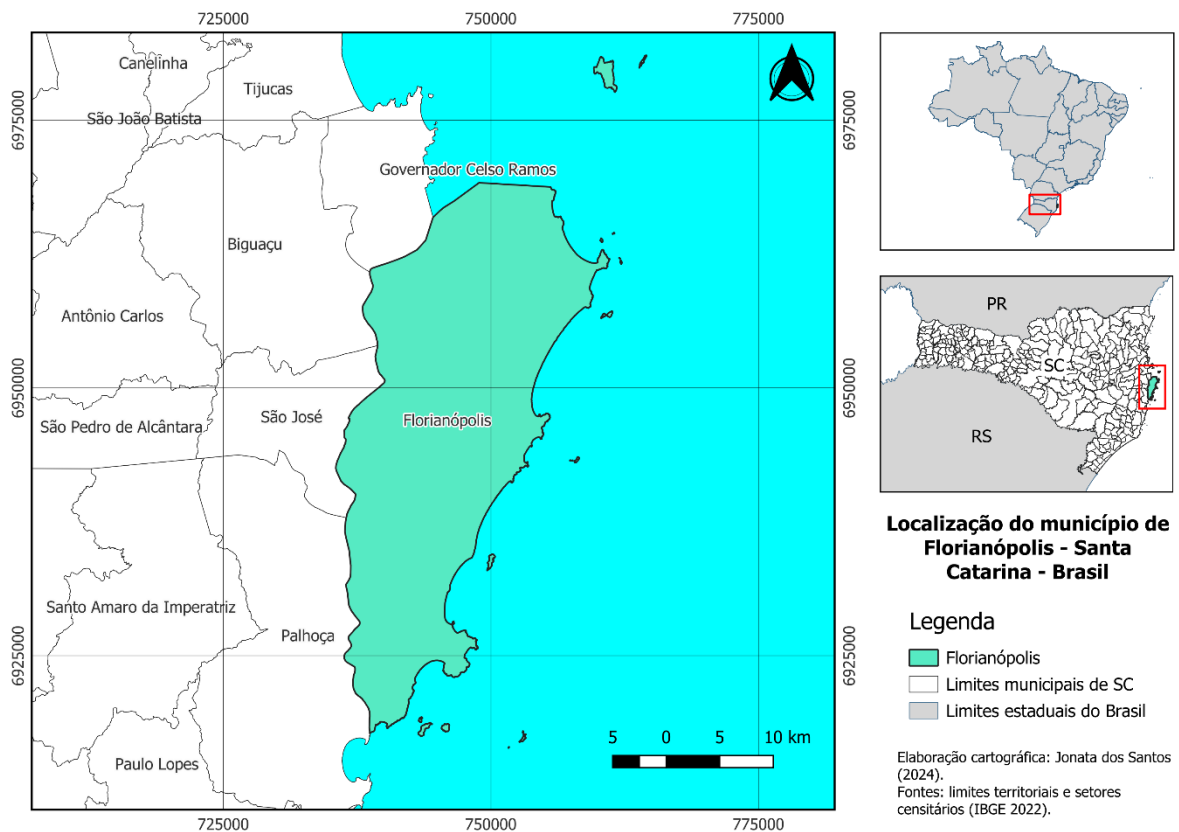
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO

Florianópolis, capital do estado de Santa Catarina, localiza-se no sul do Brasil, entre as coordenadas geográficas de 27°35'07" de latitude sul e 48°32'33" de longitude oeste. A

cidade está situada em uma ilha de aproximadamente 436 km², conhecida como Ilha de Santa Catarina, conectada ao continente por três pontes principais: a Ponte Hercílio Luz, a Ponte Colombo Salles e a Ponte Pedro Ivo.

A topografia de Florianópolis é marcada por uma combinação única de colinas, planícies costeiras, manguezais e extensas áreas de mata atlântica preservada. A altitude média da ilha é de cerca de 3 metros acima do nível do mar, com pontos mais altos atingindo até 532 metros no Morro da Cruz, proporcionando vistas panorâmicas da cidade e do oceano (IBGE, 2023). Na Figura 6 pode-se observar um mapa de localização do município de Florianópolis.

Figura 6 – Mapa de localização do município de Florianópolis.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo os dados do último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023) o município de Florianópolis possui 537.211 habitantes, representando uma densidade de 796,05 habitantes por km² e o coloca em trigésimo nono município mais populoso do Brasil. Possui 779 km de rede coletora de esgoto, sendo tratados diariamente 40.176 m³ de

esgoto pelas ETE segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico conduzida pelo IBGE, (2020).

Conforme dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2024) para o ano de 2022, a porção de 62,75% do esgoto sanitário é coletado, dos quais 100% é tratado. O tratamento é feito por pelas ETE presentes no município, a vazão, tipo de tratamento e eficiência na remoção de fósforo dessas estações podem ser visualizadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Dados sobre as ETE de Florianópolis.

ETE	Nome	Modalidade Específicas	Vazão	Eficiência
			Afluente	Remoção Fósforo
			L/s	%
1	ETE Jurerê Internacional	Lodos Ativados por Batelada + Disposição no Solo	24,1	70
2	ETE Vila União	Lodos Ativados Convencional	1	75
3	ETE Praia Brava	Lodos Ativados + Lagoa Aerada + Lagoa Facultativa + Lagoa de Maturação	15	80
4	ETE Canasvieiras	Filtro Biológico + Digestor Anaeróbio	156	90
5	ETE Saco Grande	Lodos Ativados de Aeração Prolongada	5,5	80
6	ETE PARQTEC	Lodos Ativados em Batelada - SBR Aeração Prolongada c/Ciclos Intermitentes	2,9	85
7	ETE Insular	Lodos Ativados de Aeração Prolongada	272	80
8	ETE Barra da Lagoa	Reator Anaeróbio + Lodos Ativados	37	75
9	ETE Lagoa da Conceição	Reator Anaeróbio + Lodos Ativados (Valo de Oxidação)	35	75
10	ETE Base Aérea	Lagoa Facultativa	4,6	50

Fonte: SILVA, (2023).

O levantamento de dados do Quadro 2 foi feito por SILVA, (2023), que concluiu que em média as ETE de Florianópolis conseguem remover 80% do fósforo presente no efluente, que ficam retidos no lodo remanescente do tratamento, os outros 20% permanecem na fração líquida tratada lançada no ambiente.

3.2 CENÁRIOS ANALISADOS

Para se obter resultados mais próximos da realidade, da quantidade de fósforo possível de ser recuperado, optou-se em analisar três cenários distintos, cada um representando um estágio na implantação e disseminação de sanitários separadores no município de Florianópolis.

O primeiro cenário consiste na urina separada apenas em instituições de ensino públicas de Florianópolis, representa o início da recuperação de nutrientes em grande escala por meio das excretas separadas na fonte no município. Instituições de ensino como escolas e universidades são um ótimo ambiente para disseminação de tecnologias sustentáveis como esta, pois além de concentrar muitos indivíduos, se tratam de ambientes de aprendizado, que devem formar cidadãos mais conscientes dos problemas ambientais e suas soluções.

O segundo cenário se trata da adição das instituições privadas de ensino e outros grandes geradores privados de efluentes sanitários, como os shopping centers e o Aeroporto Internacional de Florianópolis. Representa um avanço na separação de urina na fonte, movida pela própria iniciativa privada, incentivo público ou por exigências de órgãos ambientais.

Por fim, o terceiro e último cenário analisado compreende toda população de Florianópolis, representando o reaproveitamento máximo possível no município do fósforo da urina separada na fonte.

3.3 LEVANTAMENTO DE DADOS EM DIFERENTES CENÁRIOS

Os dados de número de alunos e docentes utilizados no primeiro e segundo cenário, foram obtidos do censo escolar 2022 e censo superior 2021, respectivamente, ambos executados pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Inep). Os dados se encontram expostos no Tabela 4, estão divididos entre alunos de ensino regular ou integral do fundamental e médio, alunos do ensino superior e número total de docentes. Os dados utilizados referem-se exclusivamente ao ensino presencial.

Tabela 4 – Número de estudantes e docentes de instituições de ensino públicas de Florianópolis.

Fundamental		Médio		Superior	Docentes
Regular	Integral	Regular	Integral		
33.142	4.843	12.274	36	28.172	6.739

Fonte: (BRASIL, 2023, 2024).

Para o segundo cenário adicionaram-se os alunos e docentes de escolas e universidades particulares (Tabela 5), obtidos nos censos do Inep previamente mencionados, o fluxo de pessoas do Aeroporto Internacional de Florianópolis e de três grandes centros comerciais do município, Beiramar Shopping, Floripa Shopping e Villa Romana Shopping, se encontram na Tabela 6.

Tabela 5 – Número de estudantes e docentes de escolas e universidades (públicas e privadas) de Florianópolis

Fundamental		Médio		Superior	Docentes
Regular	Integral	Regular	Integral		
54.148	5.856	16.993	1.063	35.210	8.384

Fonte: (BRASIL, 2023, 2024).

Os valores exibidos na Tabela 6 foram obtidos por informações disponibilizadas em seus respectivos sites de cada empreendimento. Não foi possível obter o fluxo de pessoas do Beiramar Shopping, logo, foi inferido um valor próximo aos dos outros shopping centers de Florianópolis.

Tabela 6 – Circulação de pessoas em milhões por ano.

Empreendimento	Circulação de pessoas (10⁶.p.ano⁻¹)
Aeroporto Internacional de Florianópolis	4,0
Beiramar Shopping	7,8*
Floripa Shopping	8,4
Villa Romana Shopping	7,2

* Valor inferido

Fonte: Sites dos empreendimentos.

O potencial volume de urina a ser coletado em cada cenário foi calculado pela equação 3, utilizou-se a vazão média de urina por pessoa de $9,4 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (1,5 litros distribuídos em 16 horas). O tempo de permanência diário utilizado foi de 4h para alunos do ensino superior,

fundamental e médio regular, 7h para alunos do ensino fundamental e médio integral, 8h para docentes, todos multiplicados por 200 dias, que se refere aos dias letivo médio ao ano.

Para os shopping centers utilizou-se o tempo de permanência de 1,33h (80 minutos), que segundo pesquisa da Associação Brasileira de Shopping Centers (ABRASCE, 2023) é o tempo médio por visita. Utilizaram-se 2h para o tempo de permanência no aeroporto, ao ser o tempo mínimo recomendado pela Azul Linhas Aéreas Brasileiras e outras companhias aéreas, para chegar ao aeroporto antes do voo.

$$Vu = \sum_{i=1}^n P_i * Q_m * T \quad (5)$$

Onde:

Vu = volume de urina ao ano ($m^3.a^{-1}$);

n = número de populações analisadas;

P_i = população;

Q_m = vazão média de urina por pessoa ($m^3.h^{-1}.p^{-1}$);

T = Tempo de permanência anual no local de coleta (h).

A quantidade de total de fósforo excretada anualmente em cada cenário foi estimada por meio da equação 2.

$$PO_4^{-3} = \sum_{i=1}^n Vu * c * 10^6 \quad (6)$$

Onde:

PO_4^{-3} = massa de fósforo ($ton.a^{-1}$);

n = número de populações analisadas;

Vu = volume de urina ao ano ($m^3.a^{-1}$);

c = concentração de fósforo por volume de urina ($mg.L^{-1}$).

3.4 ANÁLISE DE CUSTOS

Os custos são um importante fator para a viabilidade de um sistema de recuperação de fósforo da urina separada na fonte. Considerando isso, analisaram-se os custos para precipitação de estruvita da urina em uma estação centralizada, sem considerar os custos de transporte. Foram analisados os custos de bombeamento da água do mar (utilizada como fonte de Mg) por meio da equação de energia hidráulica (4), além dos custos de energia elétrica para mistura da solução e para secagem dos cristais de estruvita precipitados.

A análise de custos foi feita com base nos resultados de volume de urina passível de ser coletada em cada cenário, informações da bibliografia e tarifa de energia elétrica praticada pela Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A. (Celesc).

$$E = \frac{\rho * g * H * V}{\eta} \quad (7)$$

Onde:

ρ = densidade da água (1000 kg/m³);

g = aceleração devido à gravidade (9,81 m/s²);

H = é a carga hidráulica (50 m);

V = volume de água a ser transportado (m³);

η = eficiência da bomba (70%).

Foi considerado a eficiência da bomba utilizada no transporte da água do mar de 70% e carga hidráulica necessária para que ela chegue a estação de 50 m. Demais cálculos se encontram no apêndice A.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS EM DIFERENTES CENÁRIOS

Para descobrir a massa de fósforo que pode ser recuperada de urina de determinada população é necessário o conhecimento do volume de urina excretada e da sua concentração de fósforo, para tal. Na Tabela 7 foi compilado o resultado de diversos estudos sobre o volume médio excretados por uma pessoa adulta.

Tabela 7 – Médias do volume de urina excretados diariamente por uma pessoa adulta.

Autor	Média Volume (L.d⁻¹p⁻¹)
ZANCHETA, (2007)	1,23
RAUCH et al., (2003)	1,50
ROSE et al., (2015)	1,42
JÖNSSON et al., (2004)	1,37
FITTSCHEN; HAHN, (1998)	1,57
MAGRI, (2013)	1,50

Fonte: Indicado.

O volume urinário normal de uma pessoa varia de acordo com fatores como idade, sexo, estado de hidratação, dieta e condição de saúde. Em média, um adulto saudável produz cerca de 1 a 2 litros de urina por dia, como observado Tabela 7. A frequência urinária também é dependente da quantidade de líquido ingerido e outras condições. O número de micções diárias de uma pessoa adulta obtida por Magri, (2013) foi de 6 a 7 vezes ao dia, com volume médio por urinação de 190 mL, já para Zancheta, (2007) foi de 5 a 8 vezes ao dia e volume médio de 288,1 mL.

Considerando que um valor médio de 1,5 litros de urina sejam excretados por uma pessoa ao dia e que ocorra em um período de 16 horas, que o tempo médio que uma pessoa passa acordada ao longo do dia (considerando 8 h diárias de sono) e inferindo que o ato de urinar está distribuindo igualmente durante esse período, obtemos a valor de 94 mL.h⁻¹, valor este utilizado na estimativa do volume de urina coletado nos diferentes cenários, que estão apresentadas na Tabela 8.

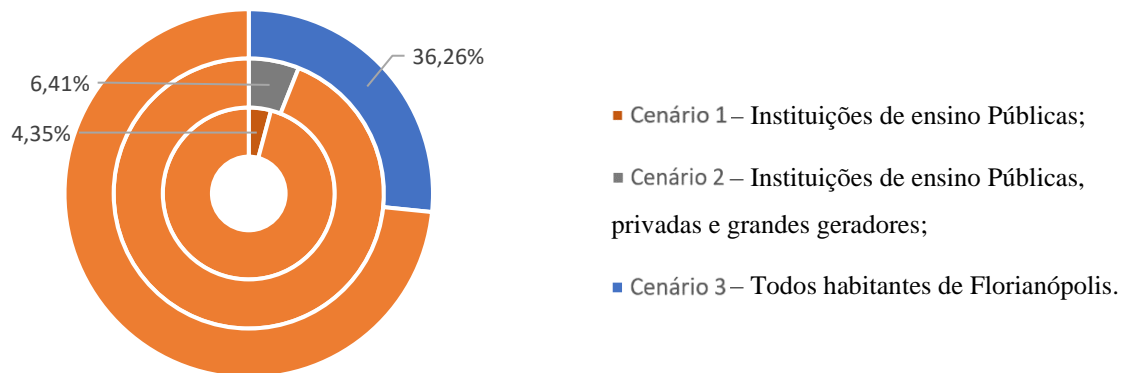
Tabela 8 – Volume de urina gerado pelos diferentes grupos analisados

Volume	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Urina (m ³ .ano ⁻¹)	7.189	12.721	294.123

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi obtido um volume anual de 7.189 m³ ao ano para o primeiro cenário, que considera a coleta somente de instituições de ensino públicas. Esse valor representa 17,89% de volume de esgoto tratado em um dia no município no ano de 2017, porém, se considerarmos também a economia de água proporcionada pelos sanitários segregadores, que reduzem o volume de descarga de cerca de 8 L de um sanitário convencional para cerca de 0,5 L na descarga para urina, a economia de água representaria 4,35%, 6,41% e 36,26% de toda a água distribuída anualmente em Florianópolis (IBGE, 2017), para os cenários 1,2 e 3 respectivamente, como representado na Figura 7.

Figura 7 – Estimativa da redução do consumo de água em Florianópolis devido aos sanitários segregadores



Fonte: Elaborado pelo autor.

As estimativas se mostraram bem expressivas, indicando um grande potencial de economia de água na implantação de sanitários segregadores, mesmo utilizando os modelos que possuam descarga.

Também é necessário conhecer a concentração de fósforo presente na urina para que o potencial de recuperação possa ser avaliado, para isso foi comparado os resultados de concentração de fósforo total obtidos em diversos estudos na Tabela 9.

Tabela 9 – Concentração média de fósforo total na urina humana

Autor	Local	Fósforo Urina Fresca (mg.L⁻¹)	Fósforo Urina Armazenada (mg.L⁻¹)	Período armazenado (dias)
JÖNSSON et al., (1997)	Suécia	350	313	14
KIRCHMANN; PETTERSSON, (1995)	Suécia	-	200 - 210	90 - 180
HEINONENTANSKI et al., (2007)	Finlândia	-	150 - 230	>60
YOSHINAGA et al., (2000)	Japão	946*	-	-
ZANCHETA, (2007)	Brasil	-	407	30
SCHÖNNING; LEEMING; STENSTRÖM, (2002)	Suécia	-	188 – 276**	10 - 12
BORAWSKI et al., (2008)	EUA	450 - 717	-	-
KOULOURI; TEMPLETON; FOWLER, (2024)	Reino Unido	861	541	180
HÖGLUND et al., (2000)	Suécia	-	235	126

* Primeira urina do dia.

** Urina diluída com água de descarga.

Os resultados compilados apresentaram intervalo de 350 a 946 mg/L de fósforo total, sendo o valor mais alto referente a primeira urina do dia, que segundo o autor apresenta maior concentração de fósforo que as outras excretadas ao decorrer do dia. As concentrações para urina armazenada se mostraram consideravelmente inferiores, essa situação pode ser explicada pela precipitação espontânea de minerais fosfóricos. A hidrólise da ureia causa aumento do pH da solução, o que faz com que o fósforo diluído reaja com o cálcio e magnésio presentes, formando fosfato de cálcio e estruvita. Essa precipitação pode provocar a redução da concentração de fósforo da urina em cerca de 30% em períodos de armazenamento mais elevados (BOTTO, 2013; ETTER et al., 2011; TILLEY; ATWATER; MAVINIC, 2008). Logo,

a concentração de fósforo da urina fresca tende a ser maior que da urina armazenada, podendo causar a discrepância dos resultados de concentrações em diferentes estudos, dependendo do intervalo de tempo entre a eliminação do urina e análise.

Para a estimativa do fósforo excretado utilizou-se a concentração de 600 mg.L⁻¹, valor próximo à média (685 mg.L⁻¹) dos resultados da Tabela 9. Os resultados para cada cenário encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Massa de fósforo excretado nos diferentes grupos analisados

Volume	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Fósforo (ton.ano ⁻¹)	4,31	7,63	176,47

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1999) a quantidade indicada de fertilizante sintético a base de fósforo (P₂O₅) necessária para fertilizar uma cultura de soja é de 70 a 80 kg.ha⁻¹. Considerando que um kg de fósforo excretado é equivalente a um kg P₂O₅, as quantidades excretadas estimadas seriam suficientes para fertilizar 54, 95 e 2.206 hectares de soja respectivamente, considerando 80 kg.ha⁻¹.

4.2 POTENCIAL DE FÓSFORO A SER RECUPERADO

O potencial de produção de estruvita dependerá principalmente do volume de urina processado, concentração inicial de fósforo e da eficiência do processo.

Considerando os volumes de urina obtida para os três cenários analisados com concentração média de 300 mg de P para urina armazenada, 90% de eficiência de recuperação reportado por Aguado et al., (2019) e a produção de 5 mg de estruvita por mg de PO₄³⁻ reportada por Franco (2020), teremos os resultados da Tabela 11.

Tabela 11 – Massa de fósforo recuperada e de estruvita produzida em cada cenário

Volume	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Fósforo recuperado (ton.ano ⁻¹)	1,94	3,43	79,41
Estruvita (ton.ano ⁻¹)	9,71	17,17	397,06

Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a execução do presente trabalho não foi possível identificar nenhum fertilizante a base de estruvita sendo comercializado no Brasil, contudo Tao et al., (2019) reportaram que o valor que a estruvita deveria ser comercializada de modo a se equiparar a relação de custo total dos fertilizantes tradicionais com a quantidade de nutrientes fornecidos é entre 0,11 e 0,87 USD por kg. A pesquisa foi feita em 2019 compilando dados de estudos de 2011 a 2017, os quais utilizaram da regressão linear para obter o valor de cada nutriente no mercado norte-americano, se convertidos para o BRL (câmbio de 5,10:1) o intervalo seria de 0,56 a 4,44 reais (desconsiderando variações devido à inflação).

Um estudo semelhante foi conduzido no Nepal por Tilley et al., (2009) o qual por meio da regressão linear obtiveram o valor teórico de comercialização da estruvita, que ficou entre 24 à 41 rupias nepalesas (0,92 a 1,58 BRL no câmbio 0,038:1). Já Pinatha, Polprasert e Englande, (2020) utilizaram na análise de custos o valor de mercado de fertilizantes com a fórmula N-P-K 18-46-0 (semelhante a estruvita), com dados retirados do Escritório de Economia Agrícola da Tailândia. Obtiveram o intervalo de valores de 3,52 a 5,00 USD (17,97 a 25,52 BRL no câmbio de 5,10:1).

4.3 CUSTOS

Utilizando a relação ideal de água do mar para urina de 1,0:1,7 indicada por Rubio-Rincón et al., (2014) foi possível obter a quantidade de água do mar que deveria ser transportada para cada cenário analisado, que se encontra disponível na Tabela 12. Os custos de bombeamento se mostraram baixos, representando cerca de 3,0% dos custos analisados, o que indica que a água do mar in natura é uma fonte de baixo custo para regiões litorâneas, custando apenas R\$ 0,67 para transportar 5,88 m³ de água e processar 10 m³ de urina.

Os maiores custos obtidos vieram da secagem da estruvita precipitada, representando cerca de 85% dos custos totais estimados ao utilizar uma estufa convencional. Pode-se notar que os custos de operação estimados se limitaram apenas a custos advindos do consumo de energia elétrica, fazendo que a sua redução seja possível por meio da secagem da estruvita utilizando secadores solares ou implantação de painéis fotovoltaicos para geração de energia.

Ao utilizar uma média do preço de venda reportado por outros autores, de R\$ 2,50 por kg de estruvita, foi possível obter lucro no processo (Tabela 12). Contudo, é importante salientar que outros custos inerentes da operação, como pagamento de funcionários, transporte da urina, amortização dos equipamentos e infraestrutura instalada, além de outros, não foram

contabilizados. O valor de venda utilizado em um cenário real dependerá da disponibilidade de outros fertilizantes, além da aceitação dos agricultores e consumidores. O menor valor de venda para que não se obtivesse prejuízo na operação da estação, dentre os custos analisados, foi de R\$ 1,74 por kg de estruvita.

Tabela 12 – Estimativa dos custos operacionais e da receita venda de estruvita recuperada em uma estação centralizada

Parâmetros	Valor/unidade	Fonte	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Volume urina			7.189	12.721	294.123
Água do mar necessária	m ³ .ano ⁻¹		4.229	7.483	173.013
Produção de estruvita	ton.ano ⁻¹		9,706	17,173	397,06
Custos					
Eficiência da bomba	70%	Inferido			
Carga hidráulica	50 m	Inferido			
Preço energia elétrica	0,59 R\$/kWh	CELESC, (2024)			
Consumo bombeamento	kWh		825	1.456	33.680
Consumo secagem	2,5 kWh/kg	Pradhan et al., (2019)			
Consumo mistura	0,31 kWh/m ³	(Pinatha et al., (2020)			
Custo bombeamento	R\$		487	859	19.871
Custo secagem	R\$		14.316	25.331	585.672
Custo mistura	R\$		2.088	3.695	85.439
Preço venda estruvita	R\$ 2,50	Tao et al., (2019)			
Receita venda estruvita	R\$		24.264	42.933	992.665
Balanco final	R\$		7.373	13.048	301.682

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os maiores custos obtidos vieram da secagem da estruvita precipitada, representando 85% dos custos totais estimados ao utilizar uma estufa convencional. Em seguida, os custos para mistura da solução de urina e água do mar, que representou cerca de 12% dos custos totais.

Ao analisar outras despesas da operação, é provável que a estação não seja economicamente sustentável no processamento de pequenas quantidades de urina, ao observá-la como um sistema fechado. Porém, se considerarmos a economia advinda do menor volume de esgoto transportado pelas elevatórias, redução volume tratado nas estações de tratamento de água (ETA) e ETE, além da redução dos impactos causados pela produção de fertilizantes tradicionais e lançamentos de fósforo em corpos hídricos, a produção de estruvita em centros urbanos por meio de uma estação centralizada, tem grande possibilidade de ser viável.

4.4 MANEJO PROPOSTO PARA URINA SEPARADA NA FONTE EM FLORIANÓPOLIS

O saneamento ecológico está mudando como as ETE são vistas, transformando-as em estações de recuperação de recursos, contudo, a recuperação de nutrientes a partir do efluente recebido pelas ETE enfrentam diversos desafios. Um dos principais problemas é a grande diluição, que faz com que a recuperação dos nutrientes do efluente tratado tenha o custo muito elevado para pouco benefício, já que a parte líquida pós-tratamento contém apenas 20% do total de fósforo recebido. A recuperação do fósforo do lodo, subproduto do tratamento, já se torna mais interessante devido a sua maior concentração e custos atrelados ao seu manejo, que consiste majoritariamente no descarte em aterros industriais, logo a sua recuperação poderia trazer redução de custos além dos benefícios ambientais. Todavia, o lodo das ETE contém metais pesados, micropoluentes orgânicos e patógenos (RENNER, 2000) dificultando a sua utilização na agricultura.

Uma alternativa para promover a ciclagem do fósforo em um município como Florianópolis, possivelmente de uma maneira mais barata e eficiente, como discutido na revisão bibliográfica, seria a separação da urina na fonte com posterior processamento em uma estação centralizada, pois além de facilitar a recuperação devido a maior concentração, reduziria a vazão recebida pelas ETE atuais, reduzindo os custos de tratamento. A recuperação do fósforo por meio da precipitação de estruvita é uma tecnologia que se mostrou barata e eficiente nos estudos consultados, sendo que parte das despesas de operação do sistema poderiam ser recuperadas com a venda do produto final.

O saneamento focado em recursos é um novo olhar que visa trazer segurança hídrica, alimentar e controle da degradação ambiental, além de ajudar a alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (BOTTO, 2013). Logo, através dessa concepção e considerando os resultados e conhecimentos obtidos ao decorrer do trabalho, recomendam-se alterações na forma como as excretas humanas são manejadas em Florianópolis, com intuito de promover a economia circular dos nutrientes.

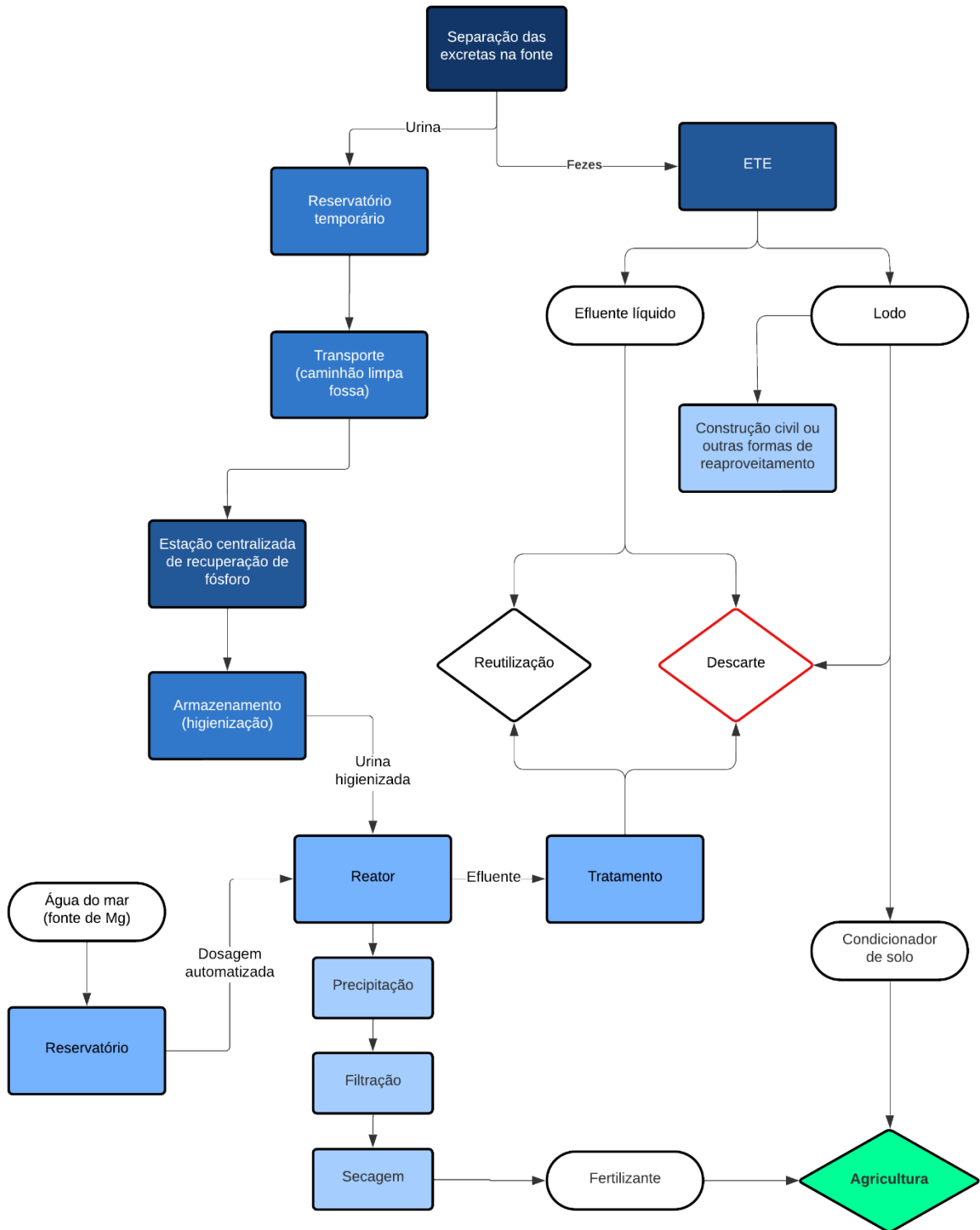
As alterações consistiriam inicialmente na implantação de vasos sanitários separadores com descarga em novas instituições de ensino ou na reforma das existentes, além do reservatório para armazenamento temporário da urina. No primeiro momento os sanitários poderiam funcionar de maneira convencional, direcionando as fezes e urina para rede de esgoto ou tratamento em lote, já proporcionando os benefícios de economia de água e educação ambiental. Ao já possuir uma quantidade considerável de edificações com sanitários separadores e instalação hidrossanitária adequada, poderá ocorrer a implantação de uma estação para recuperação de fósforo da urina separada na fonte. A princípio haveria recuperação apenas do fósforo para simplificar o processo e reduzir custos, podendo expandir para recuperação do nitrogênio também, a medida que o sistema for se consolidando.

Com a estação implantada, o fluxo de urina dos mictórios e sanitários separadores poderia ser direcionado para os reservatórios temporários, que seria esvaziado periodicamente por caminhões limpa fossas higienizados, para evitar contaminações. O transporte poderia ser financiado pela municipalidade e Casan ou pelo próprio empreendimento, que poderia ter tal obrigação atrelada a licença ambiental de operação, sendo uma das condicionantes para renová-la.

Na estação centralizada a urina seria armazenada em tanques selados de modo a evitar odor e promover a higienização. A urina higienizada seria misturada com a água do mar, que se trata de uma fonte de Mg de baixo custo disponível no município, logo, indica-se a implantação da estação em um local próximo ao mar. Os cristais de estruvita seriam precipitados no reator e filtrados, de modo a reduzir o volume de água, posteriormente a estruvita seria seca e armazenada até que pudesse ser vendida ou doada para uso na agricultura ou em algum processo industrial.

As fezes continuariam seguindo para as ETE, conforme ilustrado na Figura 8, proporcionando um tratamento mais eficiente devido a maior concentração de matéria orgânica. O efluente líquido e lodo gerados após o tratamento também poderiam e deveriam ser aproveitados como recursos para outras atividades, promovendo ainda mais a sustentabilidade.

Figura 8 - Esquema de manejo das excretas humanas proposto para Florianópolis



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS

A implantação de uma estação centralizada para produção de estruvita, por meio do fósforo recuperado da urina humana, é algo que apresenta desafios, principalmente pela falta de experiências em grandes centros urbanos e dos custos associados. Para que soluções inovadoras como essa possam ser viabilizadas é necessário o conhecimento das vantagens e desvantagens associadas a essa tecnologia. O quadro 3 concentra as vantagens e desvantagens identificados durante o trabalho no uso proposto dessa tecnologia do Saneamento Ecológico em larga escala no município de Florianópolis.

Quadro 3 - Resumo das vantagens e desvantagens da segregação da urina com recuperação de fósforo em estação centralizada

Natureza (positivo ou negativo)	Característica
+	Alta eficiência na remoção do fósforo dissolvido
-	Redução do potencial de recuperação devido a precipitação espontânea
-	Alto custo inicial de infraestrutura e equipamentos
+	Redução considerável nos custos de operação considerando a venda de estruvita
+	Fonte de Mg de baixo custo ao utilizar a água do mar in natura
+	Redução no consumo de água tratada
+	Redução nos custos de tratamento em ETA e ETE
+	Redução na dependência de fertilizantes tradicionais
-	Aumento do tráfego de veículos
-	Baixa oferta de sanitários segregadores no mercado
-	Sem regulamentação específica
+	Redução dos riscos de eutrofização e acumulação de fósforo nos corpos hídricos
-	Maior custo das instalações hidrossanitárias prediais

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Este estudo investigou o potencial de recuperação de fósforo da urina segregada na fonte por meio de uma estação centralizada no município de Florianópolis. Foram analisados três cenários distintos de segregação da urina, abrangendo desde instituições de ensino até toda a população, visando entender a viabilidade técnica, econômica e ambiental desta prática.

No primeiro cenário, a segregação da urina em instituições de ensino públicas representou o início da implementação da recuperação de fósforo em larga escala. Escolas e universidades são locais estratégicos devido à concentração de indivíduos e ao potencial educacional para disseminação de práticas sustentáveis. Este cenário foi escolhido porque permite a recuperação inicial de nutrientes com custos operacionais relativamente baixos, já que pode iniciar apenas coletando a urina proveniente dos mictórios que já são presentes nesses ambientes, e ir se expandindo gradualmente, além de possuir potencial de alto impacto educacional, visto se tratar de instituições de ensino.

O tratamento proposto para recuperação do fósforo foi por meio da precipitação de estruvita em uma estação centralizada, que receberia a urina transportada por caminhões especializados, que por sua vez, coletaria a urina advinda dos mictórios e sanitários segregadores de excretas e armazenada em reservatórios nas instituições analisadas. Optou-se por esse manejo e processamento da urina, por ser a maneira de se obter o efluente com maior concentração de fósforo advindo das excretas humanas, aumentando a eficiência de recuperação, reduzindo consumo de água, facilitando o tratamento nas ETE convencionais devido à menor diluição do efluente, além de também aproveitar o sistema de mictórios, redes de coleta de esgoto e mercado de limpa fossa já existente.

Nos outros cenários analisados foi possível observar a expansão do uso de sanitários segregadores. No primeiro cenário, onde são consideradas apenas as instituições de ensino públicas, foi possível recuperar 1,94 ton.ano⁻¹ de fósforo e 9,71 ton.ano⁻¹ de estruvita. No segundo cenário, que já considera a adição da coleta de urina em instituições de ensino privadas e de grandes geradores, como o aeroporto e os três maiores shopping centers de Florianópolis, se obteve 3,43 e 17,17 ton.ano⁻¹ respectivamente, resultado um pouco menor que o dobro do cenário anterior. Para o terceiro cenário, que considera a coleta de toda urina produzida pelos habitantes de Florianópolis, foi obtido 79,41 ton.ano⁻¹ de fósforo e 397,06 ton.ano⁻¹ de estruvita.

Optou-se pelo uso de água do mar com fonte de mg no processo de precipitação de estruvita, de modo a aproveitar a geografia do município e obter uma fonte de mg de baixo

custo, estimado em R\$ 0,67 por 10 m³ de urina processada. A razão de água do mar/urina utilizada foi de 1,0:1,7 e eficiência no processo de 90%, obtidas comparando o resultado de diversos autores.

As estimativas de custo de operação anual da estação foram feitas considerando os gastos de bombeamento da água do mar, agitação da mistura urina/água do mar e secagem do precipitado. Resultaram em um saldo positivo de 7.373, 13.048 e 301.682 reais.ano⁻¹ para o primeiro, segundo e terceiro cenário respectivamente, utilizando o preço de venda da estruvita de R\$ 2,50 por kg de produto. O menor valor de venda da estruvita para que não se tenha prejuízo e de R\$ 1,74, contudo não foi considerado outros custos, como infraestrutura, pagamento de funcionários e transporte, entre outros, o que resultaria em um preço de venda maior para que o processo seja economicamente sustentável.

Os custos de operação podem ser reduzidos utilizando a energia solar para geração de energia elétrica ou secagem da estruvita, já que os custos analisados se resumiram a gastos com energia elétrica. Também deve ser considerado os impactos ambientais e outras economias indiretas do processo de análise de viabilidade, principalmente na redução do volume do tratamento da água potável e do esgoto doméstico. Outra forma de mitigar os custos pode ser feita por meio da solicitação dos órgãos ambientais a empreendimentos de grande geração de efluente doméstico, para que implantem o sistema segregador e fiquem responsáveis pelo transporte até a estação, de modo a ser um requisito para obtenção de licenças ambientais.

A utilização de água do mar in natura como fonte de magnésio pode ser vantajosa para locais próximos ao mar que não necessitem enfrentar grandes perdas de carga para transporte desse insumo, sendo necessário avaliar os custos e fontes de Mg disponíveis em cada caso. Além disso, é necessário avaliar a influência da qualidade da água do mar na eficiência do processo de precipitação. Questões como a presença de sólidos, patógenos e contaminantes são fatores não considerados nesse trabalho que podem ter influência significativa no processo, sendo recomendado a avaliação dessas características em estudos futuros.

A recuperação de fósforo na forma de estruvita se apresentou uma boa solução para promover a cadeia circular de nutrientes e reduzir a dependência de fertilizantes tradicionais, contudo, a falta de sanitários segregadores no mercado, o transporte eficientes da urina coletada, bem como a falta de regulamentação específica, são fatores críticos para o sucesso do projeto. Logo, recomenda-se mais estudos e projetos pilotos mostrando as vantagens e desafios do saneamento ecológico, para servirem de base para mudanças futuras na legislação e auxiliem na implantação dessa tecnologia em larga escala.

REFERÊNCIAS

- ABRASCE. **O comportamento dos Frequentadores de Shopping Centers.** , 2023. Disponível em: <www.abrasce.com.br.>. Acesso em: 1 abr. 2024
- AGUADO, D. et al. P-recovery in a pilot-scale struvite crystallisation reactor for source separated urine systems using seawater and magnesium chloride as magnesium sources. **Science of The Total Environment**, v. 672, p. 88–96, 1 jul. 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.485.
- ALEMAYEHU, Y. A.; ASFAW, S. L.; TERFIE, T. A. Nutrient recovery options from human urine: A choice for large scale application. **Sustainable Production and Consumption**, v. 24, p. 219–231, 1 out. 2020. DOI: 10.1016/j.spc.2020.06.016.
- ALIAHMAD, A. et al. Knowledge evolution within human urine recycling technological innovation system (TIS): Focus on technologies for recovering plant-essential nutrients. **Journal of Cleaner Production**, v. 379, p. 134786, 15 dez. 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.134786.
- BARBOSA, S. G. et al. A design of experiments to assess phosphorous removal and crystal properties in struvite precipitation of source separated urine using different Mg sources. **Chemical Engineering Journal**, v. 298, p. 146–153, 15 ago. 2016. DOI: 10.1016/j.cej.2016.03.148.
- BESSON, M. et al. Impact of urbanism on source separation systems: A life cycle assessment. **Science of The Total Environment**, v. 921, p. 171050, 15 abr. 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171050.
- BLANCO BENÁ FILHO, N. **Estruvita: identificação de potenciais perigos e eventos perigosos no processo de produção, percepção e aceitabilidade de agricultores quanto ao seu uso agrícola.** Dissertação (mestrado)—Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2019.
- BORAWSKI, K. M. et al. Urinary Reference Values for Stone Risk Factors in Children. **Journal of Urology**, v. 179, n. 1, p. 290–294, jan. 2008. DOI: 10.1016/j.juro.2007.08.163.
- BOTTO, M. P. **Utilização da urina humana como biofertilizante para produção de alimentos e energia: caracterização, uso na agricultura e recuperação de nutrientes.** Tese (doutorado)—Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2013.
- BRADFORD-HARTKE, Z.; RAZMJOU, A.; GREGORY, L. Factors affecting phosphorus recovery as struvite: Effects of alternative magnesium sources. **Desalination**, v. 504, p. 114949, 15 maio 2021. DOI: 10.1016/j.desal.2021.114949.
- BRASIL. LEI Nº 6.894, DE 16 DE DEZEMBRO DE 1980. Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 1980.

BRASIL. **Produção Nacional De Fertilizantes Estudo Estratégico**. Brasília, DF Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos, , 2020a. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2024

BRASIL. RESOLUÇÃO Nº 498, DE 19 DE AGOSTO DE 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biofósforo em solos, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 2020b.

BRASIL. **Censo da Educação Superior 2022**. Brasília DF: Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Inep), 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/pesquisas-estatisticas-e-indicadores/censo-da-educacao-superior/resultados>>. Acesso em: 30 mar. 2024.

BRASIL. **Censo da Educação Básica 2023**. Brasília, DF: Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Inep), 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/inep/pt-br/areas-de-atuacao/pesquisas-estatisticas-e-indicadores/censo-escolar/resultados>>. Acesso em: 30 mar. 2024.

CELESC. **Tarifas e taxas de energia**. Disponível em: <<https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia>>. Acesso em: 13 maio. 2024.

CIEŚLIK, B.; KONIECZKA, P. A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of “no solid waste generation” and analytical methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 1728–1740, 20 jan. 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.116.

CIURLI, S. et al. Structural properties of the nickel ions in urease: novel insights into the catalytic and inhibition mechanisms. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 190–192, p. 331–355, set. 1999. DOI: 10.1016/S0010-8545(99)00093-4.

CORDELL, D.; DRANGERT, J.-O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, v. 19, n. 2, p. 292–305, maio 2009. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.

EAWAG. News Eawag Mix or NoMix? A Closer Look at Urine Source Separation. **Eawag News**, v. 63, p. 65, mar. 2007.

EMBRAPA. **Muda a tabela de adubação da soja**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/17915956/muda-a-tabela-de-adubacao-da-soja#:~:text=Nos%20solos%20com%20teor%20m%C3%A9dio,70%20e%2080%20Kg%20Fha.>>. Acesso em: 10 maio. 2024.

ESREY, S. A. et al. **Closing the loop : ecological sanitation for food security**. [s.l.] Swedish international development cooperation agency (Sida). Department for natural resources and the environment, 2001.

ETTER, B. et al. Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal. **Water Research**, v. 45, n. 2, p. 852–862, jan. 2011. DOI: 10.1016/j.watres.2010.10.007.

FARIAS FILHO, J. A.; ALVIM, A. T. B. Higienismo e forma urbana: uma biopolítica do território em evolução. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 14, 2022. DOI: 10.1590/2175-3369.014.e20220050.

FITTSCHEN, I.; HAHN, H. H. Characterization of the municipal wastewaterpart human urine and a preliminary comparison with liquid cattle excretion. **Water Science and Technology**, v. 38, n. 6, p. 9–16, 1998. DOI: 10.1016/S0273-1223(98)00562-9.

FLORIPA SHOPPING. **O Floripa Shopping**. Disponível em: <<https://www.floripashopping.com.br/nossa-historia.php#:~:text=O%20Floripa%20Shopping%20fica%20a,cerca%20de%2080.000%20ve%C3%ADculos%20diariamente.>>. Acesso em: 28 mar. 2024.

FRANCO, L. C. **Otimização do processo de precipitação de estruvita com adição de sal marinho por meio de delineamento composto central: recuperação de nutrientes e ensaios microbiológicos**. Dissertação (MESTRADO)—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.

HEINONENTANSKI, H. et al. Pure human urine is a good fertiliser for cucumbers. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 1, p. 214–217, jan. 2007. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.11.024.

HÖGLUND, C. et al. Variation of chemical and microbial parameters in collection and storage tanks for source separated human urine. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 35, n. 8, p. 1463–1475, set. 2000. DOI: 10.1080/10934520009377047.

HUANG, J. et al. Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 159, p. 171–179, 15 ago. 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.008.

IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2017**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/florianopolis/pesquisa/30/84366>>. Acesso em: 13 abr. 2024

IBGE. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro, Brasil, 2023. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/florianopolis/panorama>>. Acesso em: 2 abr. 2024

IFA; ARGUS. **Phosphate Rock Resources & Reserves**. Londres Argus / IFA. Relatório, , 25 abr. 2023. Disponível em: <<https://www.un.org/geospatial/content/map-world>>. Acesso em: 29 fev. 2024

JOHANSSON, M. **Urine separation-closing the nutrient cycle**. Estocolmo: Stockholm Water Company, 2000.

JÖNSSON, H. et al. Source separated urine-nutrient and heavy metal content, water saving and faecal contamination. **Pergamon War. Sci. Tech**, v. 35, n. 9, p. 145–152, 1997.

JÖNSSON, H. et al. **Guidelines on the use of urine and faeces in crop production**. Relatório—Estocolmo: EcoSanRes Publications Series, 2004.

- KARAK, T.; BHATTACHARYYA, P. Human urine as a source of alternative natural fertilizer in agriculture: A flight of fancy or an achievable reality. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 4, p. 400–408, fev. 2011. DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.12.008.
- KIRCHMANN, H.; PETTERSSON, S. Human urine - Chemical composition and fertilizer use efficiency. **Fertilizer Research**, v. 40, p. 149–154, 1995.
- KOULOURI, M. E.; TEMPLETON, M. R.; FOWLER, G. D. Enhancing the nitrogen and phosphorus content of faecal-derived biochar via adsorption and precipitation from human urine. **Journal of Environmental Management**, v. 352, p. 119981, 1 fev. 2024. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119981.
- KUISMA, S.-M. **Sustainable wastewater management in the European Union**. The Hague University of Applied Sciences WECF, , 14 set. 2008. Disponível em: <<http://admin.indiaenvironmentportal.org.in/files/WECFThesis.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2024
- LANGERGRABER, G.; MUELLEGGER, E. Ecological Sanitation—a way to solve global sanitation problems? **Environment International**, v. 31, n. 3, p. 433–444, abr. 2005. DOI: 10.1016/j.envint.2004.08.006.
- LARSEN, T. A.; UDERT, K. M.; LIENERT, J. **Source Separation and Decentralization for Wastewater Management**. Londres: IWA Publishing, 2013.
- LE CORRE, K. S. et al. Phosphorus Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization: A Review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 6, p. 433–477, jun. 2009. DOI: 10.1080/10643380701640573.
- LENS, P.; ZEEMAN, G.; LETTINGA, G. Decentralised Sanitation and Reuse: Concepts, Systems and Implementation. **Water Intelligence Online**, v. 4, n. 0, p. 9781780402949–9781780402949, 30 dez. 2015. DOI: 10.2166/9781780402949.
- LI, B. et al. Phosphorous recovery through struvite crystallization: Challenges for future design. **Science of The Total Environment**, v. 648, p. 1244–1256, 15 jan. 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.166.
- LIENERT, J. et al. How farmers in Switzerland perceive fertilizers from recycled anthropogenic nutrients (urine). **Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research**, v. 48, n. 1, p. 47–56, 2003.
- LIU, B. et al. Characterization of induced struvite formation from source-separated urine using seawater and brine as magnesium sources. **Chemosphere**, v. 93, n. 11, p. 2738–2747, nov. 2013. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.09.025.
- MAGRI, M. E. **Aplicação de processos de estabilização e higienização de fezes e urina humanas em banheiros secos segregadores**. Tese (doutorado)—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.
- MATAR, G. et al. Modelling the benefits of urine source separation scenarios on wastewater treatment plants within an urban water basin. **Water Science and Technology**, v. 86, n. 3, p. 482–495, 1 ago. 2022. DOI: 10.2166/wst.2022.208.

MAURER, M.; PRONK, W.; LARSEN, T. A. Treatment processes for source-separated urine. **Water Research**, v. 40, n. 17, p. 3151–3166, out. 2006. DOI: 10.1016/j.watres.2006.07.012.

MAURER, M.; SCHWEGLER, P.; LARSEN, T. A. Nutrients in urine: energetic aspects of removal and recovery. **Water Science and Technology**, v. 48, p. 37–46, 2003.

MCCONVILLE, J. R.; METSON, G. S.; PERSSON, H. Acceptance of human excreta derived fertilizers in Swedish grocery stores. **City and Environment Interactions**, v. 17, p. 100096, 1 jan. 2023. DOI: 10.1016/j.cacint.2022.100096.

MIHELICIC, J. R.; FRY, L. M.; SHAW, R. Global potential of phosphorus recovery from human urine and feces. **Chemosphere**, v. 84, n. 6, p. 832–839, ago. 2011. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2011.02.046.

MONNIER, N. et al. Core components, concepts and strategies for parasitic and vector-borne disease elimination with a focus on schistosomiasis: A landscape analysis. **PLOS Neglected Tropical Diseases**, v. 14, n. 10, p. e0008837, 30 out. 2020. DOI: 10.1371/journal.pntd.0008837.

MÜNCH, E. VON; WINKER, M. **Technology review of urine diversion components Overview of urine diversion components such as waterless urinals, urine diversion toilets, urine storage and reuse systems Sustainable sanitation-ecosan program**. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH: Eschborn, 2011.

MUSKOLUS, A.; ELLMER, F. **Final report for task 8 of the demonstration project "Sanitation Concepts for Separate Treatment of Urine, Faeces and Greywater " (SCST) Fertilizer usage**. Berlin: Humboldt-University of Berlin, 2007.

NKOA, R. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 34, n. 2, p. 473–492, 13 abr. 2014. DOI: 10.1007/s13593-013-0196-z.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS). **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta, and greywater**. [s.l.] World Health Organization, 2006. v. 4

PINATHA, Y.; POLPRASERT, C.; ENGLANDE, A. J. Product and cost perspectives of phosphorus recovery from human urine using solid waste ash and sea salt addition – A case of Thailand. **Science of The Total Environment**, v. 713, p. 136514, 15 abr. 2020. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136514.

PRADHAN, S. K. et al. Recovery of nitrogen and phosphorus from human urine using membrane and precipitation process. **Journal of Environmental Management**, v. 247, p. 596–602, 1 out. 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.046.

RAUCH, W. et al. Combining urine separation with waste design: an analysis using a stochastic model for urine production. **Water Research**, v. 37, n. 3, p. 681–689, fev. 2003. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00364-0.

RENNER, R. Sewage sludge: pros and cons. **ENVIRONMENTAL SCIENCE AND TECHNOLOGY**, p. 430–435, 1 out. 2000.

ROCKCONTENT. **Primeira viagem de avião: veja aqui tudo o que você precisa saber**. Disponível em: <<https://revistaazul.voeazul.com.br/dicas-de-viagem/primeira-viagem-de-aviao/>>. Acesso em: 14 maio. 2024.

ROSE, C. et al. The Characterization of Feces and Urine: A Review of the Literature to Inform Advanced Treatment Technology. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 17, p. 1827–1879, 2 set. 2015. DOI: 10.1080/10643389.2014.1000761.

RUBIO-RINCÓN, F. J. et al. Seawater for phosphorus recovery from urine. **Desalination**, v. 348, p. 49–56, 1 set. 2014. DOI: 10.1016/j.desal.2014.06.005.

SATTERTHWAITE, D. et al. **Untreated and Unsafe: Solving the Urban Sanitation Crisis in the Global South**. WashingtonWorld Resources Institute, , 2019. Disponível em: <<https://www.wri.org/research/untreated-and-unsafe-solving-urban-sanitation-crisis-global-south>>. Acesso em: 25 mar. 2024

SCHÖNNING, C.; LEEMING, R.; STENSTRÖM, T. A. Faecal contamination of source-separated human urine based on the content of faecal sterols. **Water Research**, v. 36, n. 8, p. 1965–1972, abr. 2002. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00427-4.

SCHÖNNING, CAROLINE.; STENSTRÖM, T. A. **Guidelines for the safe use of urine and faeces in ecological sanitation systems**. Estocolmo: Stockholm Environment Institute (SEI), 2004.

SENECAL, J.; VINNERÅS, B. Urea stabilisation and concentration for urine-diverting dry toilets: Urine dehydration in ash. **Science of The Total Environment**, v. 586, p. 650–657, 15 maio 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.038.

SHADDEL, S. et al. Struvite crystallization by using raw seawater: Improving economics and environmental footprint while maintaining phosphorus recovery and product quality. **Water Research**, v. 173, p. 115572, 15 abr. 2020. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115572.

SHARPLEY, A. N. et al. Strategies for the Sustainable Management of Phosphorus. Em: Madison : American Society of Agronomy, 2015. p. 1069–1101.

SILVA, G. G. **O Fósforo nas Estações de Tratamento de Efluentes de Florianópolis - Situação atual e perspectivas futuras**. [s.l: s.n.].

SNIS. SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Mapa de Indicadores de Esgoto**. Disponível em: <http://appsnis.mdr.gov.br/indicadores-hmg/web/agua_esgoto/mapa-esgoto?codigo=4205407>. Acesso em: 24 abr. 2024.

TAO, W. et al. Three-stage treatment for nitrogen and phosphorus recovery from human urine: Hydrolysis, precipitation and vacuum stripping. **Journal of Environmental Management**, v. 249, p. 109435, 1 nov. 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109435.

TAO, W.; FATTAH, K. P.; HUCHZERMEIER, M. P. Struvite recovery from anaerobically digested dairy manure: A review of application potential and hindrances. **Journal of**

Environmental Management, v. 169, p. 46–57, 15 mar. 2016. DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.12.006.

TILLEY, E. et al. **Presented at the International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams, Social and economic feasibility of struvite recovery from urine at the community level in Nepal.** International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams. **Anais...** Vancouver: IWA Publishing, 2009.

TILLEY, E.; ATWATER, J.; MAVINIC, D. Effects of storage on phosphorus recovery from urine. **Environmental Technology**, v. 29, n. 7, p. 807–816, jul. 2008. DOI: 10.1080/09593330801987145.

UDERT, K. M.; LARSEN, T. A.; GUJER, W. Estimating the precipitation potential in urine-collecting systems. **Water Research**, v. 37, n. 11, p. 2667–2677, jun. 2003. DOI: 10.1016/S0043-1354(03)00071-X.

VILLA ROMANA SHOPPING. **Apresentação Comercial Villa Romana Shopping.** Disponível em: <<https://www.lumine.adm.br/images/shoppings/VRS/01%20-%20Apresentac%CC%A7a%CC%83o%20Comercial%20Villa%20Romana%20Shopping.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2024.

VINNERÅS, B. **Faecal separation and urine diversion for nutrient management of household biodegradable waste and wastewater.** Tese—Estocolmo: Swedish University of Agricultural Sciences, 2001.

WINKER, M. Pharmaceutical Residues in Urine and Potential Risks related to Usage as Fertiliser in Agriculture. 2009. DOI: <https://doi.org/10.15480/882.481>.

XIA, P. et al. Struvite crystallization combined adsorption of phosphate and ammonium from aqueous solutions by mesoporous MgO loaded diatomite. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 506, p. 220–227, 5 out. 2016. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2016.05.101.

YOSHINAGA, J. et al. Human urine certified reference material for arsenic speciation. **Clinical chemistry**, v. 46, n. 11, p. 1781–6, nov. 2000.

ZANCHETA, P. G. **Recuperação e Tratamento da Urina Humana Para Uso Agrícola.** Dissertação (mestrado)—Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.

ZHANG, J.; LIU, M.; SONG, Y. Human-Dominated Land Use Change in a Phosphate Mining Area and Its Impact on the Water Environment. **Water**, v. 14, n. 7, p. 1074, 29 mar. 2022. DOI: 10.3390/w14071074.

ZURICH AIRPORT BRASIL. **Estatísticas.** Disponível em: <<https://floripa-airport.com/estatisticas-e-documentos>>. Acesso em: 24 mar. 2024.

APÊNDICE A – Tabela de Cálculos

DADOS																	
CENÁRIO 1				CENÁRIO 2								CENÁRIO 3					
Fundamental		Médio		Superior	Docentes	Fundamental		Médio		Superior	Docentes	Aeroporto	Beiramar Shopping	Floriipa Shopping	Villa Romana Shopping	População de Florianópolis	
Regular	Integral	Regular	Integral			Regular	Integral					Fluxo (milhões de pessoas ao ano)					
33.142	4.843	12.274	36	28.172	6.739	54.148	5.856	1.693	1.063	35.210	8.384	4	8	8,4	7,2	537211	

RESULTADOS																		
CENÁRIO 1				CENÁRIO 2								CENÁRIO 3						
GRUPO		TEMPO DE PERMANÊNCIA (horas/dia)		Frequência urinária diária na edificação		GRUPO		Regular		Integral		Docentes		Shopping		Aeroporto		
Shoppings	1,33		1				População	364204	48433	67072	3138000	8000000				População Florianópolis		
Aeroporto	2		1				Vazão (m³/h)	34,24	4,55	6,30	-		-				1,5	
Ensino Regular	4		2				Vazão (m³/ano)	6847	911	1261	2950	752				Produção urina (L/dia)		
Ensino Integral	7		4				Somatório	12721								294123		
Docentes	8		4				% volume total	4,33%								% volume total		
Produção de urina (m³/h)		0,000094				CUSTOS										Fósforo excretado (ton/ano)		
Dias letivos		200				Fósforo excretado (ton/ano)	4,31										176,47	
CUSTOS						Fósforo recuperado (kg/ano)	1941										79413	
Concentração P urina fresca (mg/L)	600						Produção estruvita (Kg/ano)	9706										397066
Concentração P urina arm. (mg/L)	300						Volume necessário de água do mar (m³)	4229										173013
Relação água do mar/urina	0,588						Consumo bomba água do mar (kWh)	825										33680
Estruvita produzida (mg/mg de P)	5						Consumo secagem estruvita (kWh)	24264										992665
Eficiência de recuperação	90%						Consumo mistura da solução (kWh)	3540										144812
Custo energia (R\$/kWh)	0,59						Consumo bombeamento água do mar (R\$)	487										19871
Preço venda estruvita (R\$)	2,5						Custo secagem estruvita (R\$)	14316										85439
Consumo energia secagem (kWh/kg)	2,5						Custo mistura da solução (R\$)	2088										992665
Consumo mistura da solução (kWh/m³)	0,31						Receita venda estruvita (R\$)	24264										301682

ECONOMIA DE ÁGUA											
CENÁRIO 1				CENÁRIO 2				CENÁRIO 3			
N.º de micções/ano		188192800		N.º de micções/ano		277473600		N.º de micções/ano		1568656120	
CONSUMO SANITÁRIO CONVENCIONAL (L)											
8											
Volume (m³/ano)		1505542		Volume (m³/ano)		2219789		Volume (m³/ano)		12549249	
CONSUMO SANITÁRIO SEGREGADOR COM DESCARGAL (L)											
0,5											
Volume (m³/ano)		1411446		Volume (m³/ano)		2081052		Volume (m³/ano)		11764921	

RESULTADOS																		
CENÁRIO 1				CENÁRIO 2								CENÁRIO 3						
GRUPO		TEMPO DE PERMANÊNCIA (horas/dia)		Frequência urinária diária na edificação		GRUPO		Regular		Integral		Docentes		Shopping		Aeroporto		
Shoppings	1,33		1				População	364204	48433	67072	3138000	8000000						
Aeroporto	2		1				Vazão (m³/h)	34,24	4,55	6,30	-		-				1,5	
Ensino Regular	4		2				Vazão (m³/ano)	6847	911	1261	2950	752						
Ensino Integral	7		4				Somatório	12721										
Docentes	8		4				% volume total	4,33%										
Produção de urina (m³/h)		0,000094				CUSTOS												
Dias letivos		200				Fósforo excretado (ton/ano)	4,31										176,47	
CUSTOS						Fósforo recuperado (kg/ano)	1941										79413	
Concentração P urina fresca (mg/L)	600						Produção estruvita (Kg/ano)	9706										397066
Concentração P urina arm. (mg/L)	300						Volume necessário de água do mar (m³)	4229										173013
Relação água do mar/urina	0,588						Consumo bomba água do mar (kWh)	825										33680
Estruvita produzida (mg/mg de P)	5						Consumo secagem estruvita (kWh)	24264										992665
Eficiência de recuperação	90%						Consumo mistura da solução (kWh)	3540										144812
Custo energia (R\$/kWh)	0,59						Consumo bombeamento água do mar (R\$)	487										19871
Preço venda estruvita (R\$)	2,5						Custo secagem estruvita (R\$)	14316										85439
Consumo energia secagem (kWh/kg)	2,5						Custo mistura da solução (R\$)	2088										992665
Consumo mistura da solução (kWh/m³)	0,31						Receita venda estruvita (R\$)	24264										301682

ECONOMIA DE ÁGUA											
CENÁRIO 1				CENÁRIO 2				CENÁRIO 3			
N.º de micções/ano		188192800		N.º de micções/ano		277473600		N.º de micções/ano		1568656120	
CONSUMO SANITÁRIO CONVENCIONAL (L)											
8											
Volume (m³/ano)		1505542		Volume (m³/ano)		2219789		Volume (m³/ano)		12549249	
CONSUMO SANITÁRIO SEGREGADOR COM DESCARGAL (L)											
0,5											
Volume (m³/ano)		1411446		Volume (m³/ano)		2081052		Volume (m³/ano)		11764921	

Impacto de cada atividade no custo total											
Bombeamento		Secagem		Mistura							
84,75%		12,36%		2,88%							

