



PRODUÇÃO DE NITRATO DE AMÔNIO EM ESCALA COMERCIAL A PARTIR DE AMÔNIA VERDE: ESTUDO DE CASO.

JÚLIO GABRIEL CAMPOS MARQUES – juliogabrielcm17@gmail.com
CREATION RESEARCH GROUP/PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO /UFRN

MARIO ORESTES AGUIRRE GONZÁLEZ - mario.gonzalez@ufrn.br
CREATION RESEARCH GROUP/UFRN

MAYARA ADRIELLY LEAL DE OLIVEIRA RODRIGUES -
mayaraadriellyleal@gmail.com
CREATION RESEARCH GROUP/UFRN

LUANA PEREIRA NOGUEIRA – luanapereiranog@gmail.com
CREATION RESEARCH GROUP/UFRN

ÁREA: 09.ENGENHARIA DA SUSTENTABILIDADE
SUBÁREA: 9.7 - DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

RESUMO: *O artigo aborda a produção de nitrato de amônio em escala comercial a partir de amônia verde, destacando seu potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) na agricultura. A pesquisa discute o papel do hidrogênio verde, obtido via eletrólise da água com energia renovável, como insumo essencial para a síntese de amônia verde. Essa amônia, por sua vez, serve de base para fertilizantes nitrogenados com menor pegada de carbono. O trabalho utiliza revisão bibliográfica e estudo de caso de duas plantas industriais — Atlas Agro Pacific Green Fertilizer, nos Estados Unidos, e Uberaba Green Fertilizer, no Brasil — que visam consolidar a produção de fertilizantes verdes em larga escala. Os resultados mostram que o nitrato de amônio surge como alternativa estratégica à ureia, apresentando vantagens como menor volatilização e menor impacto ambiental durante o uso agrícola. Embora ainda incipiente para suprir toda a demanda, a produção em escala comercial desses fertilizantes sinaliza uma transição concreta para uma agricultura mais sustentável.*

PALAVRAS-CHAVES: *Hidrogênio verde, Fertilizantes nitrogenados e Nitrato de amônio.*

1. INTRODUÇÃO

De fato, um dos principais desafios enfrentados pela humanidade em relação às questões ambientais é a luta contra a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera terrestre. Segundo relatório anual da IEA (2024), Agência Internacional de energia, as emissões globais de GEE no ano de 2023 aumentaram em 1,1% em relação ao ano anterior, alcançando 37,4 gigatoneladas de CO₂, o que representa aproximadamente 410 milhões de toneladas a mais que o ano de 2022.

Arelado a este fato, o relatório da EPA (2019) identificou os setores com maiores demandas de emissões de GEE, entre eles estão: geração de eletricidade e calor (34%), indústria (24%), agricultura (22%), transporte (15%) e construção (6%). Além disso, existem acordos firmados entre os principais países industrializados no mundo para mitigar esta emissão, como exemplo o acordo de Paris, assinado em 2015, com meta de emissão líquida de carbono zero até 2050. Desta forma, para se combater o aumento das emissões de GEE, se faz necessário a maior participação de fontes de energia renováveis nas matrizes energéticas ao redor do mundo, como energia eólica, solar, biomassa e outros, é importante também investir em sistemas de conversão de energia mais eficientes e por fim, canalizar esforços na produção de hidrogênio verde (IRENA, 2020).

O Hidrogênio (H₂) é um gás de alta densidade energética, e quando extraído a partir de fonte de energia renovável se torna um combustível com baixo ou quase zero emissão de CO₂ na atmosfera. Este processo, advém da eletrólise da água, e torna o hidrogênio obtido como “verde”. O hidrogênio verde já é considerado um dos maiores propulsores da descarbonização de diversos setores no mundo, incluindo principalmente a indústria, agricultura e transporte (Yang *et al.*, 2024).

De acordo com a IEA (2024) estima-se a necessidade de produção de cerca de 470 Mt/ano de H₂ até 2050 para atingir as metas de emissão zero de GEE (NetZero by 2050). Apesar do seu alto poder de descarbonização, o uso do hidrogênio e suas logística implicam em alguns desafios: (i) é um gás com baixa densidade (0,084 kg/Nm³) o que exige grandes volumes para uso como fonte de energia, (ii) o transporte do gás tem custo alto, riscos de segurança e exige equipamentos adequados, (iii) a liquefação também traz desafios, pelo alto gasto de energia (cerca de 40% da energia do H₂) e pelas condições especiais para o transporte (Fertilizers Europe, 2020).

Diante do exposto, uma alternativa é usar tecnologias Power-to-X, as quais utilizam o

Hidrogênio Verde (H_2V) como insumo. Dentre essas tecnologias, uma opção bastante utilizada é a amônia (NH_3). O NH_3 é um bom caminho para usar como vetor energético ou “carregador” de H_2 , podendo ser transportado a gasodutos ou navios em grandes volumes. Desta forma, a transição energética com base no H_2V tem a NH_3 verde como um componente importante e pode ajudar os países a alcançarem a meta de 2050 (Irena, 2020).

A amônia é uma matéria-prima essencial na produção de fertilizantes nitrogenados, pois é rica em nitrogênio. Esses fertilizantes são amplamente utilizados na agricultura para aumentar a produtividade do solo e viabilizar a produção de alimentos em larga escala. Nesse contexto, uma forma de reduzir as emissões de GEE provenientes da agricultura é substituir o hidrogênio fóssil, tradicionalmente utilizado na síntese da amônia, por hidrogênio verde. Isso permite a produção de amônia verde e, conseqüentemente, de fertilizantes nitrogenados de baixo impacto ambiental (Guelfi *et al.*, 2021).

Dentre os fertilizantes nitrogenados mais utilizados, destaca-se a ureia, que representa cerca de 60% do mercado global desses insumos. No entanto, sua produção depende de grandes quantidades de dióxido de carbono (CO_2). Com o avanço do uso do hidrogênio verde mudanças no mercado de fertilizantes podem ocorrer. Isso porque a menor disponibilidade de CO_2 pode tornar a produção de ureia menos viável e, conseqüentemente, favorecer outras alternativas como o nitrato de amônio (NA) (Cantarella *et al.*, 2018). Diante desse cenário, o nitrato de amônio vem ganhando destaque nos mercados nacional e internacional. Esse movimento tem impulsionado projetos para a instalação de plantas de produção de fertilizantes baseadas no uso de hidrogênio verde, obtido a partir de fontes de energia renovável. Nesse contexto, segue o seguinte questionamento da pesquisa: **“Qual o cenário nacional e internacional quanto ao desenvolvimento de projetos de produção em escala comercial de fertilizantes nitrogenados verdes?”**. A partir desse questionamento, este artigo tem como objetivo analisar o cenário dos projetos de produção de escala comercial da amônia e fertilizantes verdes.

O artigo está estruturado em 5 seções: a presente seção, seção 1, apresenta uma contextualização do tema; a seção 2 apresenta a fundamentação teórica sobre a temática do hidrogênio, amônia e fertilizantes verde; a seção 3 expõe o método da pesquisa; a seção 4 compreende o levantamento de dados e descrições dos casos e traz as análise de intercasos a partir da comparação dos dados relacionados aos projetos de fertilizantes verdes; e, por fim a seção 5 apresenta as conclusões do estudo e recomendações para estudos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Hidrogênio verde

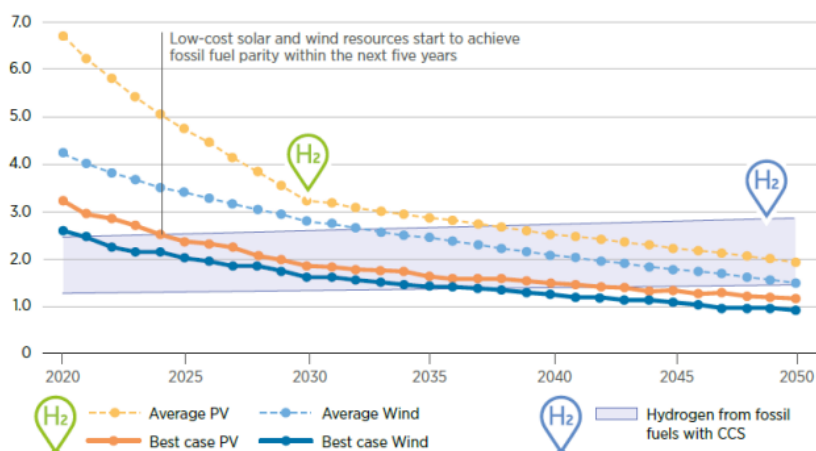
O hidrogênio é um gás sem cor, odor ou gosto com baixa densidade e alto potencial energético. Entretanto, não é um material fácil de se encontrar na face terrestre, por ter um peso atômico extremamente leve, ele escapa facilmente da superfície da terra. Por outro lado, a partícula de hidrogênio está combinada com outros elementos químicos espalhados pelo globo, o que o torna abundante, porém se faz necessário um processo de extração (Miranda, 2019).

Atualmente existem duas fontes de extrair o hidrogênio do meio ambiente, elas podem ser por meio de combustíveis fósseis ou por meio da eletrólise da água a partir de uma fonte de energia renovável, desta forma, o que determina se o hidrogênio é considerado verde, é a fonte de energia utilizada para realizar essa extração (Nikolaids; Poullikkas, 2017).

Quando a obtenção é realizada por meio de combustíveis fósseis, é liberado uma grande oferta de gás carbônico (CO_2), esse processo gera transtornos para o meio ambiente já que intensifica o efeito estufa. Por outro lado, quando esse processo é realizado a partir de uma Fonte de Energia Renovável (FER), o único resultante dessa reação é o hidrogênio e oxigênio, porém não existe liberação de carbono nesse tipo de reação, o que torna o hidrogênio produzido dessa forma um combustível limpo (Nikolaids; Poullikkas, 2017).

O hidrogênio produzido através de fontes renováveis de energia é um grande propulsor da descarbonização no mundo, visto que ele terá capacidade de energizar grandes setores que hoje em dia emitem grande oferta de carbono, como o setor de transporte, indústrias e agricultura. Apesar disso, o hidrogênio verde ainda tem um custo alto e bem mais elevado que os combustíveis fósseis. De acordo com o estudo IRENA (2020), nas próximas décadas espera ser observado uma queda no custo do hidrogênio verde, associado à produção de equipamentos (eletrolisadores) acessíveis e energias renováveis cada vez mais baratas (Figura 1). Portanto, esse estudo mostra que o hidrogênio verde pode ser sim competitivo em escala comercial em um futuro próximo e substituir o processo convencional que utiliza combustíveis fósseis.

Figura 1 - Custo de produção do hidrogênio (USD/kg H₂): produção de hidrogênio a partir de energia solar (PV), eólica (Wind) e combustíveis fósseis com captura e armazenamento de carbono.

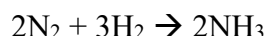


Fonte: IRENA (2020).

2.3 Amônia verde

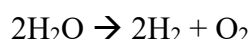
A amônia é uma importante matéria prima para a produção dos fertilizantes nitrogenados no Brasil e no mundo, segundo relatório da FAO (2023) a produção anual de amônia é estimada em 190 milhões de toneladas, sendo a maior parte para fertilizantes nitrogenados.

Convencionalmente, para a síntese de amônia, é usado o processo industrial Haber-Bosch, produzida a partir do nitrogênio (N₂) retirado da atmosfera e com H₂, com origem de combustíveis fósseis, como exemplo o gás natural e derivados do petróleo. Abaixo, segue a reação da amônia convencional:



Desta forma, quando o hidrogênio tem origem fóssil, existe uma grande emissão de Gás de Efeito Estufa (GEE), podendo chegar a 1,6 a 3,8 toneladas de CO₂ por tonelada de NH₃, dependendo da fonte de energia (Valentini, 2020; Guelfi *et al.*, 2021).

Entretanto, a amônia verde vem como uma solução para essa questão da emissão de GEE. Ela é produzida a partir de energia renovável, normalmente solar ou eólica, substituindo a os insumos fósseis. Portanto, neste caso, o hidrogênio usado no processo de síntese da amônia provém da eletrólise da água por meio de energia renovável (Guelfi *et al.*, 2021). Segue fórmula:



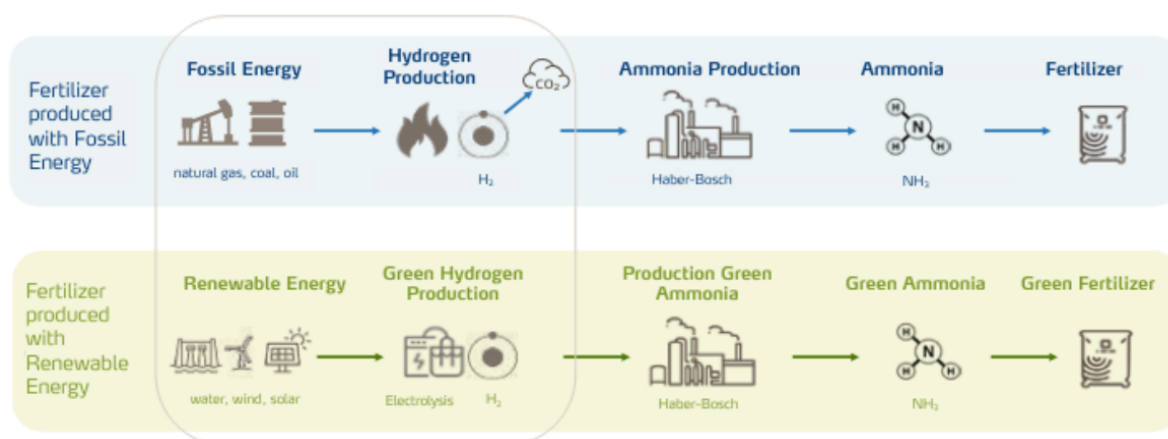
Desse modo, o hidrogênio proveniente da eletrólise da água é um hidrogênio verde, consequentemente gerando a amônia verde, com emissões de GEE praticamente nulas. Essa prática, vem sendo considerada de extrema importância para a descarbonização de vários setores industriais, tendo em vista que a amônia é matéria prima para diversos processos, entre eles o processo de fertilizantes nitrogenados

2.3 Fertilizantes nitrogenados verdes

Os fertilizantes são substâncias mineral ou orgânica que fornecem nutrientes para o cultivo e proporcionam desenvolvimento satisfatório para as plantas. Isto é, ao final de uma certa cultura, o solo perde os nutrientes, sendo assim, para realizar uma nova cultura rapidamente naquele solo, é necessário a injeção de nutrientes a partir da aplicação de fertilizantes (Reetz Jr, 2017).

Os fertilizantes hidrogenados são aqueles derivados da amônia, produzida a partir de moléculas de hidrogênio e nitrogênio no processo de Haber-Bosh. A maior parte dos fertilizantes hidrogenados, são derivados da síntese da amônia a partir de combustíveis fósseis, o que gera uma grande quantidade de emissão de GEE. Entretanto, quando se observa o fertilizante verde, este tem sua amônia produzida a partir de um hidrogênio extraído da água, usualmente, proveniente de uma eletrólise (Yara, 2023).

Figura 2 – Diferença da cadeia produtiva fertilizantes convencionais e fertilizantes verdes.



Fonte: Yara (2023).

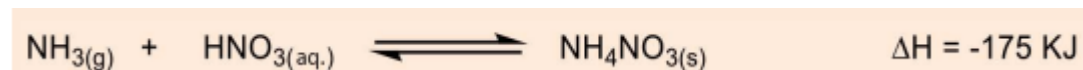
2.4 Nitrato de amônio

O nitrato de amônio (NA) é um sal inorgânico constituinte de produtos utilizados em

práticas comuns, entre elas aplicação em fertilizantes, controle de odores, agentes explosivos e propelentes para fogueiras. Sua elevada solubilidade em água e seu baixo custo, o torna um sal bastante atraente para uso agrícola, onde é responsável por aproximadamente 15% do mercado mundial de fertilizantes nitrogenados (Simplicio *et al.*, 2021).

A obtenção do nitrato de amônio vem a partir da reação exotérmica entre a amônia (NH_3) e o ácido nítrico (HNO_3), sendo essa utilizada em escala industrial para a obtenção do sal até os dias atuais.

Figura 3 – Obtenção de nitrato de amônio.



Fonte: Simplicio *et al.* (2021).

Segundo Cantarella *et al.* (2018), o NA é o terceiro fertilizante nitrogenado mais utilizado no Brasil, composto por 50% de nitrogênio na forma nítrica e 50% na forma amoniacal. Essa combinação proporciona uma absorção eficiente pelas plantas, com a forma nítrica sendo rapidamente assimilada e a amoniacal sendo absorvida de forma mais gradual.

3. MÉTODO DE PESQUISA

De acordo com Gil (2008) a pesquisa pode ser classificada quanto a sua natureza, objetivo, abordagem e procedimento técnico. Quanto a natureza o artigo trata-se de uma pesquisa aplicada, pois busca gerar conhecimento, especialmente no que se refere à produção sustentável de fertilizantes nitrogenados e seu potencial de contribuição para a descarbonização da agricultura.

No que se refere ao objetivo, esse trabalho se trata de uma pesquisa exploratória e descritiva. Exploratória pois aborda um assunto emergente no contexto mundial e principalmente nacional, e descritiva por buscar caracterizar iniciativas, dados e projeções sobre o tema, com base em fontes institucionais e acadêmicas.

Ademais, a pesquisa em questão oferece uma abordagem qualitativa, pois busca compreender e contextualizar fenômenos relacionados à adoção de hidrogênio verde na cadeia de produção de fertilizantes agrícolas.

Por último, foram realizados os procedimentos de revisão bibliográfica dos tópicos relacionados ao tema e estudo de caso de implementação de plantas de fertilizantes verdes para produção em escala comercial.

3.1. Procedimento da pesquisa

De acordo com Gil (2008) a pesquisa pode ser classificada quanto a sua natureza, objetivo, abordagem e procedimento técnico. Quanto a natureza o artigo trata-se de uma pesquisa aplicada, pois busca gerar conhecimento, especialmente no que se refere à produção sustentável de fertilizantes nitrogenados e seu potencial de contribuição para a descarbonização da agricultura.

No que se refere ao objetivo, esse trabalho se trata de uma pesquisa exploratória e descritiva. Exploratória pois aborda um assunto emergente no contexto mundial e principalmente nacional, e descritiva por buscar caracterizar iniciativas, dados e projeções sobre o tema, com base em fontes institucionais e acadêmicas.

Ademais, a pesquisa em questão oferece uma abordagem qualitativa, pois busca compreender e contextualizar fenômenos relacionados à adoção de hidrogênio verde na cadeia de produção de fertilizantes agrícolas.

Por último, foram realizados os procedimentos de revisão bibliográfica dos tópicos relacionados ao tema e estudo de caso de implementação de plantas de fertilizantes verdes para produção em escala comercial.

4. IMPACTO DO USO DO NITRATO DE AMÔNIO

A produção de hidrogênio verde (a partir de fontes renováveis como energia solar e eólica) permite gerar amônia verde (NH_3) com baixa pegada de carbono, embora não totalmente nula devido ao consumo energético no processo. No entanto, como pode-se observar na Tabela 1, as emissões de gases de efeito estufa no campo (emissão com uso), como a volatilização de NH_3 , não se alteram com o tipo de amônia utilizada — verde ou marrom.

Tabela 1 – Emissões de GEE associados à produção e uso de alguns fertilizantes nitrogenados.

Via de emissão	Ureia Kg $\text{CO}_2/\text{kg N}$	Nitrato Amônio Kg $\text{CO}_2/\text{kg N}$	Sulfato de Amônio Kg $\text{CO}_2/\text{kg N}$
Na fabricação do Fertilizante	3,6	9,33	2,86
Emissão com uso:			
N_2O no campo	5,15	3,71	4,67
N_2O via NH_3	0,61	0,03	0,10

N ₂ O via lixiviação de NO	1,04	1,03	1,05
CO ₂ da calagem (acidificação pelo N)	0,78	0,79	2,38
Total	10,95	14,89	11,05

Fonte: Adaptada de Guelfi *et al.* (2021). Dados de emissões da fabricação de N foram obtidos de Wernet *et al.* (2016); os demais provêm de fontes diversas (Fertilizers Europe, 2011).

Com a produção de H₂V, o CO₂ necessário para sintetizar ureia deixa de estar disponível, tornando a fabricação desse fertilizante menos competitiva. Assim, a ureia — hoje responsável por cerca de 60% do mercado mundial de adubos nitrogenados — tende a perder espaço. A tendência é de substituição por fertilizantes como o nitrato de amônio, sulfato de amônio, MAP e DAP, que podem ser produzidos com NH₃ verde e já são amplamente utilizados nos processos de agricultura.

O nitrato de amônio, por exemplo, oferece vantagens em relação à ureia, principalmente em solos ácidos como os do Brasil, pois apresenta menores perdas por volatilização que podem ser 90% menores do que a volatilização da ureia (Atlas Agro, 2023). Além disso, já é o segundo fertilizante nitrogenado mais usado no país. Entretanto, seu uso é controlado devido ao potencial para fabricação de explosivos. Para contornar essa limitação, uma alternativa segura é o CAN (nitrato de amônio com calcário), que apresenta boa qualidade física, menor concentração de nitrogênio e maior custo logístico.

A ureia continuará sendo importante no curto e médio prazo, mas a transição para fertilizantes com menor pegada de carbono é inevitável e exigirá adaptação por parte do setor agrícola. Técnicos e agricultores devem estar informados para escolher as melhores opções, considerando também o uso de boas práticas de aplicação e inibidores de urease para reduzir perdas (Cantarella *et al.*, 2018).

5. ESTUDO DE CASO

5.1 Atlas Agro Pacific Green Fertilizer – Estados Unidos

A Atlas Agro é uma empresa Suíça fundada em 2021, com conhecimentos na produção de fertilizantes nitrogenados com baixa emissão de carbono no meio ambiente. Sua missão é descarbonizar a agricultura global por meio da produção de fertilizantes sustentáveis, a partir do uso de hidrogênio verde e amônia verde gerados a partir de energia renovável (Atlas Agro, 2023).

A instalação da planta de produção de fertilizantes de baixa pegada de carbono em Richland, Washington, EUA, será a primeira no mundo e deve ser lançada em 2027. Tal

projeto será responsável por aumentar a disponibilidade de fertilizante de nitrato verde, reduzindo a emissão de carbono da indústria agrícola (Atlas Agro, 2023).

Segundo a Atlas Agro (2024), a planta ser construída em Washington, EUA, terá capacidade de produzir 700.000 toneladas anuais de fertilizantes nitrogenados, incluindo solução de nitrato de amônio (ANs), nitrato de cálcio (CN) e nitrato de cálcio e amônio (CAN).

Com o investimento de US\$ 1,5 bilhão e geração de 200 empregos diretos, o projeto da Atlas Agro, em Richard, representa um marco histórico na indústria de fertilizantes sintéticos, pois será a primeira planta de escala industrial a produzir fertilizantes de baixa pegada de carbono. Com previsão de início das operações em 2027, a instalação objetiva reduzir significativamente a emissão de carbono vinculado à produção de fertilizantes nitrogenados.

A planta em questão contará com energia renovável (solar e eólica) para realizar a eletrólise da água e produzir hidrogênio verde. Então este hidrogênio verde será combinado com nitrogênio para sintetizar a amônia verde, resultando em um processo sem liberação de CO₂ para o meio ambiente como acontece nas reações convencionais que utilizam combustíveis fósseis.

Por último, essa amônia verde terá seu uso final como matéria prima para a fabricação de fertilizantes nitrogenados, como o nitrato de amônio. Fertilizantes esses que são essenciais para a agricultura, fornecendo nutrientes para o crescimento das plantas. Eles terão impactos importantes no noroeste dos EUA, que deverão ser usados por produtores agrícolas, principalmente no setor de grãos. Além disso, o projeto reduz a dependência de importações de fertilizantes.

5.2 Projeto Uberaba Green Fertilizer – Brasil

O projeto de instalação da planta de fertilizante verde Uberaba Green Fertilizer, também é uma iniciativa da Atlas Agro, empresa suíça de fertilizantes nitrogenados verdes. Essa planta estará situada em Uberaba, Minas Gerais, Brasil, tendo previsão de início das operações em 2028. A implementação dessa instalação vem de uma parceria entre a empresa suíça e a casa dos ventos, empresa brasileira especializada no desenvolvimento de projetos de energia renovável, especialmente energia eólica, solar e hidrogênio verde (ATLAS AGRO, 2023).

O projeto em questão contará com o investimento de US\$ 850 milhões de dólares (R\$ 4,3 bilhões de reais) e uma capacidade de produção de 500.000 toneladas de fertilizantes

nitrogenados por ano, incluindo nitrato de amônio granulado e líquido.

É importante ressaltar que a energia requerida para a eletrólise do hidrogênio verde, base para a amônia verde, que servirá de matéria-prima para a produção dos fertilizantes sintéticos, provém de fontes renováveis, como a solar e a eólica. Por sua vez, essa planta deverá ter uma demanda anual de energia renovável de aproximadamente 2,5 TWh.

O processo de produção de fertilizante verde deve seguir o seguinte fluxo: 1) Produção de hidrogênio verde via eletrólise da água; 2) Síntese de amônia verde a partir do hidrogênio e nitrogênio do ar; 3) Produção de ácido nítrico e, posteriormente, nitrato de amônio. O fato da substituição de combustíveis fósseis por energia renovável, trará uma redução de 99% das emissões de CO₂ em comparação com métodos tradicionais (ATLAS AGRO, 2023).

5.3 Análise de intercasos e discussão

A partir da análise intercasos, foi possível estruturar a Tabela 2 com os dados comparativos entre os dois projetos. A formatação dessa tabela facilitou a identificação das semelhanças entre as iniciativas, tanto no que diz respeito à estrutura das plantas e aos investimentos realizados, quanto aos objetivos estratégicos traçados por ambas as instalações.

As duas instalações de fertilizantes verdes representam um marco significativo para a agricultura mundial, especialmente por atuarem em um setor historicamente difícil de ser descarbonizado. Esses projetos sinalizam uma transição concreta para práticas agrícolas de baixa emissão de carbono. Embora compartilhem estratégias tecnológicas semelhantes, as plantas foram adaptadas aos contextos específicos de suas localizações, considerando, sobretudo, a demanda regional por fertilizantes. Ambas as unidades têm como base tecnológica a produção de hidrogênio verde por meio da eletrólise da água, utilizando exclusivamente fontes de energia renovável. Esse hidrogênio, gerado de forma sustentável, é posteriormente utilizado na síntese de amônia verde, que se torna a matéria-prima essencial para a fabricação de fertilizantes nitrogenados.

É observado também o impacto econômico e ambiental das instalações, juntas elas vão contribuir para a descarbonização da agricultura e fortalecer a produção local. O uso de energia renovável para a produção de hidrogênio verde, reflete a tendência mundial de descarbonização dos processos produtivos. Além disso, ambas as instalações geraram empregos diretos e indiretos para a população local.

Ademais, ambas as plantas apresentam elevada capacidade produtiva e operam em escala comercial, consolidando-se como instalações industriais voltadas à produção de fertilizantes sintéticos verdes. Juntas, as unidades de Richland (EUA) e Uberaba (Brasil)

poderão alcançar uma produção anual de até 1,2 milhão de toneladas de fertilizantes nitrogenados por ano. Especificamente, a planta de Uberaba terá capacidade de produzir até 500 mil toneladas por ano, o que representa aproximadamente 1,1% da demanda nacional, que em 2024 foi de 45,61 milhões de toneladas (GLOBAL FERT, 2025). Embora essa capacidade ainda não atenda uma parcela significativa da demanda brasileira, trata-se de um avanço expressivo na direção da descarbonização da cadeia agrícola. O investimento inicial nesse tipo de tecnologia indica uma tendência crescente de expansão e replicação de projetos sustentáveis no setor de fertilizantes.

Tabela 2 – Análise intercasos dos projetos de produção de fertilizantes verdes.

Item	Pacific Green Fertilizer (PGF)	Uberaba Green Fertilizer (UGF)
Local	Richland, Washington, EUA	Uberaba, Minas Gerais, Brasil
Investimento	~US\$ 1,5 bilhão	~R\$ 4,3 bilhões (US\$ 850 mi)
Data de início das operações	2027	2028
Capacidade da planta de amônia	Energia elétrica renovável	2,5 TWh/ano (solar e eólica - Casa dos Ventos)
Capacidade da planta de fertilizantes	700.000 t/ano (AN, CN, CAN)	500.000 t/ano (nitrato de amônio granulado/líquido)
Insumos para a produção de fertilizantes	Ar, água, energia elétrica renovável	Ar, água, energia elétrica renovável
Potencial de mitigação de CO ₂	Estimada em >1 milhão t CO ₂ /ano	>1 milhão t CO ₂ /ano
Empregos gerados	~1.000 empregos temporários (obra); ~200 diretos (operação)	~3.000 empregos temporários (obra); ~180 diretos (operação)
Uso final da amônia e/ou fertilizante	Produção local para agricultores dos EUA (cereais, frutas, vegetais)	Substituição de fertilizantes importados; foco em sustentabilidade da agricultura nacional

Fonte: Autores.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A descarbonização é um tema frequente e desafiador para a sociedade atual, portanto a comunidade ambiental vem buscando parcerias com os maiores produtores e indústrias do mundo para criar soluções para essa problemática.

Tendo em vista esta problemática, o hidrogênio verde alinhado a tecnologias Power-to-X vem se comportando como propulsores da descarbonização no mundo. Além disso, a amônia também é enxergada como uma das tecnologias Power-to-X que tem capacidade de transportar o hidrogênio de maneira mais eficiente e segura. Em consonância com isso, a amônia é uma importante matéria prima para os fertilizantes nitrogenados, e quando

sintetizada a partir do hidrogênio verde e livre de combustíveis fósseis, tem potencial de eliminar a geração de gases de efeito estufa dentro da cadeia de produção de fertilizantes verdes.

Outro fator importante, com a mitigação de CO₂ no processo de produção de fertilizantes, é a substituição dos fertilizantes nitrogenados do tipo ureia, para outras variedades, como exemplo o nitrato de amônio (NA). Esse tipo de adubo nitrogenado possui vantagens por ter uma menor volatilização e conseqüentemente menos emissões de dióxido de carbono na atmosfera durante o uso no campo agrícola.

Nesse contexto surgiu o seguinte questionamento da pesquisa: “Qual o cenário nacional e internacional quanto ao desenvolvimento de projetos de produção em escala comercial de fertilizantes nitrogenados verdes?” A resposta para este questionamento foi obtida a partir da pesquisa teórica, estudo de caso dos projetos de produção de amônia e fertilizantes verdes, e análise de intercasos.

A partir dessa análise, é possível observar que as organizações estão se mobilizando para implementar plantas de produção de fertilizantes verdes, sobretudo com foco comercial, a fim de atender à demanda local e nacional. Nos casos estudados, a produção de nitrato de amônio ainda é insuficiente para suprir toda a demanda interna. No entanto, representa um passo inicial importante para reduzir essa lacuna e incentivar novos investimentos que contribuam para a redução de custos ao longo da cadeia produtiva.

A partir da análise de projetos, também foram identificadas lacunas de temas de estudo necessários para o desenvolvimento do setor de amônia e fertilizantes verdes, são elas: (i) Sequestro de carbono em sistemas com adubação verde; (ii) Estudo detalhado da cadeia de valor da amônia e fertilizantes verdes; (iii) Análise do Ciclo de Vida (ACV) de Fertilizantes Verdes; e, (iv) Quantificação da Redução de Emissões com Fertilizantes Verdes.

REFERÊNCIAS

ATLAS AGRO. **Atlas Agro lidera a transição do nitrogênio verde**. Canarana, 2023. Disponível em: <<https://www.atlasagro.ag/pt/atlas-agro-lidera-a-transicao-do-nitrogenio-verde/>>. Acesso em 29 de abril 2025.

GLOBAL FERT. **Entregas de fertilizantes no Brasil caem 0,5% em 2024**. 11 de março de 2025. Disponível em: <<https://globalfert.com.br/noticias/mercado/entregas-de-fertilizantes-no-brasil-caem-05-em-2024/>>. Acesso em 01 de março 2025.

CANTARELLA, H.; OTTO, R.; SOARES, J. R.; SILVA, A. G. B. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. **Journal of Advanced Research**, v. 13, p. 19–27, 2018.

FAO. **Food Outlook: Biannual Report on Global Food Markets**. Rome: FAO, 2023. Disponível em: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/cc7724en>. Acesso em: 6 maio 2025.

FERTILIZERS EUROPE. **Paving the way to green ammonia and low-carbon fertilizers**. Brussels, 2020. 8 p. Disponível em: <https://www.fertilizerseurope.com/wp-content/uploads/2020/07/Paving-the-way-to-green-ammonia-and-low-carbon-fertilizers-digital.pdf>. Acesso em 6 maio 2025.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GUELFY, D. R.; SILVA, R. C.; OTTO, R.; CANTARELLA, H. Avanços nas pesquisas e tecnologias para fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 11, p. 101–159, 2021.

IEA. **CO₂ emissions in 2023: Emissions grew in 2023, but clean energy is limiting the growth**. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023/emissions-grew-in-2023-but-clean-energy-is-limiting-the-growth#abstract>. Acesso em: 6 maio 2025.

IRENA, **Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050**, IRENA, 2020.

MIRANDA, P. E. V., Editor, **Science and Engineering of Hydrogen Based Energy Technologies**, 1st Edition, ELSEVIER, Academic Press, 438 p, 2019.

NIKOLAIDIS, P.; POULLIKAS, A. **A comparative overview of hydrogen production processes**. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 67, p. 597-611, 2017.

OTTO, R.; CANTARELLA, H.; GUELFY-SILVA, D. R.; CARVALHO, M. C. S. Nitrogênio na sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 9, p. 30–50, 2021.

PAN, B.; LAM, S. K.; MOSIER, A.; LUO, Y.; CHEN, D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 232, p. 283–289, 2016.

REETZ JR, H. F. **Fertilizantes e seu Uso Eficiente**. 1º ed. Copyright 2016 IFA. São Paulo, 2017.

SIMPLICIO, S. S. *et al.* **Nitrato de amônio: mocinho ou vilão?** *Revista Virtual de Química*, v. 13, n. 1, [s. l.], 2021. Disponível em: <https://rvq.s bq.org.br/imagebank/pdf/rvqv13n1a07-prelo.pdf>. Acesso em: 6 maio 2025.

VALENTINI, A. **Green shift to create 1 billion tonne “green ammonia” market?** London: Argus Media, 2020. 6 p.

YANG, H.; HE, G.; MASANET, E.; DESHMUKH, R. Role of hydrogen in decarbonizing China's electricity and hard-to-abate sectors. 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2410.17947>. Acesso em: 6 maio 2025.

YARA. Reduce your product carbon footprint with green fertilizer. 2023. Disponível em: . Acesso em: 06 de maio de 2025.