

ESCOLA DE QUÍMICA

**Emerson Cavalcante Ferreira**

**Manuela Corrêa Cerqueira Barrozo da Silva**



**ESTUDO DE OPORTUNIDADES DE FOMENTO À  
INDÚSTRIA NACIONAL DE FERTILIZANTES  
COM FOCO NA DESCARBONIZAÇÃO DA  
CADEIA PRODUTIVA DE ALIMENTOS**

RIO DE JANEIRO

2024

Emerson Cavalcante Ferreira  
Manuela Corrêa Cerqueira Barrozo da Silva

ESTUDO DE OPORTUNIDADES DE FOMENTO À INDÚSTRIA NACIONAL DE  
FERTILIZANTES COM FOCO NA DESCARBONIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA  
DE ALIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientadora: Clarice Campelo de Melo Ferraz

Rio de Janeiro

2024

## PÁGINA FICHA CATALOGRÁFICA

Gerar a página da ficha catalográfica em <http://fichacatalografica.sibi.ufrj.br/> e substituir esta página por ela, no documento final.

Se o documento vier a ser impresso, esta página deverá ser impressa no verso da anterior (folha de rosto).

Emerson Cavalcante Ferreira  
Manuela Corrêa Cerqueira Barrozo da Silva

ESTUDO DE OPORTUNIDADES DE FOMENTO À INDÚSTRIA NACIONAL DE  
FERTILIZANTES COM FOCO NA DESCARBONIZAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA  
DE ALIMENTOS

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Escola de Química da  
Universidade Federal do Rio de Janeiro,  
como parte dos requisitos necessários à  
obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado em 15 de fevereiro de 2024.

---

Clarice Campelo de Melo Ferraz, D. Sc., UFRJ.

---

Ana Maria Rocco, D. Sc., UFRJ

---

Marcelo Mendes Viana, D. Sc., UFRJ

Rio de Janeiro

2024

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, a Deus, pela nossa vida, por ter permitido que tivéssemos saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste trabalho.

Aos nossos pais, pelo incentivo e investimento na nossa educação desde pequenos e pelo suporte ao longo dos anos para que alcançássemos nossos objetivos pessoais e profissionais.

Aos amigos/familiares, por todo o apoio e ajuda ao longo desses longos anos de vida e faculdade.

A todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o nosso processo de aprendizado.

Aos professores da UFRJ e, em especial, a orientadora Professora Clarice Ferraz pelas correções e ensinamentos que nos permitiram apresentar um melhor resultado desse projeto.

## RESUMO

FERREIRA, Emerson C.; DA SILVA, Manuela C. C. B. **Estudo de Oportunidades de Fomento à Indústria Nacional de Fertilizantes com Foco na Descarbonização da Cadeia Produtiva de Alimentos**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

O Brasil é o quarto consumidor mundial de fertilizantes (MAPA, 2022b). No entanto, a indústria nacional está longe de ser suficiente para atender a demanda interna, tornando o país extremamente dependente do mercado externo com um patamar recorde de 80% de importação, em 2022, em relação ao total de consumo (MAPA, 2022b). A crise recente nesse setor, desencadeada por uma conjunção de fatores como pandemia, conflitos geopolíticos, sanções, políticas governamentais e questões climáticas, evidenciou ainda mais a gravidade das potenciais consequências atreladas a vulnerabilidade do país quanto ao acesso aos fertilizantes, justamente por ser um dos mercados mais importantes no fornecimento de alimentos e outras culturas globalmente. Adicionalmente, como o setor é extremamente intensivo na utilização de combustíveis fósseis em sua cadeia produtiva e o Brasil comprometeu-se, através da assinatura de acordos internacionais, a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Nesse sentido, o presente trabalho visa propor rotas alternativas de fertilizantes que não só sejam favoráveis ao mercado brasileiro como também sejam ambientalmente sustentáveis. Para tal, uma matriz SWOT foi elaborada a fim de analisar as perspectivas de mercado para cada uma das rotas sugeridas.

Palavras-chave: Fertilizantes; indústria nacional; rotas alternativas

## ABSTRACT

FERREIRA, Emerson C.; DA SILVA, Manuela C. C. B. **Study of Opportunities to Promote the National Fertilizer Industry with a Focus on the Decarbonization of the Food Production Chain.** Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Brazil is the fourth largest consumer of fertilizers worldwide (MAPA, 2022b). However, the domestic industry is far from sufficient to meet internal demand, making the country extremely dependent on the external market with a record level of 80% of imports in 2022, in relation to total consumption (MAPA, 2022b). The recent crisis in this sector, triggered by a combination of factors such as the pandemic, geopolitical conflicts, sanctions, government policies, and climate issues, further highlighted the seriousness of the potential consequences associated with the country's vulnerability regarding access to fertilizers, precisely because it is one of the most important markets in supplying food and other crops globally. Additionally, since the sector is extremely intensive in the use of fossil fuels in its production chain and Brazil has committed, through the signing of international agreements, to reduce its greenhouse gas (GHG) emissions. In this sense, the present work aims to propose alternative routes for fertilizers that are not only favorable to the Brazilian market but also environmentally sustainable. To this end, a SWOT matrix was developed to analyze the market prospects for each of the suggested routes.

Keywords: Fertilizers; domestic industry; alternative routes

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Nutrientes essenciais para o metabolismo celular vegetal.....	17
Figura 2.2: Cadeia Produtiva dos Fertilizantes.....	19
Figura 2.3: Fluxograma Simplificado da Produção de SSP e TSP.....	23
Figura 2.4: Fluxograma do Processo de Produção da Amônia a partir do Gás Natural.....	24
Figura 2.5: Fluxograma do Processo de produção da Ureia.....	25
Figura 2.6: Fluxograma Simplificado da Produção de MAP e DAP.....	26
Figura 2.7: Processo Produtivo da Ureia com Adição dos Insumos Não Produtivos.....	27
Figura 2.8: Importância da agricultura brasileira em nível mundial.....	34
Figura 2.9: Dependência externa de Fertilizantes no Brasil.....	35
Figura 2.10: Principais origens da importação de cloreto de potássio (2018) .....	36
Figura 2.11: Principais origens da importação de fertilizantes nitrogenados (2018) .....	36
Figura 2.12: Diretrizes norteadoras do Plano Nacional de Fertilizantes (2022) .....	38
Figura 2.13: Tendências e melhores práticas para os fertilizantes nitrogenados.....	40
Figura 2.14: Tendências e melhores práticas para os fertilizantes fosfatados.....	41
Figura 2.15: Tendências e melhores práticas para os fertilizantes potássicos.....	41
Figura 2.16: Tendências e melhores práticas para as cadeias emergentes de fertilizantes.....	42
Figura 4.1: Consumo de energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis no Brasil e no mundo em 2020.....	47
Figura 4.2: Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW) – Fontes Renováveis.....	47
Figura 4.3: Principais rotas tecnológicas de H <sub>2</sub> verde no Brasil.....	48
Figura 4.4: Estrutura hidropônica com mudas de alface em estudo sobre Arbolina.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Ranking geral de produção de fertilizantes NPK entre 2019 e 2020.....	29
Tabela 2.2: Ranking geral de consumo de fertilizantes NPK em 2019.....	30
Tabela 2.3: Top 5 de consumo, produção, exportação e importação de fertilizantes NPK em 2019.....	32
Tabela 3.1: Palavras-chave e Operador Booleano na busca de Publicações Científicas.....	43
Tabela 4.1: Análise SWOT do mercado de hidrogênio verde.....	49
Tabela 4.2: Análise SWOT do mercado de arbolina.....	57

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1: Consumo de fertilizantes por país em 2019.....	30
Gráfico 2.2: Top 5 exportadores mundiais de fertilizantes entre 2015 e 2019.....	31
Gráfico 2.3: Top 5 importadores mundiais de fertilizantes entre 2015 e 2019.....	31
Gráfico 2.4: Representação da balança comercial (em milhões de toneladas) referente aos 3 países com maiores déficits e 3 países com maiores superávits no período de 2015 a 2019..	32

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADP	Adenosina Difosfato
ATP	Adenosina Trifosfato
CAGR	Taxa de Crescimento Anual Composta
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
DAP	Fosfato de Diamônio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária
ESALQ	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
ETA	Estação de Tratamento de Água

ETE	Estação de Tratamento de Estacionamento
EUA	Estados Unidos da América
FAO	Food and Agriculture Organization
GEE	Gases do Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFA	International Fertilizer Industry Association
MAP	Fosfato de Monoamônio
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
NPK	Nitrogen, Phosphorum and Potassium (Nitrogênio, Fósforo e Potássio)
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno Bruto
SINPRIFERT	Sindicato Nacional das Indústrias de Matérias-Primas para Fertilizantes
SSP	Superfosfato Simples
TSP	Superfosfato Triplo
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USP	Universidade de São Paulo

### LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta H$	Variação de Entalpia ( $J \cdot mol^{-1}$ )
------------	---

### LISTA DE FÓRMULAS

$CaF_2$	Fluoreto de Cálcio
$Ca(H_2PO_4)_2$	Dihidrogenofosfato de Cálcio
$Ca_3(PO_4)_2$	Fosfato de Cálcio
$CaSO_4$	Sulfato de Cálcio
$CH_4$	Metano
$CO$	Monóxido de Carbono

$CO_2$	Dióxido de Carbono
$CO(NH_2)_2$	Ureia
$H_2$	Molécula Diatômica de Hidrogênio
$HF$	Ácido Fluorídrico
$H_2O$	Água
$HNO_3$	Ácido Nítrico
$HPO_4^{2-}$	Hidrogenofosfato
$H_2PO_4^-$	Dihidrogenofosfato
$H_2SO_4$	Ácido Sulfúrico
$H_3PO_4$	Ácido Fosfórico
$K^+$	Íon Potássio
$KCl$	Cloreto de Potássio
$K_2O$	Óxido de Potássio
$N_2$	Molécula Diatômica de Nitrogênio
$NaCl$	Cloreto de Sódio
$NH_3$	Amônia
$NH_4^+$	Amônio
$NH_2CO_2NH_4$	Carbamato de Amônio
$NH_4H_2PO_4$	Fosfato de Monoamônio
$(NH_4)_2 H_2PO_4$	Fosfato de Diamônio
$NH_4NO_3$	Nitrato de Amônio
$(NH_4)_2 SO_4$	Sulfato de Amônio
$NO_3^-$	Nitrato
$P_2O_5$	Pentóxido de Fósforo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1 Contexto e Motivação.....	13
1.2 Objetivos.....	14
<b>2 FERTILIZANTES.....</b>	<b>15</b>
2.1 Tipos de Fertilizantes.....	17
2.1.1 Fertilizantes Minerais.....	17
2.1.2 Fertilizantes de Cadeias Emergentes.....	20
2.2 Rotas Tradicionais de Produção de Fertilizantes.....	22
2.2.1 Fertilizantes Fosfatados.....	22
2.2.2 Fertilizantes Nitrogenados.....	23
2.2.3 Fertilizantes Potássicos.....	27
2.2.4 Fertilizantes NPK.....	28
2.3 Mercado de Fertilizantes.....	28
2.3.1 Cenário Mundial.....	28
2.3.2 Cenário Nacional.....	33
2.3.2.1 Plano Nacional de Fertilizantes.....	37
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>42</b>
3.1 Pesquisa Sistemática de Bibliografia.....	42
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>43</b>
4.1 Rotas Alternativas para Produção de Fertilizantes.....	43
4.1.1 Amônia Verde.....	45
4.1.1.1 Amônia Verde – Contexto Brasileiro .....	46
4.1.1.2 Principais desafios e estratégias para Amônia Verde.....	51
4.1.2 Arbolina .....	53
4.1.2.1 Principais desafios e estratégias para Arbolina.....	58
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>59</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>61</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

Os fertilizantes são compostos químicos utilizados na agricultura convencional para aumentar a quantidade de nutrientes no solo e obter ganhos de produtividade na produção de alimentos e outras culturas. Dentre os principais tipos de fertilizantes, destacam-se os nitrogenados, fosfatados e potássicos.

Enquanto o fósforo e o potássio podem ser extraídos diretamente da natureza como sais, em depósitos minerais, o fertilizante nitrogenado é obtido a partir da reação do nitrogênio atmosférico com o hidrogênio, cuja produção, por sua vez, é extremamente intensiva em energia. Estima-se que 70% a 75% dos custos de produção são relativos aos gastos com gás natural (LEÃO, 2020). Sendo os fertilizantes nitrogenados, como a ureia, os mais consumidos mundialmente, representando quase 60% da demanda total (CNA, 2017), fica evidente a dependência energética dessa indústria.

A oferta de gás natural, por sua vez, é bastante concentrada mundialmente. A Rússia e os Estados Unidos, concentram 40% da produção global de gás natural (IBP, 2022). No mercado europeu, por exemplo, até a invasão da Rússia à Ucrânia, a União Europeia (UE) era altamente dependente dos recursos energéticos russos. Dados mostram que cerca de 45% do total de importações de gás da UE era proveniente da Rússia em 2021 (KARDÁS, 2023). Essa dependência energética, entretanto, desencadeou graves consequências para a indústria de fertilizantes. Pode-se citar as restrições impostas por sanções internacionais à Rússia que causaram uma redução brusca do fluxo de exportação de energia e gás aos clientes europeus, que por sua vez tiveram que buscar alternativas de suprimento.

Nesse cenário, enquanto a UE buscava alternativas ao gás russo, grandes empresas de fertilizantes se viram obrigadas a reduzir significativamente suas operações e a repassar o aumento dos custos dos combustíveis fósseis aos seus clientes. Com efeito, em 2022, mais de 70% da capacidade de produção da Europa foi reduzida (LARKIN E SPENCE, 2022). Yara International (Sede Noruega), CF Industries (Sede EUA) e Achema (Sede Alemanha) estão entre as empresas que anunciaram cortes.

Além da guerra entre Rússia e Ucrânia, diversos outros fatores contribuíram para a diminuição da oferta de fertilizantes nos últimos anos, culminando no aumento da incerteza de abastecimento e no preço de exportação mundialmente. Pode-se citar a imposição de cotas restritivas de exportações pela China (HKTDC, 2020), como medida protetiva ao abastecimento interno, a aplicação de sanções na Bielorrússia que limitou a exportação de fertilizantes pelo

Canal da Lituânia (GLAUBER E LABORDE, 2022), as metas climáticas de redução da emissão de gases de efeito estufa (GOVERNMENT OF CANADA, 2022), além de desastres ambientais que fecharam fábricas, parando a produção, como enchentes na China (GLOBAL FERT, 2020).

A expressiva diminuição da oferta de fertilizantes no cenário mundial deu ênfase no grave problema de dependência do agronegócio brasileiro em relação à importação de fertilizantes, comprovado pelos altos índices de importação. Segundo o estudo realizado pela Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos do Governo Brasileiro sobre o mercado de fertilizantes, o Brasil passou de exportador para um grande importador entre 1992 e 2020, visto que a demanda interna cresceu em velocidade superior à oferta nacional. Dessa forma, a relevância expressiva de importação frente à exportação de fertilizantes aponta para um déficit na balança comercial do setor no Brasil.

Assim, esse desequilíbrio prolongado na balança comercial tem provocado debates sobre a necessidade de implementação de políticas públicas para incentivar a indústria no país, pois o alto volume de importação deixa as atividades agrícolas, extremamente vulneráveis às oscilações cambiais e às possibilidades de interrupções de fornecimento.

Essa estratégia de incentivo à indústria, por sua vez, deve estar alinhada com práticas sustentáveis, uma vez que o Brasil é signatário do Acordo de Paris e comprometeu-se a diminuir as emissões de carbono em 37% até 2025, e em 43% até 2030. Existem rotas alternativas na produção de fertilizantes capazes de contribuir de forma mais expressiva para o atingimento da meta de descarbonização da cadeia produtiva e que, portanto, podem ser levadas em consideração nas estratégias de fomento à indústria nacional de fertilizantes.

Diante do panorama exposto, este trabalho tem como objetivo analisar as oportunidades de fomento à indústria nacional de fertilizantes aliada à redução das emissões de carbono ao longo da cadeia produtiva de alimentos.

## **1.2 OBJETIVOS**

O presente estudo tem como objetivo identificar e analisar rotas alternativas de produção nacional de fertilizantes que contribuam com o compromisso do Brasil em relação as metas de redução da emissão de carbono.

Os objetivos específicos são:

- Identificar e propor rotas alternativas de produção de fertilizantes que contribuam para estratégias de descarbonização da cadeia produtiva;
- Analisar forças e fraquezas do Brasil quanto à implementação das rotas alternativas escolhidas para produção de fertilizantes;
- Propor estratégias de fomento à indústria nacional de fertilizantes a partir das rotas alternativas escolhidas.

## **2 FERTILIZANTES**

Os sinais mais antigos de atividades agrícolas têm origem na região do Crescente Fértil, que abrangia o Vale do Nilo, no antigo Egito, além da Mesopotâmia. Neste lugar era normal acontecerem inundações que carreavam uma série de compostos, tanto inorgânicos quanto orgânicos, que o homem começou a utilizar no cultivo do solo e potencialização da fertilidade da terra. (LOPES, 2003).

Na Grécia antiga e no período do Império Romano, alguns escritores e filósofos se ocuparam em registrar técnicas agrícolas que foram disruptivas e que são empregadas ainda hoje, como: o uso de esterco e materiais calcários para fins agrícolas (LOPES, 2003). Outro registro interessante é o dos Índios Maias que utilizavam guano em suas plantações antes mesmo da chegada dos espanhóis. Este material é formado por depósitos de excrementos de aves e morcegos que se solidificavam em áreas rochosas. (LINS E LUZ, 2008).

A definição de solo pode variar bastante de acordo com o campo de aplicação, todavia, se tratando do setor agrícola este termo é utilizado para definir o meio físico no qual as plantas, bem como outros organismos vivos, são conduzidos para crescerem e se desenvolverem com a finalidade de abastecer a população mundial (RIBEIRO, 2009). Nesta conjuntura, a fertilidade do solo, que depende fundamentalmente da disponibilidade de nutrientes, é uma condição significativa para se obter safras produtivas e, por consequência, um fator determinante para a competitividade das commodities brasileiras no mercado internacional (CELLA E ROSSI, 2010).

Frequentemente, não há compatibilidade – qualitativa e/ ou quantitativa - entre os nutrientes presentes em determinado tipo de solo e a demanda que uma cultura almejada necessita para se desenvolver de forma plena. Este fato pode acontecer por uma incompatibilidade natural, ou até mesmo pelo próprio exaurimento do solo já explorado. Em todo caso, é possível realizar o enriquecimento da terra com elementos químicos essenciais,

que estão presentes nos fertilizantes e que são classificados como macronutrientes ou micronutrientes.

Os macronutrientes obtidos pelas plantas a partir da água ou do  $\text{CO}_2$  são: carbono, hidrogênio e oxigênio; os macronutrientes obtidos a partir do solo são: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre; enquanto os micronutrientes são: boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio, zinco e níquel (EICHHORN, EVERT E RAVEN, 2014).

Apesar da falta de qualquer dos nutrientes supracitados resultar em prejuízos ao plantio, em termos de produção, o nitrogênio (N), o fósforo (P) e o potássio (K) demonstram proeminência por serem as deficiências mais comuns encontradas. Os demais elementos são comercializados em quantidades muito menores, não tendo qualquer relevância em termos econômicos.

O nitrogênio é um elemento básico para todos os seres vivos, uma vez que sua forma de gás ( $\text{N}_2$ ) compõe 78% da atmosfera do planeta terra. Uma vez que o  $\text{N}_2$  é convertido em amônio ou nitrato, por reações químicas ou bactérias simbióticas presentes no solo, o nitrogênio torna-se um nutriente e pode ser assimilado pelas plantas. O fósforo, por sua vez, pode ser encontrado em minerais no solo e na matéria orgânica, necessitando ser convertido em íons de fosfato inorgânico e, na sequência, absorvidos e deslocados pelas raízes até o sistema vascular. Por fim, o potássio, também presente em minerais do solo e matéria orgânica, é adsorvido pelas plantas na sua forma iônica (REETZ, 2017).

Sobre a importância de cada um destes elementos no metabolismo celular dos vegetais, sabe-se que o nitrogênio é parte essencial do processo de fotossíntese, uma vez que está presente na molécula de clorofila e, além disso, também é integrante de substâncias como aminoácidos e proteínas. Já o fósforo, na forma de fosfato, como em boa parte dos seres vivos, é importantíssimo na geração e deslocamento de energia da célula vegetal, bem como na sua respiração e fotossíntese. Não menos importante, o potássio está presente na membrana das células, realizando o balanço hídrico e iônico, bem como, regulando processos químicos e enzimáticos e de absorção de nutrientes (EICHHORN, EVERT E RAVEN, 2014).

A Figura 2.1 mostra os nutrientes essenciais para o metabolismo celular vegetal e suas respectivas funções.

**Figura 2.1 – Nutrientes essenciais para o metabolismo celular vegetal**

Elemento	Forma Disponível para as Plantas	Concentração Habitual das Plantas Sadias (% ou ppm do peso seco)	Funções
Fósforo	$H_2PO_4^-$ e $HPO_4^{2-}$	0,2%	Componente de Compostos fosfatados que encerram energia (ATP e ADP), ácidos nucleicos, coenzimas essenciais e fosfolípidos
Nitrogênio	$NO_3^-$ e $NH_4^+$	1,5%	Presente em aminoácidos, proteínas, nucleotídeos, ácidos nucleicos, clorofilas e coenzimas
Potássio	$K^+$	1%	Envolvido na osmose e no equilíbrio iônico, e na abertura e fechamento dos estômatos; cofator de muitas enzimas

Fonte: Adaptado de Eichhorn, Evert e Raven (2014)

No intuito de repor os elementos que são retirados em cada colheita, e visando manter ou até aumentar o potencial produtivo do solo, são utilizados produtos denominados fertilizantes. Desta forma, os fertilizantes são substâncias que fornecem um ou mais nutrientes necessários ao desenvolvimento e crescimento de plantas; os mais utilizados são os industriais e os de origem orgânica (LOPES E SILVA, 2012); (BRANDÃO et al., 2015). Sem o uso destas substâncias, seria impossível o aumento da produtividade da produção de alimentos, do mercado agro e da população mundial.

Neste sentido, a aplicação de fertilizantes, em quaisquer que sejam os sistemas de produção, tem a finalidade de manter os níveis de produtividade adequados para que os investimentos de produção sejam retornados. (REETZ, 2017).

## 2.1 TIPOS DE FERTILIZANTES

### 2.1.1 FERTILIZANTES MINERAIS

Os fertilizantes estão definidos na legislação brasileira como substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes das plantas. Os fertilizantes minerais, por sua vez, são produtos de natureza fundamentalmente mineral, natural ou sintético, obtido por processo físico, químico ou físico-químico (BRASIL, 2004). Estes produtos podem ser subcategorizados da seguinte maneira:

- **Fertilizante mineral simples:** produto formado, fundamentalmente, por um composto químico, contendo um ou mais nutrientes de plantas.

- **Fertilizante mineral misto:** produto resultante da mistura física de dois ou mais fertilizantes minerais.

- **Fertilizante mineral complexo:** produto formado de dois ou mais compostos químicos, resultante da reação química de seus componentes, contendo dois ou mais nutrientes.

Levando em conta a presença dos macronutrientes essenciais, os fertilizantes minerais podem ser classificados em quatro categorias: fertilizantes nitrogenados, fertilizantes fosfatados, fertilizantes potássicos e os fertilizantes NPK.

A extração de rochas minerais, do gás natural e do petróleo são as bases do segmento de fertilizantes. Os nitrogenados têm como matéria-prima fundamental a amônia, que é obtida numa reação 1:3 entre o nitrogênio presente no ar e o hidrogênio contido no gás de síntese que é formado a partir do gás natural, do resíduo asfáltico de petróleo e da nafta. A amônia pode ser combinada em diferentes processos, gerando os fertilizantes nitrogenados básicos, como o nitrato de amônio, sulfato de amônio, ureia, MAP e DAP. Estes últimos, por sua vez, também fazem parte da cadeia de fertilizantes fosfatados (DIAS E FERNANDES, 2006).

Os fertilizantes básicos fosfáticos e potássicos possuem a origem de suas cadeias na mineração. Enquanto a rocha potássica já possui o cloreto de potássio, que é a forma final do fertilizante básico, necessitando apenas de processos físicos de enriquecimento; a rocha fosfática precisa sofrer um enriquecimento mineral com ácidos sulfúrico e fosfórico, também com origem na mineração, gerando SSP, TSP, MAP e DAP. Os fertilizantes básicos supracitados passam por processos físicos, dando origem aos fertilizantes complexos comerciais, que são os fertilizantes granulados e as misturas de formulação NPK. A mistura de fertilizantes NPK, geralmente, consiste em reunir diversos ingredientes para atender às necessidades de N, P e K na formulação desejada (DIAS E FERNANDES, 2006).

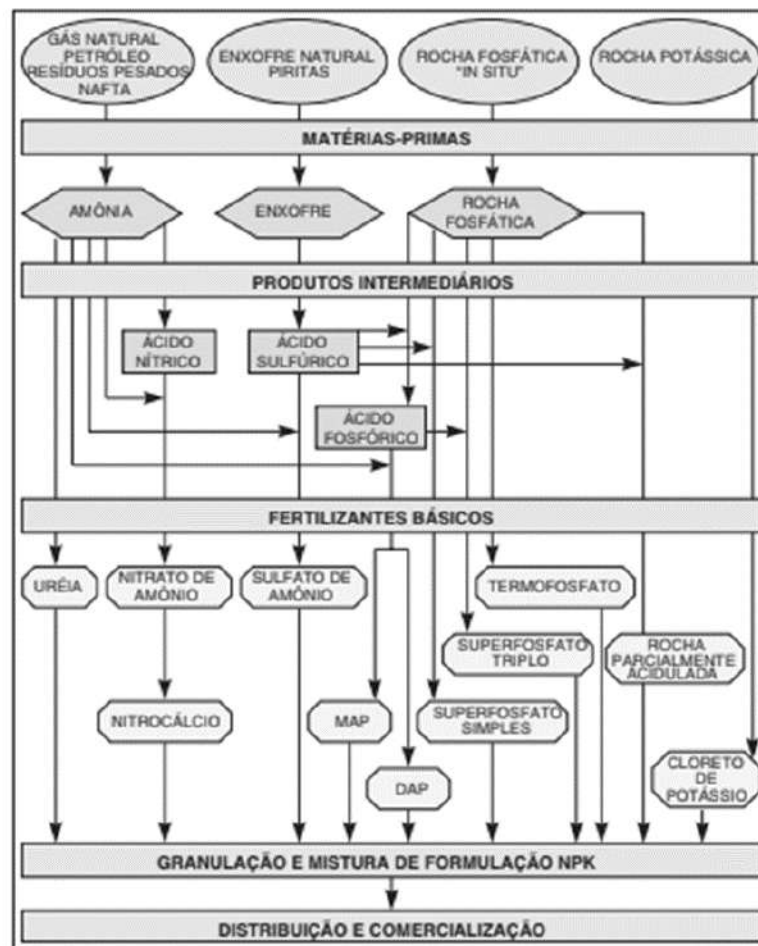
O processo de produção destes fertilizantes complexos pode ser realizado com pó, farelo ou grânulos, geralmente de forma rudimentar e sem grande conteúdo tecnológico. Alguns critérios permitem analisar a qualidade do fertilizante (DIAS E FERNANDES, 2006), são eles:

- **Granulometria:** refere-se à forma e tamanho das partículas. Grãos com uniformidade adequada permitem uma boa previsão de fatores como a velocidade de dissolução do fertilizante e regulação dos equipamentos de aplicação, proporcionando uma excelente distribuição do fertilizante na área de plantio.

- **Consistência:** a armazenagem e o transporte dos fertilizantes dependem da boa resistência física das partículas. Sem uma boa consistência dos grãos, é impossível manter uma granulometria constante.
- **Fluidez:** é a facilidade de livre escoamento do fertilizante, ou seja, sua capacidade de distribuição mecânica no local da aplicação. Indispensável para a caracterização de fertilizantes líquidos.
- **Densidade:** relação entre massa e volume do fertilizante. Assim como a fluidez, é um atributo importante, principalmente no caso de fertilizantes líquidos.

Abaixo, a Figura 2.2 exemplifica as principais rotas de produção dos principais fertilizantes minerais.

Figura 2.2 – Cadeia Produtiva dos Fertilizantes



Fonte: Dias e Fernandes (2006, p. 100)

### 2.1.2 FERTILIZANTES DE CADEIAS EMERGENTES

Trage (2019), realizando modelagem matemática dos dados de FAO, observou que no período entre 2006 e 2016, a produção de fertilizantes minerais NPK no Brasil teve uma queda de 14,52%. Em contrapartida, neste mesmo período de 10 anos, o consumo destes mesmos fertilizantes para uso agrícola cresceu a uma taxa de 7,47% ao ano, saindo de 8,6 milhões de toneladas para 15 milhões de toneladas. Ademais, no ano de 2016, o Brasil ficou em quarto lugar no ranking mundial de consumo de nutrientes minerais, totalizando 7,63%.

Como a demanda interna de fertilizantes do Brasil tem um crescimento muito superior ao da sua capacidade produtiva, naturalmente, ao longo dos anos acumulou-se um enorme déficit na balança comercial do setor no país. Neste contexto, algumas alternativas têm surgido com o intuito de diminuir a dependência externa destes insumos.

De acordo com a Guaraldo (2021), há cinco cadeias emergentes de fertilizantes que se deverão se fortalecer no país nos próximos anos, a fim de diminuir a dependência nacional por fertilizantes e tecnologias importadas.

- **Fertilizantes orgânicos e organominerais:** Segundo a Legislação Brasileira, os fertilizantes orgânicos são produtos de natureza fundamentalmente orgânica, obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido ou não de nutrientes minerais (BRASIL, 2004). Estes podem ser divididos em:

- **Fertilizantes orgânicos simples:** produto natural de origem vegetal ou animal, contendo um ou mais nutrientes de plantas.

- **Fertilizantes orgânicos mistos:** produto de natureza orgânica, resultante da mistura de dois ou mais fertilizantes orgânicos simples, contendo um ou mais nutrientes de plantas.

- **Fertilizantes orgânicos compostos:** produtos obtidos por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matéria-prima de origem industrial, urbana ou rural, animal ou vegetal, isoladas ou misturadas, podendo ser enriquecido de nutrientes minerais, princípio ativo ou agente capaz de melhorar suas características físicas, químicas ou biológicas.

Enquanto isso, os organominerais são resultantes da mistura física entre os fertilizantes orgânicos e minerais.

- **Subprodutos com potencial de uso agrícola:** são subprodutos de processos industriais, potenciais poluidores da natureza, que são direcionados para utilização como fontes de nutrientes. O uso dos resíduos desta classe é um pouco mais problemático em termos de

realização, devido ao uso frequente de substâncias potencialmente tóxicas em processos industriais cujo produto final não é um alimento. Um exemplo são os lodos resultantes de estações de tratamentos de água (ETA) e estações de tratamento de esgoto (ETE) que têm recebido especial atenção por parte da pesquisa, em função do grande problema ambiental que seu descarte inadequado apresenta (MATTIAZZO, E PIRES, 2008).

- **Bioinsumos:** Para o Programa Nacional de Bioinsumos, bioinsumo é todo produto, processo ou tecnologia de origem vegetal, animal ou microbiana, destinado ao uso na produção, no armazenamento e no beneficiamento de produtos agropecuários, nos sistemas de produção aquáticos ou de florestas plantadas, que interfiram positivamente no crescimento, no desenvolvimento e no mecanismo de resposta de animais, de plantas, de microrganismos e de substâncias derivadas e que interajam com os produtos e os processos físico-químicos e biológicos (BRASIL, 2020). Esta categoria engloba os biofertilizantes, biomoléculas e bioprocessos.

- **Nanotecnologia:** uso de materiais de atuação de escala nanométrica que podem ser utilizadas em técnicas de agricultura de precisão, dispositivos de controle de irrigação e de liberação de nutrientes (EMBRAPA, 2009).

- **Remineralizadores do solo:** são materiais de origem mineral que tenham sofrido apenas redução e classificação de tamanho de partícula por processos mecânicos e que, aplicado ao solo, altere os seus índices de fertilidade, por meio da adição de macronutrientes e micronutrientes para as plantas, e promova a melhoria de propriedades físicas, físico-químicas ou da atividade biológica do solo (BRASIL, 2014).

Vale ressaltar que os elementos desta cadeia nem sempre visam a completa substituição dos fertilizantes tradicionais, mas o aumento da eficiência no uso dos fertilizantes, ampliando a produção de alimentos e culturas.

Projetando para o ano de 2030, é esperado que estas cinco cadeias emergentes participem de pelo menos 20% da demanda nacional de nutrientes; reciclagem de resíduos e subprodutos orgânicos, além da ampliação do uso de bioinsumos. Isso pode gerar uma redução de 15% das emissões de gases de efeito estufa na agropecuária e aumento de 25% da contribuição da fixação biológica de nitrogênio em culturas, sobretudo de sistemas integrado, na participação de processos biológicos. Os remineralizadores tendem a fornecer uma parte importante dos nutrientes para a agricultura de certas regiões. Por fim, os insumos nano tecnológicos irão aumentar a eficiência produtiva de grandes culturas em até 20% (EMBRAPA, 2021).

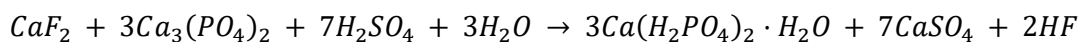
Entendo que os fertilizantes minerais são os mais amplamente utilizados no mundo atualmente, estes serão detalhados no próximo capítulo.

## 2.2 ROTAS TRADICIONAIS DE PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES

### 2.2.1 FERTILIZANTES FOSFATADOS

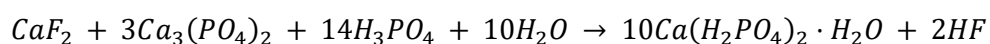
A única forma de se obter fósforo de forma economicamente viável é através de um beneficiamento mineral de uma rocha fosfática rica em  $P_2O_5$ . Por não possuir um grau de pureza ideal para comercialização, assim que o mineral é extraído, ele passa por uma série de processos físicos até a obtenção de um concentrado com 30% a 38% de  $P_2O_5$ . Há algumas opções para solubilização deste fósforo, sendo uma delas determinada pelo ataque de ácido sulfúrico ao concentrado fosfático que, dependendo das relações estequiométricas utilizadas, produz superfosfato simples (SSP) e fosfato parcialmente acidulado. Outra opção é atacar o concentrado fosfático com ácido fosfórico, resultando em superfosfato triplo (TSP). Outra forma de gerar fertilizantes fosfatados é através da reação entre ácido fosfórico e amônia, formando MAP ou DAP (KULAIF, 1999).

O superfosfato simples (SSP) é largamente utilizado, pois possui o fornecimento de enxofre associado (por volta de 12%) e sua produção requer baixo investimento e capacidade industrial, quando comparado a outros fertilizantes. Apesar destas vantagens, possui baixa concentração de fósforo, variando entre 16% e 22% de  $P_2O_5$  (KULAIF, 1999). A rocha fosfática moída e concentrada é submetida à ação do ácido sulfúrico de acordo com a seguinte reação:

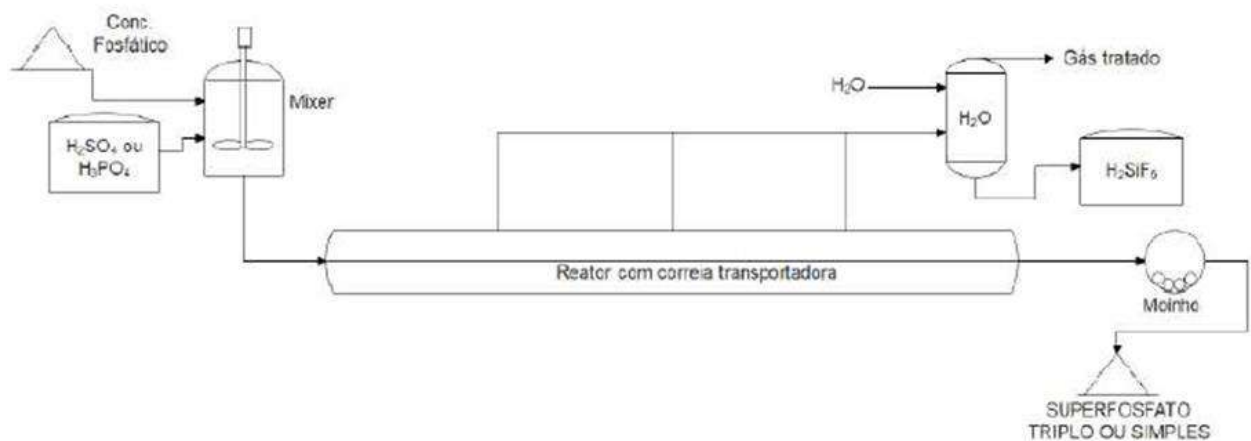


A reação ocorre em duas etapas: na primeira, o  $H_2SO_4$  reage com a rocha fosfática rapidamente, formando  $H_3PO_4$  e  $CaSO_4 \cdot nH_2O$ , ocorrendo solubilização de aproximadamente 70% da rocha fosfática. Na segunda etapa, o ácido fosfórico ataca a rocha não reagida, formando fosfato monocálcico.

O processo de produção do superfosfato triplo (TSP) também se origina do concentrado fosfático, porém o ácido fosfórico é utilizado para solubilizar o fósforo mineral. Em relação aos produtos SSP e TSP, algumas das diferenças mais relevantes são o teor de  $P_2O_5$  solúvel, já que o TSP contém entre 44% e 48% do composto de interesse; ademais eles também se diferem na velocidade de solidificação, sendo esta característica mais acentuada no TSP (KULAIF, 1999).



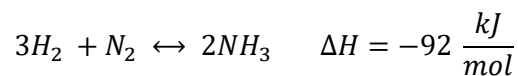
**Figura 2.3 - Fluxograma Simplificado da Produção de SSP e TSP**



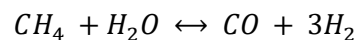
Fonte: Da Cunha (2020a)

## 2.2.2 FERTILIZANTES NITROGENADOS

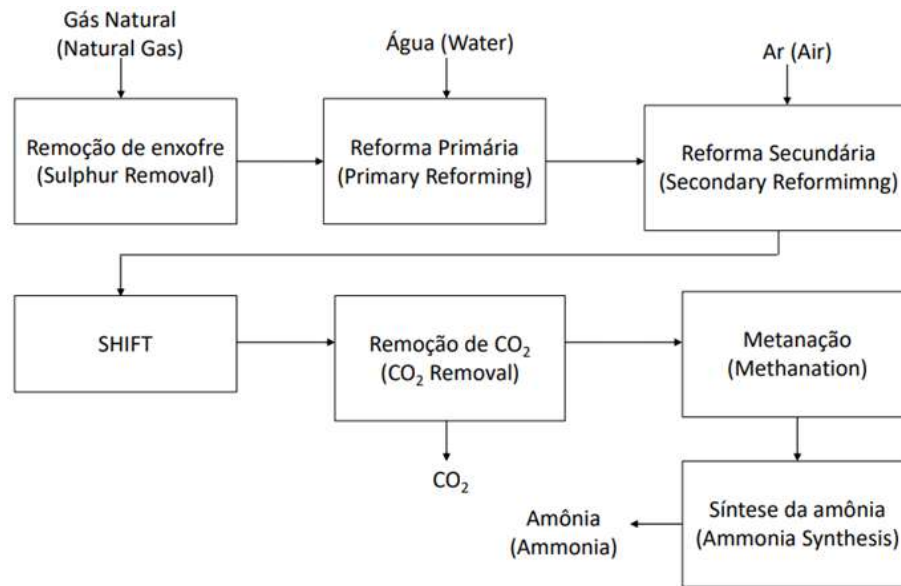
Na cadeia de fertilizantes nitrogenados, a produção de amônia é um processo chave, pois ela é a base para todos os nutrientes. O processo de produção de amônia consiste na reação entre nitrogênio e hidrogênio em elevada pressão (Processo Haber-Bosch). A reação é exotérmica, reversível e em fase gasosa (RIBEIRO, 2013).



Para realizar a produção de amônia, se faz necessário obter  $H_2$ , para posteriormente combiná-lo com o  $N_2$  presente no ar. Tradicionalmente, a fonte do hidrogênio utilizado na produção de amônia é o gás de síntese que, por sua vez, é obtido a partir de fontes fósseis, gerando  $CO_2$  em sua produção pela reforma com vapor d'água. Atualmente, a matéria-prima mais utilizada neste processo é o gás natural, haja vista sua disponibilidade pelas reservas mundiais (FREITAS et al., 2011).



**Figura 2.4 - Fluxograma do Processo de Produção da Amônia a partir do Gás Natural**

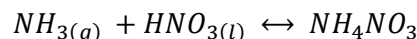


Fonte: Da Cunha (2020b)

A partir da amônia, podem ser realizadas reações que vão gerar diferentes compostos com propriedades fertilizantes. Dentre os fertilizantes nitrogenados, os que mais se destacam são: nitrato de amônio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), ureia ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ), sulfato de amônio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), além dos fosfatos de monoamônio (MAP) e diamônio (DAP), que têm intersecção da com cadeia de fertilizantes fosfatados.

- **Nitrato de Amônio -  $\text{NH}_4\text{NO}_3$**

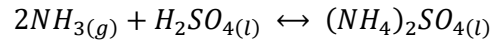
É um fertilizante com alto percentual de nitrogênio (entre 33% e 34%) - apresentando as formas amoniacal e de nitrato - as únicas que a planta consegue absorver. A produção se dá pelo processo de Stengel que consiste na neutralização do ácido nítrico pelo amoníaco, em uma reação exotérmica (REETZ, 2017):



O nitrato de amônio apresenta riscos na produção e estocagem por gerar materiais voláteis altamente suscetíveis a explosão. Muitas vezes o nitrato de amônio é neutralizado com cálcio para diminuir sua volatilidade.

- **Sulfato de Amônio -  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$**

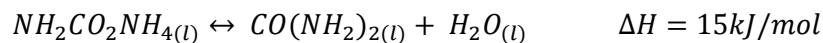
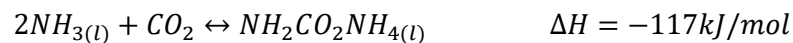
O sulfato de amônio, por sua vez, apresenta um teor de nitrogênio de 21% e é também uma fonte de enxofre, contendo cerca de 24% deste, sendo altamente indicado para solos com baixo teor de enxofre. Em contrapartida, por causa de suas características, ele apresenta uma capacidade de acidificar o solo. Sua produção ocorre pela neutralização da amônia com ácido sulfúrico (REETZ, 2017).



A grande diferença desse processo para o anterior é justamente o ácido utilizado. A principal vantagem do sulfato de amônio em relação ao nitrato de amônio é a diminuição do risco de explosões e incêndios. Sua principal desvantagem é a presença do enxofre no lugar do nitrogênio, diminuindo o teor de um macronutriente primário em detrimento de um secundário.

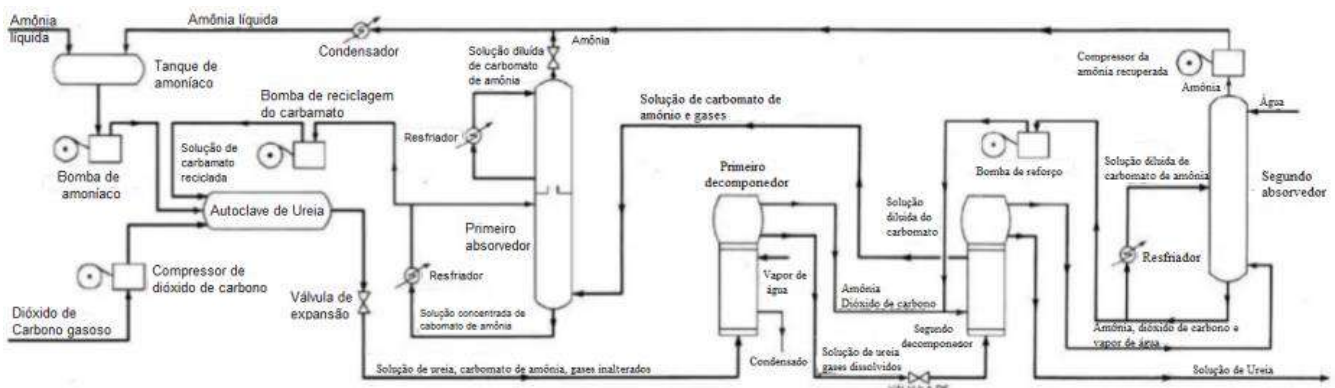
- **Ureia -  $CO(NH_2)_2$**

A ureia é o fertilizante nitrogenado mais difundido no mundo devido ao seu alto teor de nitrogênio (46%), tecnologia eficiente de produção e facilidade de aplicação (REETZ, 2017). A reação entre amônia ( $NH_3$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) se dá em duas reações reversíveis: na primeira, amônia e dióxido de carbono reagem exotermicamente, gerando como intermediário um carbamato instável; na segunda, a desidratação endotérmica do carbamato gera a ureia em solução aquosa (CHINDA, 2015).



O processo de fabricação da ureia tem quatro etapas: a primeira é a reação entre amônia líquida e dióxido de carbono gasoso, num reator autoclave e sob alta pressão, gerando o carbamato; a segunda é a desidratação do carbamato de amônia, num equipamento chamado decomponedor, formando ureia; na terceira, o carbamato que não foi desidratado é enviado para ser concentrado num absorvedor e, em seguida, o reenvio para reciclo no autoclave; a última etapa é o acabamento da ureia que, ao sair do primeiro decomponedor, sofre um processo de perolação, para melhor manuseio (FILHO, 2011).

**Figura 2.5: Fluxograma do Processo de produção da Ureia**

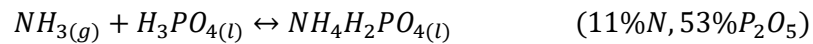


Fonte: Filho (2011, p.24)

- **Fosfato de Monoamônio e Fosfato de Diamônio – MAP e DAP**

MAP e DAP são fertilizantes que apresentam nitrogênio amoniacal e  $P_2O_5$  com boas propriedades físicas. No seu processo de produção são realizadas neutralizações do  $H_3PO_4$  com uma base, no caso  $NH_3$  gasosa.

Fosfato de Monoamônio (MAP):



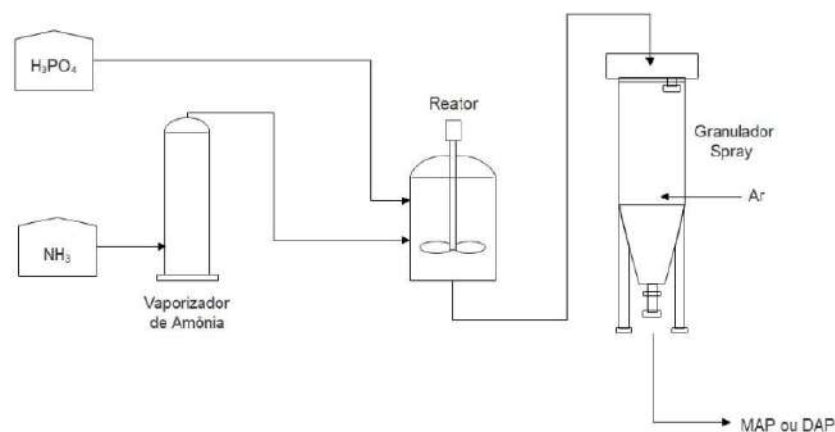
Fosfato de Diamônio (DAP):



A primeira etapa é a entrada de  $H_3PO_4$  e amônia gasosa no reator. A amônia é utilizada na forma gasosa, pois há uma melhor transferência de massa numa interação gás-líquido, em relação à uma interação líquido-líquido. No reator são utilizadas altas temperaturas e pressões, pois se não fosse assim, o produto ficaria sólido.

A etapa seguinte é um granulador spray dry, onde há um bico aspersor no topo que forma gotas do fertilizante e, à medida que as gotas passam pelo equipamento, elas entram em contato com o ar que entra no sistema esfriando e despressurizando. A gota então se torna um grão sólido de MAP ou DAP. A temperatura e a vazão de ar são importantes para que não se forme pó ao invés de grãos.

**Figura 2.6: Fluxograma Simplificado da Produção de MAP e DAP**



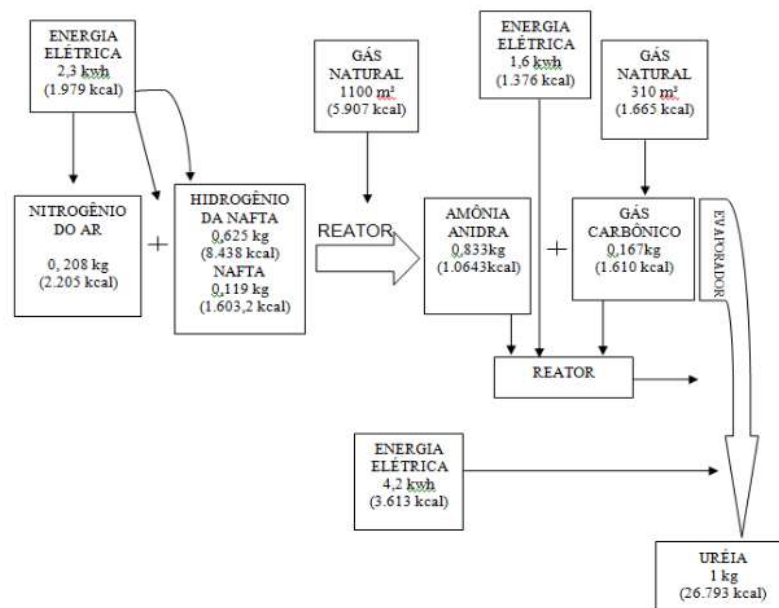
Fonte: Da Cunha (2020a)

Sobre a produção de fertilizantes nitrogenados a partir da amônia, vale enfatizar o quanto grande é o consumo de energia neste processo, graças ao consumo de matéria-prima e combustíveis fósseis. Ao levar em conta todas as diversas formas de matéria-prima de hidrogênio para produção de amônia, além da disponibilidade e a localização das plantas,

chega-se à incrível conclusão de que a produção de fertilizantes se utiliza de 1,2% de todo o consumo mundial de energia, sendo que 92,5% são utilizados na produção de fertilizantes nitrogenados (BUENO E JUNIOR, 2015).

A participação da energia fóssil na produção dos fertilizantes industriais nitrogenados com ênfase na ureia, fertilizante nitrogenado mais consumido mundialmente, possui números impressionantes: para cada quilo de ureia produzido, é necessário o consumo de 26.793 kcal e 1.410 m<sup>3</sup> de gás natural (BUENO E JUNIOR, 2015).

**Figura 2.7: Processo Produtivo da Ureia com Adição dos Insumos Não Produtivos**



Fonte: Bueno e Junior (2015, p.445)

### 2.2.3 FERTILIZANTES POTÁSSICOS

O fertilizante potássico mais difundido é o cloreto de potássio (KCl), uma vez que ele apresenta o maior teor de K<sub>2</sub>O (entre 58% e 62%) e menor custo de produção. Em sua cadeia produtiva, parte-se da rocha potássica direto para o produto final, pois o potássio na rocha já está forma de cloreto. O KCl deve ser aplicado de forma cuidadosa, pois dentre todos os fertilizantes minerais, ele é o que possui o maior índice salino, podendo provocar salinidade temporária no solo (PEREIRA, STAFANATO E ZONTA, 2021).

A obtenção de fertilizantes potássicos se inicia com a mineração subterrânea em depósitos de silvinita, que é uma combinação de cloreto de sódio (NaCl) e cloreto de potássio (KCl). Em sequência, é realizado o beneficiamento do minério de potássio, onde as etapas de maior importância são as de deslamagem, flotação e centrifugação, onde o minério é concentrado.

O material moído apresenta alto percentual de argilas que dificultam o processo de flotação. Deste modo, é feita a deslamagem que ocorre através de sistemas classificadores com entrada de água saturada em saís em fluxo do sentido oposto das partículas sedimentadas.

A flotação é a principal etapa de concentração. Ela separa elementos através da diferenciação de características de tensão superficial. Se há duas partículas de minério próximas, uma enriquecida com KCl e outra com NaCl, a elas é adicionado um agente condicionante, que tem a característica de interagir apenas com o produto de interesse, favorecendo a separação pela injeção de ar comprimido.

Além do agente condicionante, são necessários outros dois aditivos nessa etapa. Um deles é o espumante, que garante uma maior homogeneização, ou seja, uma melhor distribuição das partículas de KCl na superfície. O terceiro aditivo é o agente depressor, que tem a função de fazer com que a argila que não foi retirada na deslamagem saia da superfície do minério. O produto que sai dessa etapa já é o fertilizante, apenas passando por algumas poucas etapas de acabamento.

#### **2.2.4 FERTILIZANTES NPK**

Como existem diferentes tipos de solos, os quais possuem diferentes demandas nutricionais, foram desenvolvidos os fertilizantes NPK, que são formados a partir de misturas de grânulos dos três macronutrientes essenciais: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Este tipo de fertilizante pode ter três formas: mistura de grânulos; mistura granulada ou complexo granulada. A mistura de grânulos consiste simplesmente na mistura física das matérias-primas; a mistura granulada passa pelo processo de granulação, onde o objetivo é uniformizar a faixa granulométrica dos compostos; por fim, o complexo granulada é resultado da reação química entre as matérias-primas, resultando em novos compostos (LOPES E SILVA, 2012).

O percentual de determinado nutriente no fertilizante expressa a concentração dele mesmo no produto. Desta maneira, um fertilizante NPK de fórmula 12-6-22 indica concentrações de 12% de nitrogênio (N), 6% de fósforo ( $P_2O_5$ ) e 22% de potássio ( $K_2O$ ) (LOPES E SILVA, 2012)

### **2.3 - MERCADO DE FERTILIZANTES**

#### **2.3.1 CENÁRIO MUNDIAL**

O produto da agricultura é a fonte primária de energia de qualquer ser humano e, conseqüentemente, um dos itens básicos da economia mundial. A ONU (2019) projeta que, em

2050, a população mundial atingirá o número de 9,7 bilhões de habitantes, ou seja, um aumento de mais de 20% nas próximas décadas.

Com uma maior população global, espera-se naturalmente um crescimento na demanda por alimentos que, por sua vez, aponta a necessidade de não só expandir terrenos para plantio, como também aumentar a produtividade das terras já destinadas à agricultura. Nesse sentido, o mercado de fertilizantes, principal insumo destinado ao aumento de produtividade agrícola, tem registrado crescimentos elevados com expectativa de manter essa alta tendência.

Segundo a Statista (2023), considerando o intervalo de 15 anos entre 2005 e 2020, houve um aumento de quase 30% na produção de fertilizantes no mundo. E, de acordo com estudo feito pela PRECEDENCE RESEARCH (2023), o mercado de fertilizantes crescerá em torno de 38% em 9 anos, saindo do patamar de US\$ 214,66 bilhões em 2023 para US\$ 297,67 bilhões em 2032, considerando uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 3,7%.

Esse setor, por sua vez, é altamente monopolizado e, dessa forma, seu rápido e potente crescimento geram reflexos significativos na economia de um grupo seletivo de países que dominam a oferta mundial.

No período de 2019 a 2020, de acordo com análise própria feita com dados disponibilizados pela FAO (2019-2020), mais de 53% da produção mundial de fertilizantes estava concentrada em apenas 4 países: China (24,4%), Rússia (11,5%), Índia (8,7%) e EUA (8,6%).

A Tabela 2.1 apresenta um ranking dos 5 maiores produtores mundiais por tipo de fertilizante no período de 2019 a 2020.

**Tabela 2.1: Ranking geral de produção de fertilizantes NPK entre 2019 e 2020.**

Ranking	N (Nitrogenados)	P (Fosfatados)	K (Potássicos)
1º	China (26,1%)	China (30,2%)	Canadá (27,5%)
2º	Índia (11,1%)	Índia (10,9%)	Rússia (20,5%)
3º	EUA (10,7%)	EUA (10,5%)	Bielorrússia (16,8%)
4º	Rússia (8,9%)	Rússia (9,5%)	China (13,9%)

Fonte: Elaboração própria com dados da FAO (2019-2020)

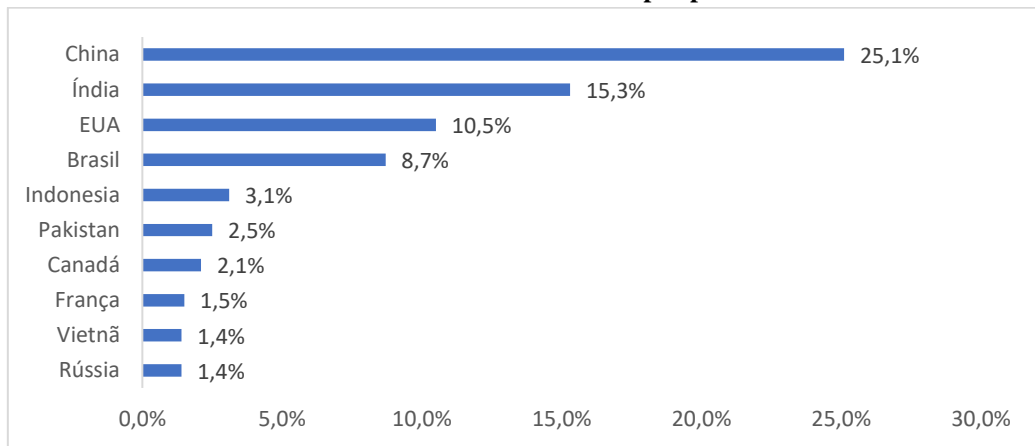
A demanda de fertilizantes está diretamente ligada ao perfil de cultura. Os nitrogenados são os fertilizantes mais consumidos no mundo, liderando com folga o ranking de demanda mundial com 58,4% do total (FAO, 2019); (FAO, 2020). Isso pode ser explicado pelo fato de que as principais plantações mundiais são de milho, trigo e arroz e esses cultivos necessitam de grande quantidade de nitrogênio.

Os fosfatados e potássicos, por sua vez, apresentam uma relevância similar em termos de produção mundial, sendo 20,7% e 20,9%, respectivamente. Com relação aos potássicos, a soja é o quarto maior cultivo mundial e não precisa de nitrogênio, mas necessita de elevada

quantidade de potássio. Já a relevância dos fosfatados se dá pois o fósforo é um macronutriente necessário, mesmo que em menor quantidade, em quase todos os cultivos (NOVAES, 2021).

Os maiores consumidores de fertilizantes no ano de 2019 foram: China (25,1%), Índia (15,3%) e Estados Unidos (10,5%), conforme mostra o Gráfico 2.1. Em contrapartida, segundo Cella e Rossi (2010), o consumo de nutrientes nesses países tende a estagnar, devido aos mesmos não possuírem áreas para a expansão da agricultura, o que difere de países Africanos e Sul-americanos que vêm ampliando suas áreas agricultáveis.

**Gráfico 2.1: Consumo de fertilizantes por país em 2019**



Fonte: Elaboração própria com dados da FAO (2019)

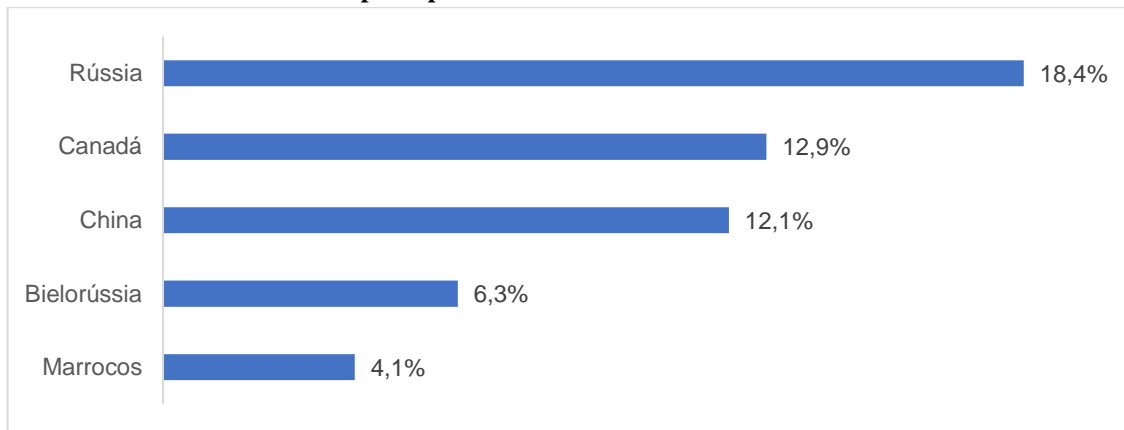
A Tabela 2.2 apresenta os maiores consumidores mundiais de fertilizantes por tipo de fertilizante no ano de 2019. Observa-se que há também uma forte concentração do consumo em poucos países - China, Índia, EUA e Brasil representam de 50 a 60% do consumo mundial de fertilizantes.

**Tabela 2.2: Ranking geral de consumo de fertilizantes NPK em 2019.**

Ranking	N (Nitrogenados)	P (Fosfatados)	K (Potássicos)
1º	China (24,8%)	China (23,6%)	China (27,7%)
2º	Índia (17,4%)	Índia (17,0%)	Brasil (18,1%)
3º	EUA (10,8%)	Brasil (11,1%)	EUA (11,5%)
4º	Brasil (4,5%)	EUA (9,1%)	Índia (7,1%)

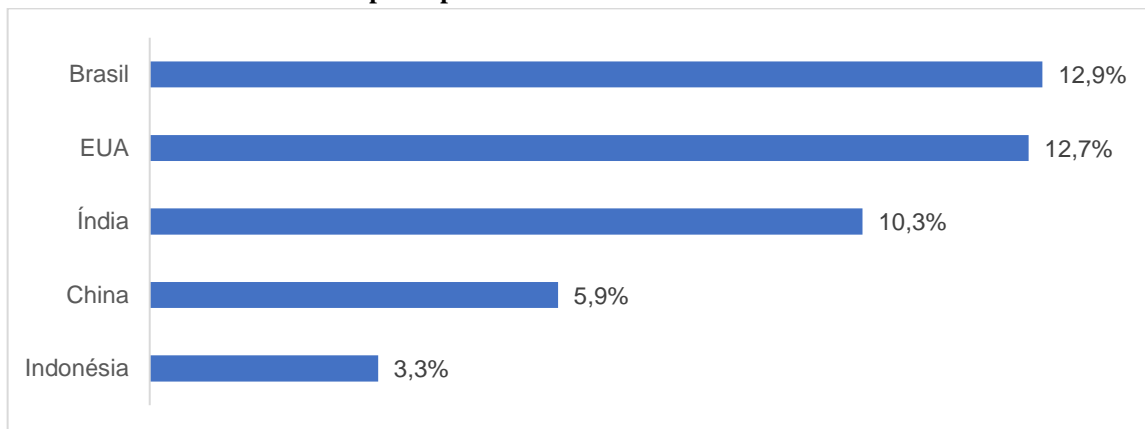
Fonte: Elaboração própria com dados da FAO (2019)

Com relação as exportações mundiais, Rússia, Canadá, China, Bielorrússia e Marrocos concentravam mais de 50% das exportações mundiais de fertilizantes, de acordo com os dados da FAO no período de 2015 a 2019, conforme mostra o Gráfico 2.2.

**Gráfico 2.2 - Top 5 exportadores mundiais de fertilizantes entre 2015 e 2019.**

Fonte: Elaboração própria com dados da FAO (2015-2019)

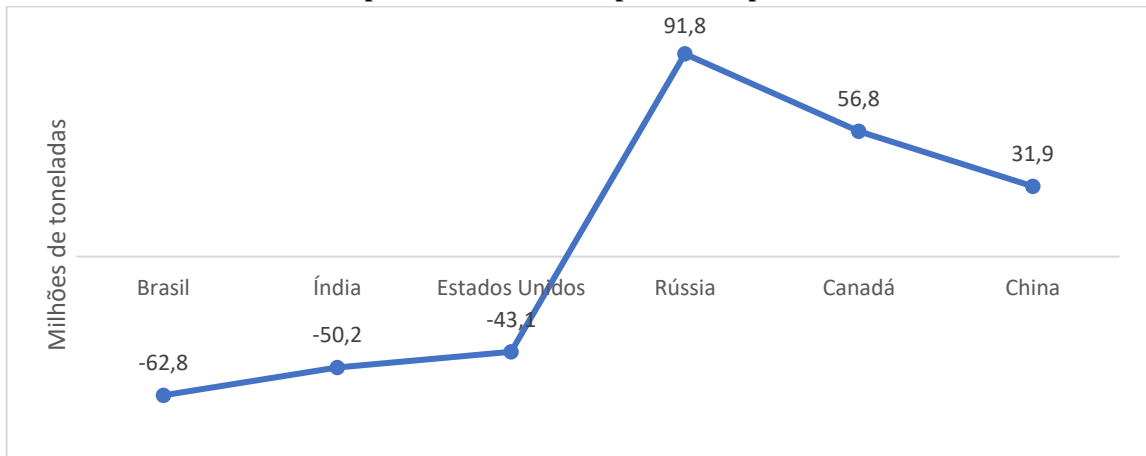
Já com relação a importação, Brasil, Estados Unidos e Índia importam mais de 35% do mercado mundial de fertilizantes, conforme mostra o Gráfico 2.3.

**Gráfico 2.3 - Top 5 importadores mundiais de fertilizantes entre 2015 e 2019.**

Fonte: Elaboração própria com dados da FAO (2015-2019)

Ao contrastar os dados de exportação e importação no período de 2015 a 2019, evidencia-se que o Brasil, Índia e Estados Unidos possuem os maiores déficits na balança comercial, como mostra o Gráfico 2.4. Por outro lado, Rússia, Canadá e China apresentam significativos superávits.

**Gráfico 2.4: Representação da balança comercial (em milhões de toneladas) referente aos 3 países com maiores déficits e 3 países com maiores superávits no período de 2015 a 2019.**



Fonte: Elaboração própria com dados da FAO (2015-2019)

Na Tabela 2.3 apresenta-se o ranking dos principais consumidores, produtores, exportadores e importadores em 2019.

**Tabela 2.3: Top 5 de consumo, produção, exportação e importação de fertilizantes NPK em 2019.**

Ranking	Consumidores	Produtores	Exportadores	Importadores
1º	China (25,1%)	China (24,7%)	Rússia (16,2%)	Brasil (14,2%)
2º	Índia (15,3%)	Rússia (11,3%)	Canadá (12,9%)	EUA (12,2%)
3º	EUA (10,5%)	Índia (8,8%)	China (11,7%)	Índia (11,6%)
4º	Brasil (8,7%)	EUA (8,7%)	Bielorrússia (6,8%)	China (6,4%)
5º	Indonésia (3,1%)	Canadá (7,8%)	Marrocos (5,0%)	França (2,9%)

Fonte: Elaboração própria com dados da FAO (2019)

Dado o panorama geral dos principais players e a dinâmica do mercado mundial, é válido citar a recente crise de fertilizantes e os respectivos reflexos no cenário mundial, podendo levar até mesmo a uma crise alimentar global sem precedentes.

Uma das principais evidências da crise foi o atingimento de patamares recordes dos preços dos fertilizantes. Segundo ONU (2022), os preços dos insumos aumentaram 199% desde maio de 2020. Em seminário ministrado em 2022, a consultoria líder em agronegócio brasileiro, Safras & Mercado, avalia que houve uma “tempestade perfeita”, isto é, o setor apresentou baixas taxas de operação em um cenário de boa relação de troca de commodities e fertilizantes, levando ao aumento significativo dos preços.

Entre os elementos que contribuíram para a formação da “tempestade”, a consultoria Safras & Mercado menciona a pandemia em 2020. Naquele contexto, a indústria começou a sentir a diminuição significativa da oferta, dado as incertezas no mercado e os atrasos logísticos devido ao lockdown. No entanto, após a recuperação econômica em 2021, o aumento expressivo nos custos de produção persistiu. Um dos fatores para isso, por exemplo, foi a suspensão do fornecimento do gás russo devido as sanções ocidentais diante da guerra com a Ucrânia que, por sua vez, contribuíram significativamente para a diminuição das taxas de operação da indústria.

Em meio a esse contexto de baixa oferta, as commodities agrícolas, principalmente os grãos, estavam em bons patamares de preços, o que incentivou o investimento nas lavouras e, conseqüentemente, a demanda por fertilizantes. O Brasil, por exemplo, importava patamares recordes em 2021. Essa “tempestade perfeita”, portanto, ocasionou um aumento recorde do preço de fertilizantes. (ROMANELLO, 2022)

Além das questões mencionadas, políticas protecionistas adotadas em alguns países impuseram novas taxações e cotas sobre a importação de fertilizantes, contribuindo para o efeito de alta de preços. Os Estados Unidos, por exemplo, desde 2010, tem aplicado taxas sobre a importação a fertilizantes vindos da China através de uma série de impostos antidumping e compensatórios (AD-CVDs) e, mais recentemente, em 2020-21, ampliou a taxação para importação de fosfatos vindo da Rússia (TRADE, 2021). Além disso, sanções impostas pela União Europeia às exportações da Bielorrússia cortaram cerca de 20% do potássio comercializado em 2021(MARIANI, 2023) .

O aumento significativo dos preços de fertilizantes, por sua vez, potencializa a insegurança alimentar global. O encarecimento dos fertilizantes impacta diretamente a oferta de alimentos, pois os agricultores acabam tendo que reduzir o uso de fertilizantes, o que por consequência diminui a produtividade das lavouras.

Essa situação é ainda mais alarmante nas potências agrícolas da América Latina, pois devido ao elevado índice de importação, conforme visto anteriormente, estão mais vulneráveis às interrupções e aos aumentos do preço de fertilizantes.

### **2.3.2 CENÁRIO NACIONAL**

O agronegócio é extremamente relevante para a economia brasileira. Segundo dados do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA, 2022), a participação do setor no Produto Interno Bruto (PIB) do país foi de aproximadamente 27% em 2021.

Na Figura 2.8 mostra-se os principais produtos do ramo agrícola brasileiro, a posição do país na produção e na exportação, bem como sua respectiva participação no comércio internacional.

**Figura 2.8: Importância da agricultura brasileira em nível mundial**

<b>Principais Produtos</b>	<b>Produção</b>	<b>Exportação</b>	<b>Representação mundial nas exportações (2020)</b>
<b>Soja</b>	1º	1º	49,9%
<b>Açúcar</b>	1º	1º	30,3%
<b>Café</b>	1º	1º	25,5%
<b>Carne de aves</b>	2º	1º	20,9%
<b>Carne bovina</b>	2º	1º	14,4%
<b>Milho</b>	3º	2º	19,8%
<b>Algodão</b>	4º	2º	12,4%
<b>Silvicultura</b>	4º	2º	8,9%
<b>Carne suína</b>	5º	7º	4,8%
<b>Arroz</b>	9º	8º	2%

Fonte: BRASIL (2022, p. 12)

Na produção agrícola, o Brasil tem desempenhado um papel cada vez maior de protagonismo, sendo o quarto maior produtor de grãos do mundo, atrás apenas da China, dos Estados Unidos e da Índia. É responsável por 7,8% da produção mundial (EMBRAPA, 2020).

No entanto, embora seja um dos maiores produtores na agricultura mundial, existe um paradoxo no cenário brasileiro que vem sendo pauta entre especialistas do assunto - o Brasil tem atingido recordes cada vez mais altos no agronegócio enquanto o cenário da fome no país fica está cada vez mais alarmante.

Em relação as culturas que o Brasil cultiva, há uma produção bem acima do consumo nacional. No entanto, dado a desvalorização do real frente ao dólar, não existe um incentivo para utilização dessa produção para abastecimento do mercado interno, e sim para exportação da grande maioria do que foi produzido. O que fica no mercado interno, por sua vez, sofre com a vinculação aos preços internacionais.

Um outro fator relevante que endossa o paradoxo apresentado é o fato da produção brasileira ser focada em algumas culturas específicas voltadas para a exportação, principalmente soja e milho, que não estão ligadas diretamente a alimentação humana,

conforme mostrado na Figura 2.8. A soja, por sua vez, representa mais da metade da produção de grãos do país e tem como principal utilização a produção de biodiesel e ração animal (SOUZA, 2021).

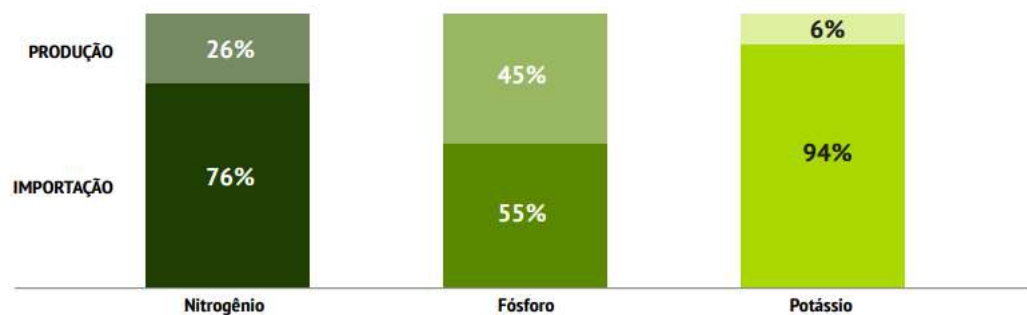
Nesse contexto apresentado, entende-se que além do incentivo para a manutenção do protagonismo brasileiro na exportação de grãos, relevante para a economia brasileira, existe uma grande oportunidade de desenvolvimento do Brasil enquanto produtor ou incentivador de produção de alimentos pois são extremamente relevantes para o abastecimento e garantia da segurança alimentar do mercado interno.

No entanto, para suprir o objetivo esperado, existe uma limitação estrutural que é a severa dependência brasileira em relação ao mercado externo de fertilizantes, o que torna a estratégia de incentivo à produção de alimentos para o mercado interno extremamente vulnerável à escalada dos preços internacionais e à incerteza do fornecimento no futuro de fertilizantes.

Atualmente, o Brasil é responsável por cerca de 8% do consumo global de fertilizantes, sendo o quarto país que mais consome do mundo (MAPA, 2022b). A velocidade de crescimento da demanda brasileira tem superado o crescimento da oferta nacional, o que tem refletido no crescimento significativo das importações. Estudo feito pela Freua e Ghiraldelli (2022) utilizando os dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos mostrou que de 1998 até 2021 houve um aumento de 440% na importação de fertilizantes. Em 2021, o Brasil atingiu um patamar histórico de 85% de importação de fertilizantes (CANÁRIO, 2022)

Na Figura 2.9, são apresentadas as porcentagens de dependência externa dos principais tipos de fertilizante (N, P e K) no Brasil.

**Figura 2.9: Dependência externa de Fertilizantes no Brasil**

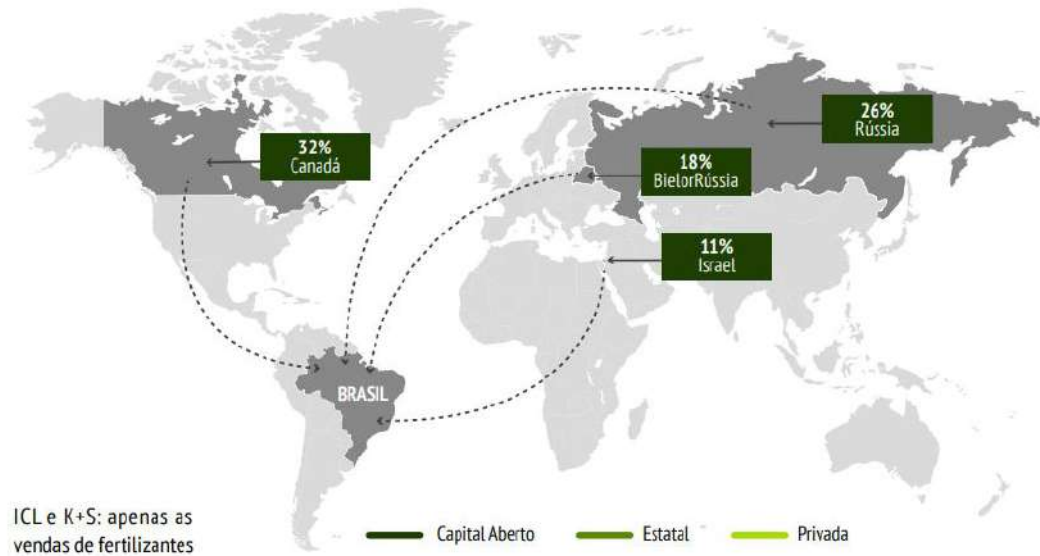


Fonte: BRASIL (2020b, p.11)

Nota-se que a situação é seguramente mais crítica com relação aos fertilizantes potássicos e nitrogenados que apresentam patamares de importação superior a 75%. Além disso,

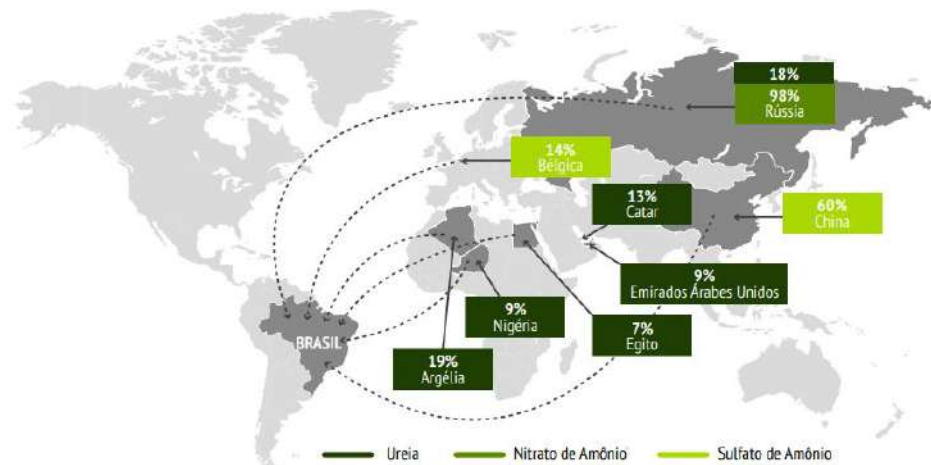
um outro agravante é que há uma concentração de fornecimento desses fertilizantes em certos países, como a Rússia, tal como é evidenciado na Figura 2.10 e Figura 2.11.

**Figura 2.10: Principais origens da importação de cloreto de potássio (2018)**



Fonte: BRASIL (2020b, p.11)

**Figura 2.11: Principais origens da importação de fertilizantes nitrogenados (2018)**



Fonte: BRASIL (2020b, p.13)

No caso específico do nitrato de amônio, a Rússia é praticamente o único fornecedor para o Brasil (MAPA, 2022). Essa dependência faz com que qualquer abalo pese na economia brasileira, que é fortemente dependente do agronegócio.

Nesse sentido, a dependência das importações de fertilizantes pelo Brasil tem provocado ao longo do tempo debates sobre novas políticas públicas e privadas de incentivo à

indústria nacional. No entanto, o Brasil não possuía, até 2020, um plano estratégica de longo prazo para a indústria nacional de fertilizantes.

Nesse panorama, foi lançado em 2022 pelo governo federal o Plano Nacional de Fertilizantes. Uma das premissas estabelecidas foi que o novo plano teria o objetivo de coordenar ações públicas e incentivar ações privadas, a fim de melhorar a eficiência da produção e da comercialização de fertilizantes no Brasil, diminuindo a dependência externa de tecnologia e de fornecimento, evitando possíveis crises e ampliando a competitividade do agronegócio brasileiro no mercado internacional.

No novo Plano Nacional de Fertilizantes, a meta principal é reduzir a necessidade de importação para cerca de 60% do consumo em 30 anos.

### **2.3.2.1 PLANO NACIONAL DE FERTILIZANTES**

Em janeiro de 2021 o Brasil lançou o decreto nº 10.605 que instituiu o Grupo de Trabalho Interministerial com a finalidade de desenvolver o Plano Nacional de Fertilizantes, visando o fortalecimento de políticas de incremento da competitividade da produção e da distribuição de fertilizantes no Brasil de forma sustentável. Os principais objetivos eram:

1. Expandir a fabricação de fertilizantes de forma competitiva no Brasil, abrangendo produtos como adubos, corretivos e condicionadores de solo.
2. Reduzir a dependência tecnológica e de suprimentos do exterior, com o propósito de mitigar os possíveis efeitos negativos de crises futuras.
3. Aumentar a competitividade do setor agropecuário brasileiro no mercado internacional, cumprindo todas as normas e regulamentações ambientais vigentes.

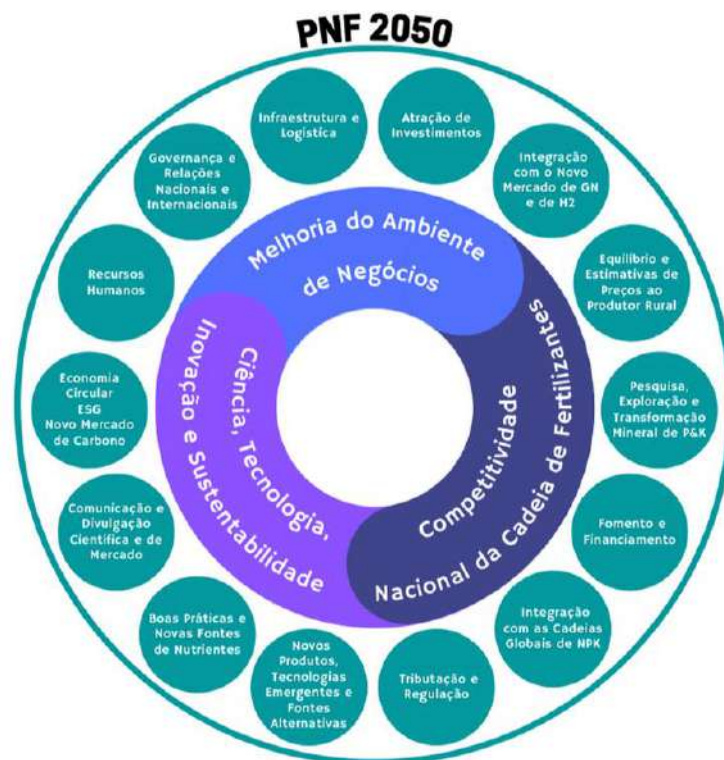
Nesse contexto, para incentivar a produção de fertilizantes interna e ainda assim atender às demandas globais e nacionais de produção de alimentos de maneira sustentável, o plano nacional prevê que o Brasil precisa melhorar o ambiente de negócios, investir em pesquisa científica e tecnológica e atrair investimentos na produção local. Isso evitaria situações de vulnerabilidade diante de crises globais de oferta e aumento dos preços dos fertilizantes. (MAPA, 2022b)

Além disso, avanços tecnológicos na área de fertilizantes podem melhorar a sustentabilidade ambiental, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e minimizando outros impactos negativos associados ao uso de fertilizantes. Esses avanços podem ajudar o Brasil a se posicionar como líder global em agronegócio de baixa emissão de carbono, alinhado aos princípios ESG (ambiental, social e governança) e contribuindo para as metas globais de

redução de gases de efeito estufa e melhorando a reputação da agricultura brasileira no Brasil e no exterior. (MAPA, 2022b)

Após um benchmarking internacional, um diagnóstico nacional e o estabelecimento da visão de futuro para a cadeia de fertilizantes, foram definidas diretrizes norteadoras do Plano nacional de Fertilizantes, tal como mostra a Figura 2.12.

**Figura 2.12: Diretrizes norteadoras do Plano Nacional de Fertilizantes (2022)**



Fonte: (MAPA, 2022b)

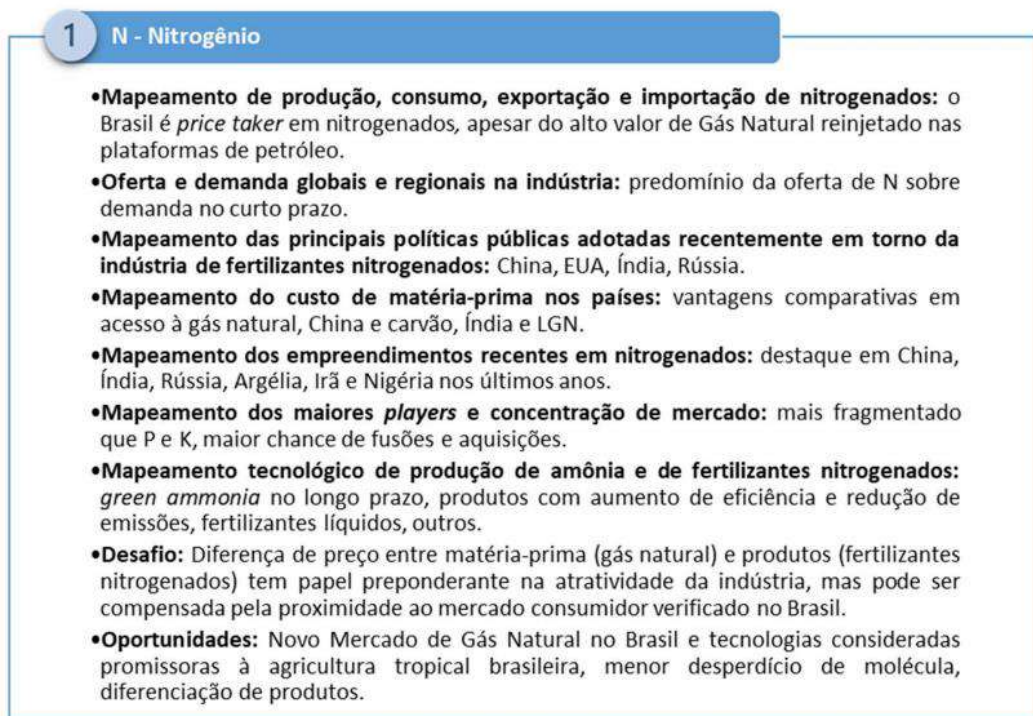
- Estimular e ampliar a pesquisa, exploração e transformação mineral no Brasil oferecendo fontes competitivas de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  para a agricultura nacional, visando reduzir a dependência de importação de fertilizantes.
- Possibilitar a competição de diferentes fontes e origens de matérias-primas, fertilizantes e nutrientes a serem ofertados à agropecuária nacional, visando à ampla concorrência e à possibilidade de desenvolvimento de instrumentos de estimativas de preços.
- Contribuir com a construção de ambiente de negócios estável e longo no País visando à atração de investimentos nacionais ou estrangeiros na exploração, transformação, desenvolvimento ou distribuição de fertilizantes no Brasil.

- Contribuir na planificação para investimento público ou privado e otimização de infraestrutura e logística, além da atração de investimentos para a distribuição de fertilizantes no Brasil, de maneira convergente com o Plano Nacional de Logística.
- Monitorar e avaliar o cenário tributário dos fertilizantes e promover ações que assegurem tratamento equilibrado na aplicação de alíquotas, estimulando assim a competitividade da produção brasileira e a oferta de produtos com custos adequados à agropecuária.
- Desenvolver modelo eficiente de governança para o Plano Nacional de Fertilizantes para o atingimento dos objetivos estratégicos e suas metas, além de manter um ambiente constante de negociação institucional entre os estados da Federação e entre os países com os quais o Brasil tem relações comerciais envolvendo fertilizantes.
- Monitorar, avaliar, promover e/ou sugerir, quando necessário, ajustes regulatórios visando o alinhamento internacional, estabilidade do ambiente de negócios no Brasil e a atração de investimentos.
- Monitorar, avaliar, promover ou ajustar, quando necessário, linhas de crédito e financiamento bem como recursos de investimento público, ou atração de investimento privado, para o desenvolvimento da indústria nacional de fertilizantes, com inovação em nutrição de plantas ou outras estratégias que promovam a competitividade do setor no País.
- Estimular e promover a capacitação de recursos humanos para atuar nas áreas de pesquisa, desenvolvimento, mineração, produção, transformação e outras relacionadas à nutrição de plantas contribuindo com a competitividade do Brasil no setor.
- Difundir e estimular a adoção de boas práticas de produção de fertilizantes e boas práticas agropecuárias na exploração sustentável do ecossistema e menor impacto ambiental, diversificando e promovendo o desenvolvimento de novas fontes de nutrientes para a agropecuária.
- Estimular a ampla divulgação dos conceitos científicos do Plano Nacional de Fertilizantes para a oferta sustentável e competitiva de nutrientes para as plantas, de maneira contínua e sistemática, visando à transparência com os setores da indústria, agricultura e consumidores brasileiros e internacionais.
- Desenvolver modelos de adesão integral da indústria de nutrição de plantas do Brasil nos parâmetros ESG e assim estimular grande amplitude na aderência da agricultura em práticas de sustentabilidade, com adoção de conceitos de Economia circular e acesso ao mercado de carbono.

- Estimular o ambiente de inovação para novos produtos e tecnologias visando novas fontes de nutrientes para as plantas de maneira diversa, competitiva e sustentável.
- Avaliar os cenários internacionais de exploração mineral, oferta de matéria-prima e fertilizantes acabados, em relação a volumes disponíveis e valores comercializados, visando à integração da produção brasileira no cenário global.
- Monitorar e avaliar o cenário do mercado de gás natural e de H<sub>2</sub> no Brasil, visando contribuir com ações que promovam a utilização desses insumos, de maneira competitiva, na produção de fertilizantes nitrogenados no Brasil.

Durante a realização do benchmarking internacional, adotou-se uma abordagem integrada para analisar o setor global de fertilizantes, com o objetivo de identificar tendências, melhores práticas e o contexto global de negócios em que a indústria de fertilizantes do Brasil está inserida. Os resultados são exemplificados na Figura 2.13, Figura 2.14, Figura 2.15 e Figura 2.16.

**Figura 2.13: Tendências e melhores práticas para os fertilizantes nitrogenados.**



Fonte: BRASIL (2022, p. 27)

Figura 2.14: Tendências e melhores práticas para os fertilizantes fosfatados.

**2 P - Fósforo**

- **Mapeamento de produção, consumo, exportação, importação de fosfatados:**
  - Países e empresas detentores das maiores reservas minerais dominam o mercado internacional - China, Marrocos, EUA e Rússia concentram 73% da produção mundial;
  - OCP Group, Mosaic, Phosagro e Ma'aden produzem em torno de 74 milhões de toneladas de rocha fosfática, com capacidade ociosa estimada entre 50 e 60.
- **Mapeamento das principais políticas públicas adotadas recentemente em torno da indústria de fertilizantes fosfatados:** destaque para OCP (investimentos para triplicar processamento entre 2008 e 2027).
- **Mapeamento dos empreendimentos recentes em fosfatados:** Ma'aden, OCP e Phosagro.
- **Mapeamento dos maiores players e concentração de mercado:** indústria mais consolidada que N, menos que K.
- **Mapeamento tecnológico de processos e produtos para a cadeia de fosfatados:** Mosaic, Yara, Scotts Miracle, Annuvia e Outros - Tecnologia convencional consolidada, processos térmicos, fontes secundárias de fosfato (resíduos animais, lodo de esgoto, turfa), reguladores de liberação ou solubilidade.
- **Desafios:** Processamento do fosfato nacional de baixo teor nacional; Incorporação de matriz orgânica (P&D, CT&I); Gerenciamento de resíduos e subprodutos;
- **Oportunidades:** Proximidade do mercado consumidor brasileiro e grandes players já presentes no Brasil e tecnologia endógena.

Fonte: BRASIL (2022, p. 27)

Figura 2.15: Tendências e melhores práticas para os fertilizantes potássicos.

**3 K - Potássio**

- **Mapeamento de produção, consumo, exportação, importação de potássicos:**
  - Países e empresas detentores das maiores reservas minerais dominam o mercado internacional - Canadá (20% das reservas e 40% do mercado de exportações); Bielorrússia (13% das reservas e 21% do mercado); Rússia (34% das reservas e 20% do mercado).
  - Quatro empresas (Nutrien, Mosaic, Uralkali e Belaruskali), que em conjunto produzem em torno de 36 milhões de toneladas por ano (60% do mercado mundial + Alemanha com 12%); Capacidade ociosa; aliança estratégica entre maiores players para compartilhar infraestrutura.
- **Mapeamento das principais políticas públicas adotadas recentemente em torno da indústria de fertilizantes potássicos:** Canadá, Rússia, Belarus.
- **Mapeamento dos empreendimentos recentes em potássicos:** Poucos projetos *greenfield*, como o Petrikov em Belarus.
- **Mapeamento tecnológico de processos e produtos para a cadeia de potássicos:** K+S, York Potash, ICL, Yara, Anglo, Mosaic – Tecnologia de exploração e beneficiamento convencional consolidada, com destaque potássicos associados a fertilizantes orgânicos.
- **Desafios:** Desenvolvimento das reservas brasileiras, capazes de abastecer mais de 40% do mercado brasileiro.
- **Oportunidade:** Proximidade do mercado consumidor brasileiro e grandes players já presentes no Brasil.

Fonte: BRASIL (2022, p.28)

Figura 2.16: Tendências e melhores práticas para as cadeias emergentes de fertilizantes.

4
Cadeias Emergentes

- Organominerais e Fertilizantes Orgânicos:** China, Alemanha, Austrália, Rússia, Mercado Europeu, Japão são maiores originários de propriedade intelectual; Aditivos, Misturas com fertilizantes minerais; Adição de fertilizantes orgânicos (Geral); Preparação de fertilizantes a partir de etapa biológica ou bioquímica; Condicionadores de solos; Dejetos animais ou humanos; Turfa/carvão/semelhantes; Fertilizantes caracterizados pela forma; Fertilizantes contendo elementos traço; Inovação em química, Agricultura, Microbiologia e Biotecnologia.
- Subprodutos com potencial de uso agrícola:** Economia Circular; Resíduo *versus* Subproduto; Agricultura de baixo carbono; ACV; Elementos potencialmente tóxicos; Desafios regulamentares.
- Bioinsumos, Biomoléculas e Bioprocessos:** *Biofertilizers* (inoculantes no Brasil); Base microrganismos; Bactérias fixadoras de nitrogênio; Microrganismos mobilizadores de nutrientes, dentre outros; *Biostimulants* (biofertilizante ou estimulante no Brasil) - a base principal não é de microrganismos e sim produtos (ex: extratos de algas, ácidos húmicos, ácidos fúlvicos etc.; Condicionadores biológicos de solo (base de macrorganismos ou produtos de atividade como bacilos, fungos e metabólitos específicos).
- Nanotecnologia e automatização de sistemas de recomendação e aplicação de fertilizantes:** Nanofertilizantes e nanoaditivos; nanofiltros e nanosensores; materiais avançados; controle de liberação de nutrientes; agricultura de precisão; sensores inteligentes; otimização de aplicação de fertilizantes (menos dependência de moléculas de fertilizantes).
- Remineralizadores:** Fontes alternativas regionais; macronutrientes e micronutrientes; Brasil *player*.

Fonte: BRASIL (2022, p.28)

### 3 METODOLOGIA

Para descrever o processo de pesquisa do trabalho e definir como foram realizadas a coleta e a análise dos dados, foi utilizada a taxonomia de Gil (2002). O presente trabalho, quanto aos seus objetivos gerais possui caráter exploratório, descritivo e explicativo.

Para fundamentar a compreensão acerca do tema, foram revisitados conceitos essenciais que se referem à cadeia de fertilizantes, desde suas definições mais básicas, aplicações e principais critérios de análise de qualidade, passando por diferenciação entre produtos já consagrados e os mais emergentes, além da revisão dos processos de produção mais difundidos e exposição dos panoramas dos mercados mundial e nacional. Ademais, foram expostos dilemas, como o alto consumo de matérias-primas de origem fóssil, o elevado dispêndio de energia nos processos produtivos tradicionais e a dependência da agricultura nacional em relação aos fertilizantes produzidos no exterior.

Todo o arcabouço teórico foi obtido, sobretudo, em referências bibliográficas de cunho científico, como artigos, dissertações e teses. Todavia, no processo de busca por boas fontes de informações, a internet não pôde ser ignorada pela facilidade de nela encontrar bases de dados e informações mais atuais de organizações e empresas que são de alta relevância para o setor

de fertilizantes. Na Tabela 3.1 pode-se ver as palavras-chave e operador booleano que foram utilizados na busca por artigos:

**Tabela 3.1: Palavras-chave e Operador Booleano na busca de Publicações Científicas**

Palavras-Chave e Operador Booleano					Scopus	Science-Direct
Fertilizers	AND	Industry	AND	-	3.338	88.951
Fertilizers	AND	Economy	AND	-	649	44.668
Bio	AND	Fertilizers	AND	-	3.030	42.557
Bio	AND	Fertilizers	AND	Production	629	37.638
Nitrogen	AND	Fertilizers	AND	Industry	749	47.470
Phosphate	AND	Fertilizers	AND	Industry	378	26.055
Potassium	AND	Fertilizers	AND	Industry	212	21.972

Fonte: Elaboração Própria

No estágio de avaliação das alternativas aos fertilizantes tradicionais, alguns dos critérios utilizados para escolha de quais alternativas estudar foram: a relevância para a comunidade científica, observando o número de artigos e teses referentes ao tema; maior facilidade de adaptação e aderência às condições do cenário brasileiro; e a sustentabilidade desta alternativa emergente.

Sendo assim, o capítulo seguinte é dedicado à avaliação de alternativas consideradas notáveis, expondo os critérios que as tornam relevantes e elucidando os processos produtivos por trás delas, além realizar comparativos com as cadeias tradicionais e propor estratégias de implementação destas alternativas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 - ROTAS ALTERNATIVAS PARA PRODUÇÃO DE FERTILIZANTES

É evidente, observando a cadeia produtiva e a balança comercial brasileira, que os desafios - e as oportunidades - nos setores de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos são inúmeros e, por serem tantos, faz-se necessária a análise individualizada de cada cadeia.

Por representar o maior déficit da balança comercial deste setor para o Brasil, os fertilizantes potássicos se tornam um grande desafio, uma vez que há uma única mina brasileira explorável, a de Taquari-Vassouras, no Sergipe. Além disso, a reserva brasileira representa apenas 0,1% (em K<sub>2</sub>O equivalente) das reservas mundiais de potássio. No ano de 2020, a dependência dos fornecedores externos atingiu 96,4%, sendo realizadas importações de 6,80 milhões de toneladas de KCl (K<sub>2</sub>O contido), enquanto a produção interna foi de 250 mil t de

KCl. Ademais, como no atual ritmo da produção mundial, as reservas são capazes de atender a demanda por mais 195,3 anos, os estudos acadêmicos são voltados para o melhor aproveitamento na extração destas fontes minerais ou para o descobrimento de novas fontes, também minerais (BRASIL, 2021).

Já os fertilizantes fosfatados, no que se refere à dependência externa, apresentam um cenário muito menos preocupante, quando comparado aos seus pares, importando 55% do total utilizado na agricultura nacional. Em consonância a este fato, o Plano Nacional de Fertilizantes prevê um cenário positivo de redução da dependência nacional graças ao surgimento de empreendimentos que permitirão ampliar a capacidade instalada no Brasil de 7,9 milhões de ton/ano para 11,4 milhões de ton/ano até 2026 (BRASIL, 2021). Ou seja, os fertilizantes fosfatados, que não são a maior preocupação imediata, já apresentam um cenário mais positivo no médio prazo. Isso explica o motivo de haver similaridade entre o perfil das fontes de matéria-prima para a cadeia produtiva e das possíveis alternativas para os setores dos fertilizantes potássicos e fosfatados, pois em ambos os casos há uma dependência absoluta da produção de minérios.

Na contramão das cadeias produtivas de fertilizantes potássicos e fosfatados, em termos de matéria-prima, a cadeia de fertilizantes nitrogenados tem como fonte o ar, composto em 78% por nitrogênio. Este fato gera uma série de possibilidades a mais na busca por substâncias nitrogenadas que possam ser absorvidas pelas plantas como nutrientes. A dependência do atual processo produtivo é relacionada ao setor de petróleo e gás natural, uma vez que a molécula chave da cadeia é a amônia, composta por nitrogênio e hidrogênio ( $\text{NH}_3$ ). Todavia, a inovação e a disrupção no setor não são dificultadas por este fato, pelo contrário, existem fontes de hidrogênio conhecidas e extremamente abundantes no Brasil, como a água e a matéria-orgânica que compõe os seres vivos. Já em relação à balança comercial, as importações de fertilizantes nitrogenados no Brasil representam 76% do consumo interno (BRASIL, 2020b), expondo a fragilidade do agronegócio brasileiro frente seus parceiros comerciais.

A discussão sobre fertilizantes nitrogenados torna-se ainda mais interessante, quando são retomados pontos vistos em capítulos anteriores. Primeiramente, o atual modelo de produção de fertilizantes nitrogenados é responsável por cerca de 92% do uso total de energia na produção de fertilizantes, que totaliza 1,2% do gasto mundial de energia (BUENO E JUNIOR, 2015). Também, as oportunidades de inovação e a urgência da discussão sobre fertilizantes nitrogenados tem demonstrado maior relevância em relação aos seus pares, na medida em que, ao comparar o número de artigos em bases científicas, exposto na Tabela 3.1,

os fertilizantes nitrogenados apresentam mais que o dobro de artigos relacionados aos fertilizantes potássicos e 82% mais, quando comparado aos fertilizantes fosfatados.

A sequência deste trabalho se concentrará em estudar uma alternativa que tem ganhado muita notoriedade: a Amônia Verde. Outra tecnologia que tem demonstrado potencial é o bioinsumo chamado de Arbolina. É uma tecnologia 100% brasileira e atua sobre o metabolismo de células vegetais, estimulando a fotossíntese e a absorção de macronutrientes e micronutrientes, de certa forma, englobando uma maior disponibilidade de nitrogênio, potássio e fósforo para plantas.

#### **4.1.1 AMÔNIA VERDE**

Amônia Verde refere-se à produção de amônia de maneira mais sustentável e com menor impacto ambiental em comparação com os métodos tradicionais de produção desse fertilizante, que é caracterizado pela emissão significativa de dióxido de carbono, conforme apresentado nos capítulos anteriores.

A crescente relevância da discussão em torno da Amônia Verde está relacionada à preocupação mundial quanto a redução das emissões de gases de efeito estufa e adoção de fontes de energia mais sustentáveis. Inclusive, no terceiro objetivo estratégico do Plano Nacional de Fertilizantes - *“Promover vantagens competitivas na cadeia de produção nacional de fertilizantes para melhorar o suprimento do mercado brasileiro.”* -, umas das metas declara explicitamente o interesse brasileiro em focar nesse tipo de alternativa: *“Atrair investimentos para a instalação de pelo menos três unidades de nitrogenados até 2050 baseadas na amônia verde/azul”*

A síntese da amônia, que é a base para a produção de diversos fertilizantes nitrogenados (ureia, sulfato de amônio e diversos nitratos), envolve a combinação de nitrogênio da atmosfera com hidrogênio sob alta pressão e com o uso de catalisadores apropriados. O processo tradicional comumente utilizado exige um consumo substancial de energia, sendo a maior parcela proveniente da produção de H<sub>2</sub>.

Historicamente, o hidrogênio é obtido principalmente a partir de gás natural, embora, em alguns países, também se utilize carvão e outras fontes de energia fóssil. Dessa forma, além do elevado consumo energético, a utilização de fontes fósseis na produção de hidrogênio resulta em emissões consideráveis de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono.

Nesse sentido, dado que a etapa crítica do processo é a produção de hidrogênio, tem sido bastante estudado a utilização de rotas mais sustentáveis. O “hidrogênio verde”, por exemplo, é uma das grandes apostas. Este é obtido por meio da eletrólise da água utilizando

eletricidade gerada por fontes renováveis. A “Amônia Verde”, por sua vez, é o nome dado para esse fertilizante produzido mediante a utilização do “Hidrogênio Verde”.

Apesar dos benefícios sob ótica da sustentabilidade, é válido ressaltar que a adoção da rota eletrolítica, pode impactar a oferta do mercado de fertilizantes. Isso porque, historicamente, as indústrias têm optado pela produção de ureia devido à conveniência de ter acesso às matérias-primas essenciais no mesmo local, ou seja, o  $\text{NH}_3$ , que é a base de todos os fertilizantes nitrogenados sintéticos, e o  $\text{CO}_2$ , que é um subproduto da produção de hidrogênio no processo atual. No entanto, dado que a produção de hidrogênio verde não envolve o uso de combustíveis fósseis, não haverá uma oferta abundante, econômica e prontamente disponível de  $\text{CO}_2$  no local de fabricação dos fertilizantes (IBRAPE, 2023)

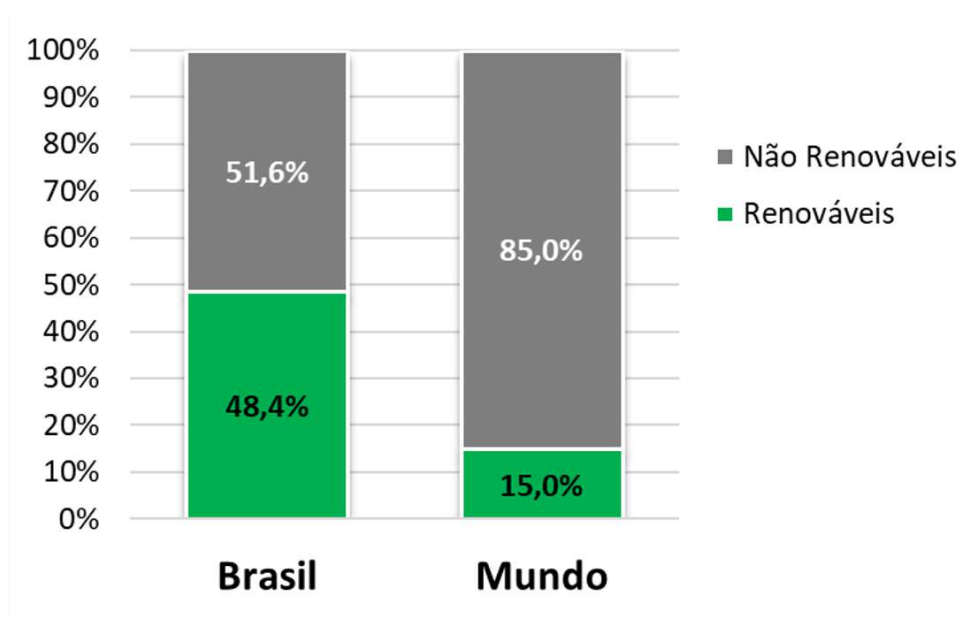
Como resultado dessa eliminação da emissão de  $\text{CO}_2$  durante o processo de produção de amônia, a ureia, fertilizante nitrogenado mais amplamente utilizado atualmente, ficará menos atrativo para os produtores, deixando de ser, portanto, uma opção conveniente ou competitiva no mercado. O grande problema disso, por sua vez, é que a ureia apresenta vantagens significativas, como alta concentração de nitrogênio e menor custo de produção em comparação com outros fertilizantes nitrogenados. Como alternativa, os fertilizantes mais propensos a substituir a ureia incluem o nitrato de amônio e o nitrato de amônio e cálcio (CAN) (IBRAPE, 2023)

A boa notícia, por sua vez, é que o mercado de hidrogênio tem atraído investimentos globais por ter sido apontada no mercado mundial como um papel crucial na transição para uma economia com baixas emissões de carbono. No Brasil, por exemplo, a Unigel – uma das maiores empresas químicas da América Latina – em parceria com a empresa alemã líder em tecnologia e sistemas industriais, Thyssenkrup Nucera, está investindo US\$ 120 milhões na construção de uma fábrica de hidrogênio verde em Camaçari (BA). A primeira fase do projeto, programada para até o final de 2023, visa a produção de 10 mil toneladas de hidrogênio verde que serão posteriormente convertidas em 60 mil toneladas de amônia (LARKIN E SPENCE, 2022).

#### **4.1.1.1 AMÔNIA VERDE – CONTEXTO BRASILEIRO**

Devido a necessidade de utilização de fontes renováveis de energia para produção de hidrogênio verde e, conseqüentemente, a amônia verde, o Brasil destaca-se como um forte player para a produção e exportação. Isso porque a participação de fontes renováveis na geração elétrica brasileira apresenta grande destaque quando comparada a outros países ao longo do mundo, conforme mostra a Figura 4.1.

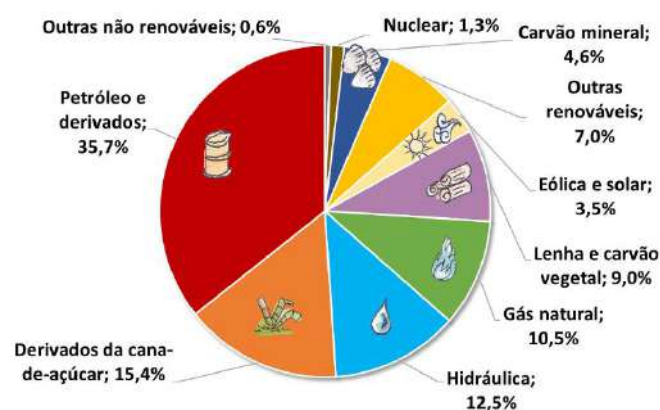
**Figura 4.1: Consumo de energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis no Brasil e no mundo em 2020.**



Fonte: EPE (2021)

A expressiva participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira se dá, naturalmente, pela abundância de tais fontes, mas também devido incentivo nacional estruturado ao longo dos últimos anos. A Figura 4.2 demonstra a capacidade instalada de geração de energias renováveis no Brasil e seus respectivos percentuais de participação na matriz elétrica no ano de 2019.

**Figura 4.2: Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW) – Fontes Renováveis.**

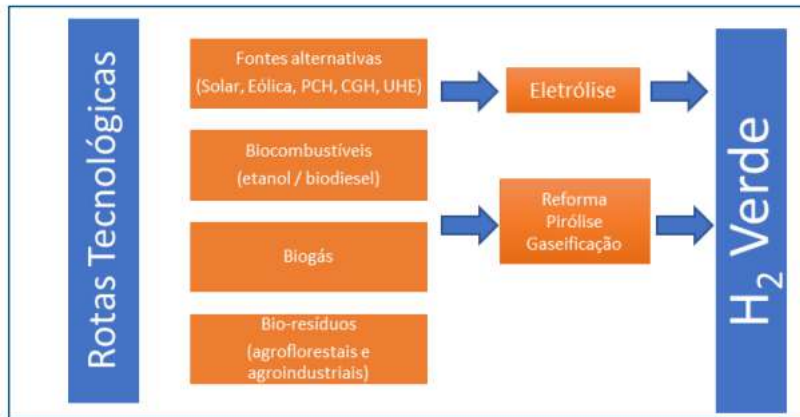


Fonte: EPE (2019)

Em relação às rotas tecnológicas, as fontes renováveis de maior potencial no Brasil para a geração de hidrogênio verde são solar, eólica, hidrelétrica e os biocombustíveis. Tais fontes servem como insumos dos processos de eletrólise, reforma, pirólise ou gaseificação para a obtenção de hidrogênio verde.

De forma a sumarizar a disposição de fontes renováveis com potencial para geração de hidrogênio verde no Brasil, apresenta-se na Figura 4.3 um modelo esquemático simplificado sobre tais fontes e respectivas rotas tecnológicas.

**Figura 4.3: Principais rotas tecnológicas de H<sub>2</sub> verde no Brasil**



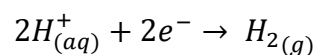
Fonte: ADAS et al (2021, p.56.)

Conforme exemplificado acima, a produção de hidrogênio verde pode ser realizada por diferentes rotas tecnológicas. Abaixo, serão detalhadas 2 rotas tecnológicas: (I) Eletrólise utilizando fonte eólica; (II) Reforma utilizando biometano.

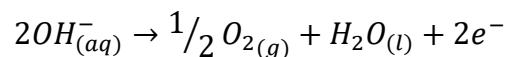
(I) Eletrólise utilizando fonte eólica

A eletrólise da água é uma reação química desencadeada a partir de uma fonte externa de energia o que a torna não espontânea, ocorrendo a partir de reações parciais que se realizam nos eletrodos – o anodo e o catodo – na presença de um eletrólito que se entende como um condutor de energia (BROWN et al., 2005, apud MARTINS E SOARES, 2017) conforme mostram as equações (1), (2) e (3).

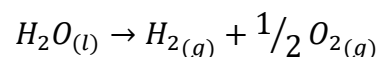
(1) Catodo:



(2) Anodo:



(3) Global:

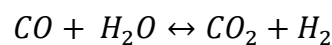
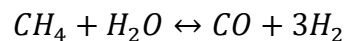


Dessa forma, para a produção de hidrogênio eletrolítico, dois insumos são essenciais: a água e a eletricidade.

## (II) Reforma utilizando biometano

Tradicionalmente, o método mais utilizado para produção de hidrogênio em escala industrial é a reforma a vapor do metano, proveniente do gás natural. Visando a abordagem mais sustentável, uma opção que vem sendo amplamente discutida é a produção de hidrogênio a partir de biogás, conforme é explicado abaixo.

Após a purificação, o biogás passa pela primeira etapa em que é produzido o gás de síntese ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ). Em seguida, para obtenção de  $\text{H}_2$ , o  $\text{CO}$  é convertido em  $\text{CO}_2$  pela reação de deslocamento.



A grande vantagem dessa rota é que, como ainda tem como subproduto o  $\text{CO}_2$ , a ureia não precisa deixar de ter o protagonismo na oferta de fertilizantes, conforme mencionado anteriormente.

Ao analisar o desenvolvimento do mercado de hidrogênio verde no país, é possível sintetizar as principais forças, fraquezas, ameaças e oportunidades que existem nesse setor que pode impulsionar ou atrasar o incentivo à produção de Amônia Verde, conforme mostrado na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1: Análise SWOT do mercado de hidrogênio verde.**

FATORES INTERNOS	
FORÇAS	FRAQUEZAS
Condições climáticas e geográficas favoráveis para a produção de $\text{H}_2$ verde em larga escala.	Mercado de gás natural em evolução no Brasil, sob a ótica de ausência de previsão de regulamentação que permita a injeção de $\text{H}_2$ na rede.
Extensão da costa litorânea facilita o escoamento da produção.	Grandes distâncias para transporte de $\text{H}_2$ .
Presença de empresas em toda cadeia de valor de $\text{H}_2$ , incluindo de fornecedores aptos a produzir eletrolisadores e reformadores (vide projetos realizados nas chamadas estratégicas de P&D da Aneel com tecnologia nacional).	Extensão reduzida da malha de gasodutos, concentrada majoritariamente na região litorânea.

Diversidade de centros de pesquisa e laboratórios no país dedicados ao tema.	Legislação inexistente no Brasil.
Aumento da consciência socioambiental por parte das potenciais empresas consumidoras.	Pequeno volume de investimentos quando comparados a países com estratégias definidas para o H <sub>2</sub> verde.
Reconstrução de uma indústria de fertilizantes sustentável no país a partir da amônia verde, reduzindo dependência externa do insumo agrícola.	Ritmo lento na adoção de tecnologia (do laboratório ao mercado).
Existência de representação setorial (ABH <sub>2</sub> ).	Endividamento público do país em patamares inéditos, com possibilidade de redução dos investimentos públicos em novas tecnologia.
FATORES EXTERNOS	
OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
Comprometimento dos países no cumprimento das metas de descarbonização pactuadas (Acordo de Paris)	Concorrência com outros países da América Latina e do mundo no fornecimento de H <sub>2</sub> verde.
Momentum no cenário internacional do H <sub>2</sub> verde como tecnologia viável para a descarbonização das economias.	Agilidade de outros governos tais como Chile e Austrália no planejamento e implementação de ações estruturantes em toda a cadeia de valor para produção de H <sub>2</sub> verde para exportação e consumo local.
Abertura do mercado eólica offshore, apresentando novo potencial para geração de H <sub>2</sub> verde.	Percepção brasileira do hidrogênio como uma tecnologia disruptiva do futuro (vide PNE 2050) enquanto o cenário global vislumbra um crescimento do mercado com tecnologias de H <sub>2</sub> em larga escala já 2040.

Fonte: Adaptado de ADAS et al (2021)

#### 4.1.1.2 PRINCIPAIS DESAFIOS E ESTRATÉGIAS DA AMÔNIA VERDE

Destaca-se que, uma vez que a etapa mais crítica da rota é a geração de hidrogênio verde, os desafios e as estratégias de incentivos associados a produção desse fertilizante sustentável estão diretamente ligados ao hidrogênio verde.

Nesse sentido, quando se consideram os aspectos críticos no desenvolvimento do mercado nacional e internacional de hidrogênio sustentável no Brasil, destacam-se as seguintes questões:

- (I) **Custos iniciais elevados:** A implementação de tecnologias de eletrólise de água é dispendiosa. As indústrias de fertilizantes precisarão de investimentos substanciais para fazer a transição.
- (II) **Integração de processos:** A reconfiguração das instalações existentes de produção de amônia para adotar a rota de amônia verde pode ser complexa e requer um planejamento cuidadoso.
- (III) **Disponibilidade de energia renovável:** A produção de amônia verde depende de uma fonte confiável de energia renovável. Apesar do Brasil ser abundante em energias renováveis em sua matriz, isso pode ser limitado em algumas regiões. A infraestrutura de energia limpa deve ser desenvolvida e expandida para suportar essa transição.
- (IV) **Armazenamento de hidrogênio:** O hidrogênio é um componente fundamental na produção de amônia verde, mas seu armazenamento e manuseio seguro são desafios técnicos que precisam ser resolvidos.
- (V) **Infraestrutura:** Limitações na infraestrutura de transporte e fornecimento que comprometem a capacidade de efetuar transportes de grande escala de forma confiável, econômica e ecologicamente responsável. A infraestrutura existente é predominantemente voltada para o gás natural e é geograficamente restrita, principalmente à região costeira.
- (VI) **Questões regulatórias e burocráticas:** É fundamental estabelecer clareza sobre as responsabilidades das autoridades públicas relacionadas à regulamentação e ao uso do H<sub>2</sub>V, uma vez que a falta de políticas de incentivo e regulamentações claras pode desacelerar a adoção do hidrogênio verde.
- (VII) **Economia Brasil:** O crescimento econômico limitado do Brasil e o alto endividamento do setor público podem afetar negativamente o volume de investimentos disponíveis para o setor.

Dito isso, para incentivar a produção de amônia verde no Brasil, recomenda-se algumas ações para consolidação das tecnologias de hidrogênio como elemento chave para o desenvolvimento econômico e descarbonização das cadeias produtivas:

- (I) **Estratégia nacional:** Estabelecer políticas consistentes e de longo prazo para orientar a transição energética de forma eficaz, isto é, consolidar uma estratégia nacional e de um plano de ação para continuação e aprimoramento das políticas públicas nos campos técnico, regulatório e tecnológico, possibilitando dessa forma o fortalecimento da cadeia produtiva de hidrogênio no Brasil.
- (II) **Subsídios governamentais:** Recomenda-se a adoção de subsídios governamentais aos investidores iniciantes, que acabam se expondo mais aos eventuais riscos. As aplicações inovadoras de hidrogênio, juntamente com os projetos de geração e infraestrutura, estão em uma fase de alto risco durante sua implementação. Disponibilizar empréstimos, garantias e outras ferramentas financeiras de curto prazo pode encorajar o setor privado a investir, aprender e compartilhar riscos e benefícios.
- (III) **Padronização industrial:** Facilitar a harmonização de padrões industriais em diferentes regiões e setores no que diz respeito à tecnologia de hidrogênio. Isso possibilitará aproveitar economias de escala para reduzir custos.
- (IV) **Investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D):** Além dos benefícios das economias de escala, a pesquisa e o desenvolvimento desempenham um papel fundamental na melhoria do desempenho das tecnologias de hidrogênio, incluindo pilhas a combustível, combustíveis à base de hidrogênio e eletrolisadores. O governo deve desempenhar um papel importante na definição de diretrizes de pesquisa, na redução de riscos e na atração de investimentos privados para a inovação.
- (V) **Fortalecimento da cadeia:** Concentração inicial de esforços nas oportunidades de hidrogênio verde com maior viabilidade, escala ou menor custo, a fim de fortalecer a cadeia de produção.

#### 4.1.2 ARBOLINA

A Arbolina é um bioestimulante desenvolvido através de uma parceria entre o Instituto de Química da Universidade de Brasília (UnB) e a Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (Embrapa) para ser capaz de auxiliar no modelo de produção agrícola, aprimorando a eficiência dos sistemas produtivos, mas ao mesmo tempo sendo acessível.

Ela atua como uma proteína de transporte na membrana plasmática das células vegetais, facilitando a absorção de nutrientes, o que resulta no estímulo do desenvolvimento das plantas; ademais, esta substância possui uma alta densidade de cargas elétricas em sua superfície, atuando no carreamento de hormônios vegetais fitorreguladores (SOUZA, 2023). Dentro da planta, este carreamento de fitorreguladores se traduz em ativar rotas metabólicas essenciais, que promovem a fotossíntese, ou seja, a capacidade de absorção e aproveitamento da luz para produção de energia e conseqüente aproveitamento de água e nutrientes. Esse conjunto de fatores possibilitam aumentos de produtividade de até 25% para a indústria de tomate e de até 80% para o morango (EMBRAPA, 2020).

Para além da utilização da Arbolina na melhoria da produtividade agrícola, o emprego da substância também é capaz de conferir à planta certa capacidade de autorregulação e gerenciamento em condições adversas de estresse hídrico ocasionado por mudanças climáticas ou pela presença de produtos químicos defensivos, possibilitando a absorção de nutrientes que não estejam disponíveis de forma plena no solo. Devido esta propriedade de interferir positivamente no metabolismo vegetal ainda que em condições extremas, faz com que esta inovação contribua para a redução do impacto ambiental (PIRES, 2020). Um reflexo disso é o investimento de R\$ 4 milhões realizado pela Shell Brasil para o desenvolvimento do projeto NANORAD'S que objetiva investigar o efeito da Arbolina no solo e em plantas, testando-a em diferentes sistemas de cultivo com foco na recuperação de áreas degradadas e impactadas pelo desmatamento (SHELL, 2023).

Quanto à composição, ela tem demonstrado substancial diferença em relação a outras nanotecnologias presentes na agricultura, que está centrada na aplicação de nanomateriais muitas vezes a base de polímeros, óxidos metálicos, nanopartículas metálicas, ouro e prata, que, além de não serem biodegradáveis, são tóxicos para todo um conjunto de seres vivos e bioacumulam durante gerações (CFQ, 2021). A Arbolina, por sua vez, tem como alguns dos elementos mais importantes o carbono orgânico (~70%), o nitrogênio (17%) e o hidrogênio (4%) (EMBRAPA, 2020); (PIRES, 2020).

Suas características gerais fazem com que ela consiga interagir com uma proteína-alvo sem a necessidade de aplicação de grandes quantidades de produto. Uma dose de 1 litro diluída numa concentração de 100 mg/l é o suficiente para cobrir 2 hectares de terra, cumprindo o objetivo do biofertilizante. Seu uso é realizado na agricultura, sobretudo, através de pulverizações foliares em plantações de soja, trigo, milho, algodão, feijão, hortaliças ou qualquer outra espécie que se queira cultivar (PIRES, 2020).

Outro ponto positivo da Arbolina é que ela é passível de ser adquirida pelo pequeno produtor rural, algo importante, considerando a agricultura familiar no Brasil possui muito mais estabelecimentos que a não familiar, com muitas pessoas dependendo dela para seu sustento. Segundo o censo agropecuário de 2017, 77% dos estabelecimentos agropecuários do país são classificados como sendo de agricultura familiar, apesar de ocuparem apenas 23% da de toda a área ocupada por estabelecimentos agropecuários (IBGE, 2019).

Dentre os benefícios da aplicação de Arbolina comumente citados estão: a biocompatibilidade, podendo ser misturada com outros insumos agrícolas na mesma aplicação; atoxicidade; o potencial carreamento de macronutrientes, resultando em aumento de produção para diversas culturas e resistência vegetal à seca; aplicação de pulverizações via foliar sobre as hortaliças, com as nanopartículas sendo facilmente absorvidas pelas folhas. Além dos benefícios diretos às plantas, a Arbolina é biodegradável: não gera resíduos, não prejudica micro-organismos benéficos presentes no solo e sistemas aquáticos (EMBRAPA, 2020); (PIRES, 2020).

Estudos recentes concluíram que a Arbolina afetou favoravelmente a produção em diferentes culturas. Enquanto LEMOS (2021) observou maior massa seca em alfaces baby leaf, SOUZA (2023) constatou que a presença combinada de fitorreguladores com Arbolina aumentou a quantidade de morangos comerciais produzidos, inclusive com a Arbolina potencializando o efeito do ácido giberélico, que é um fitorregulador aplicado em formulações.

**Figura 4.4: Estrutura hidropônica com mudas de alface em estudo sobre Arbolina**



Fonte: Lemos (2021)

O sucesso da Arbolina em estudos, motivou os pesquisadores do Instituto de Química da UnB e a Embrapa a celebrarem uma parceria para fundação de uma startup chamada Krilltech, que é uma AgTech – empresa de tecnologia no ramo de agronegócio. Atualmente, a Krilltech é a responsável pela produção e comercialização da Arbolina e tem chamado atenção devido o potencial da tecnologia que detém. A empresa venceu a etapa nacional e, em seguida, a etapa mundial da “Global Tech Innovator 2021”, premiação internacional promovida pela KPMG, que procura conhecer os principais inovadores tecnológicos e futuros tech titans (KPMG, 2021).

Por tudo isso, a Arbolina é vista como uma tecnologia nacional com potencial para revolucionar as agroindústrias brasileira e mundial. Ainda em 2021, a Ordem dos Economistas do Brasil (OEB) considerou a Krilltech como um potencial unicórnio brasileiro, termo criado para descrever as startups que conseguem atingir a marca de R\$ 1 bilhão em avaliação de mercado. Um estudo econômico lançado pela OEB avaliou o impacto desta tecnologia, estimando em 2% de incremento no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro e de 10% no PIB da agricultura, algo na ordem de R\$ 150 bilhões (PIRES, 2020). Também graças a Arbolina, a Krilltech foi incluída pela revista Pequenas Empresas & Grandes Negócios em sua lista de 100 empresas mais promissoras no ecossistema de inovação brasileiro, composto por startups.

Sobre o processo produtivo, como a Krilltech é a única habilitada a produzir, há segredo industrial que impossibilita o conhecimento de detalhes. O que se sabe é que os equipamentos já são encontrados habitualmente na indústria, permitindo que a tecnologia seja 100% brasileira e seu preço não lastreado, característica que é extremamente vantajosa na busca por uma tecnologia que diminua a dependência do setor agrícola frente a importações dos fertilizantes tradicionais. Também, 90% da linha principal do produto se utiliza de fontes renováveis; e neste processo não são gerados resíduos líquidos e sólidos, há baixa emissão de gases e não há o uso de agentes tóxicos (PIRES, 2020). Este elevado percentual no uso de energias renováveis é indicativo de um efeito positivo do uso da arbolina na redução de uso de energias fósseis e descarbonização da cadeia produtiva de diversas culturas. Por outro lado, os 10% correspondentes a fontes de energia não renováveis e a emissão de gases indicam que há pontos de atenção que ainda podem ser trabalhados na cadeia produtiva.

Em 2020, a Krilltech migrou de sua unidade produtiva para o SENAI Cimatec Park, que é um complexo tecnológico e industrial de 4 milhões m<sup>2</sup>, localizado em Camaçari/BA. A intenção da mudança foi de expandir a produção antes capaz de atender 1 milhão e 200 hectares/ano para 20 milhões hectares/ano, sendo capaz de cobrir 40% de toda soja e milho do país. Esta unidade passou a ser a responsável pela produção do ativo, e serão criadas unidades de mistura e distribuição no país, a fim de facilitar os desafios logísticos (PIRES, 2020).

Ademais, a Krilltech mantém ensaios de estudo com produtores de soja em Mato Grosso, na Bahia, no Rio Grande do Sul e na região do Cerrado. Há também negociações para criação de unidades de mistura em outros países, como Estados Unidos e países árabes (PIRES, 2020).

O uso da arbolina como alternativa aos fertilizantes minerais aponta para impactos favoráveis na redução de emissões de carbono e na diminuição do déficit na balança comercial do setor de fertilizantes. Contudo, assim como foi feito com a amônia verde, ainda é necessário analisar as perspectivas para o mercado da arbolina no Brasil, sobretudo em relação a outros fertilizantes de cadeias emergentes. A Tabela 4.2 mostra a análise da Matriz SWOT.

Tabela 4.2: Análise SWOT do mercado de arbolina.

FATORES INTERNOS	
FORÇAS	FRAQUEZAS
Tecnologia e produção 100% brasileira. O valor do produto possui pouca relação com moeda estrangeira.	Krilltech é a única produtora, tornando a distribuição suscetível a desconfianças e severos gargalos.
Impacto positivo na absorção de todos os macronutrientes e micronutrientes disponíveis no solo.	Tecnologia protegida por segredo industrial. Com matérias-primas, processo e resíduos desconhecidos.
Pode ser utilizada em várias culturas e com potencial para uso em condições adversas e de estresse para a planta.	Poucos estudos disponíveis quando comparada a outras tecnologias, como a amônia verde.
Preço acessível aos produtores de diversos portes, inclusive os de economia familiar.	Planta produtiva única e malha de distribuição e mistura ainda pouco desenvolvida.

FATORES EXTERNOS	
OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
Produção em um país que historicamente possui relações internacionais estáveis, evitando variações de preço e gargalos gerados por fatores geopolíticos.	Tecnologia sob segredo industrial e absolutamente desconhecida externamente. Competição com tecnologias de mecanismo de atuação difundido.
Momento propício para exportação, haja vista o empenho mundial em torno de alternativas sustentáveis e não agressivas ao meio ambiente.	Outros países já buscam suas próprias alternativas de tecnologia para redução de dependência externa.

Fonte: Elaboração própria

#### 4.1.2.1 PRINCIPAIS DESAFIOS E ESTRATÉGIAS DA ARBOLINA

Ao examinar os itens essenciais para a que a arbolina se confirme como uma tecnologia disruptiva e de potencial revolucionário para o mercado agro, é perceptível que este possível cenário esbarra em alguns desafios que são resultantes diretamente de duas questões: uma única empresa ser a responsável por toda a produção; e a falta de compreensão acerca do processo produtivo.

Dessa forma, a partir destes pontos, os seguintes desdobramentos se sobressaem:

I) **Desconhecimento sobre a Tecnologia:** No sistema de monopólio produtivo, como é o caso estudado, a associação da Krilltech com a figura da Embrapa e de parceiros de grande porte são fundamentais para aceitação da marca e, conseqüentemente, da tecnologia. Isso, pois a Krilltech é uma startup recém-criada graças ao potencial observado na arbolina, se tratando ainda de uma companhia de investimentos relativamente modestos e de reputação não consolidada.

II) **Monopólio produtivo:** A existência de uma única planta produtiva para atender todo o território nacional é um ponto a ser contornado; além da necessidade de expansão da rede de distribuição e mistura do produto. Sem estes investimentos, os riscos de gargalos produtivo e logístico são sempre iminentes.

III) **Compreensão do processo:** Como a Krilltech é a única produtora e todo o processo de produção da arbolina não é publicamente difundido, muitas informações importantes são desconhecidas. Não se sabe quais as matérias-primas e suas origens; o montante de energia dispendido; e quais os resíduos do processo. A base de todo o conhecimento é fornecida pela única produtora, afirmando que o processo é não agressivo ao meio-ambiente.

IV) **Escassez de Estudos:** Uma alternativa que poderia ser um facilitador para a arbolina no movimento de se tornar um produto mais difundido no mercado e aumentar a confiança no produto seriam justamente os estudos acadêmicos. Todavia, há certa carência de bibliografia, artigos, e teses sobre os resultados da arbolina em diferentes culturas.

Para fortalecer um cenário favorável à produção de arbolina e, por conseguinte, estimular todo o cenário brasileiro de bioinsumos como alternativa aos fertilizantes tradicionais, o Governo brasileiro é um parceiro fundamental. Para alcançar tal objetivo e tendo como base as diretrizes e ações do Plano Nacional de Fertilizantes, propõe-se o seguinte planejamento:

I) **Fomento ao Consumo:** Uma forma de tornar a arbolina mais aceita como tecnologia frente aos consumidores, é a criação de incentivos, por parte do Governo brasileiro, aos produtores, para que estes utilizem fertilizantes mais eficientes em sua ação e de menor impacto ambiental, como é o caso da arbolina.

II) **Produção em Larga Escala:** O Brasil precisa instaurar política que viabilize a produção em larga escala para estes efetivos avanços em PD&I que são gerados pelas entidades de pesquisa, tendendo parte efetiva da demanda nacional. Uma cadeia produtiva consolidada e que potencialize a produção brasileira de alimentos torna o Brasil numa referência e é capaz de atrair investidores internacionais.

III) **Marco Regulatório:** Para trazer confiança ao processo de produção, não só da arbolina, mas de nanotecnologia agro, é essencial a instituição de um marco regulatório com: definições amplas; diretrizes que tragam garantias e segurança jurídica para investidores e novos negócios; e, sobretudo, normas que contemplem a proteção ao meio-ambiente.

IV) **Incentivo à Pesquisa:** É fundamental que o Governo institua políticas de investimentos em pesquisas dedicadas ao desenvolvimento de nanotecnologia Agro, estabelecendo um ambiente com operações coordenadas envolvendo universidades, institutos nacionais de pesquisa e a Embrapa, em consonância com políticas de estímulos à inovação na indústria nacional de fertilizantes. Por fim, para que tanto conhecimento ganhe um sentido, é indispensável que sejam firmados instrumentos de integração efetiva entre a pesquisa científica e a indústria nacional de fertilizantes, para que a arbolina não seja um caso isolado e o Brasil possa se tornar referência.

## 5 CONCLUSÃO

A utilização de fertilizantes, principalmente os de origem mineral, está em constante crescimento no mercado brasileiro, devido a eficácia comprovada na compatibilização dos nutrientes do solo. No entanto, é necessário considerar que a produção desses fertilizantes, principalmente dos nitrogenados, é extremamente intensiva em energia proveniente de combustíveis fósseis. Além disso, cerca de 80% desses fertilizantes é importado no país e, portanto, seu elevado consumo se traduz em um déficit notável na balança comercial brasileira.

Nesse sentido, nota-se um potencial a ser explorado de incentivo a redução brasileira da dependência externa em relação a indústria de fertilizantes atrelado aos compromissos de sustentabilidade do Brasil.

Para isso, a “Amônia Verde” e a “Arbolina”, por exemplo, surgem como opções atraentes frente aos fertilizantes tradicionais, justamente por não estarem diretamente ligadas à cadeia de óleo e gás. Contudo, em ambos os casos, diversos fatores podem limitar o alcance do potencial prometido, gerando incertezas para consumidores, produtores e investidores do setor. A fim de avaliar os prós e contras, foram analisadas as duas rotas no contexto brasileiro, abordando aspectos como pesquisa, infraestrutura, mercado e legislação.

A primeira rota, amônia verde, tem despontado como uma forte alternativa aos nitrogenados devido a ascensão do hidrogênio verde, produzido por fontes renováveis de energia. Essa rota tem ganhado relevância no Brasil, devido suas climáticas favoráveis à produção de energia de baixo carbono. Nota-se que a combinação desses fatores, aliada aos laboratórios de pesquisa dedicados ao tema e à presença consolidada de empresas na cadeia produtiva do hidrogênio cria um ambiente propício ao crescimento dessa tecnologia nos próximos anos. No entanto, desafios logísticos e de infraestrutura para a distribuição da matéria-prima, como malha reduzida de gasodutos, assim como obstáculos técnicos, incluindo a estocagem segura do hidrogênio, contribuem para a incerteza do cenário.

A arbolina, por sua vez, também apresenta vantagens, como o impacto positivo na absorção de todos os nutrientes do solo, sua natureza não tóxica e a possibilidade de implementação em conjunto com outros fertilizantes. Ademais, trata-se de uma inovação 100% nacional e acessível a pequenos produtores. No entanto, a dependência de uma única empresa e uma única planta produtiva pode acarretar gargalos significativos para o setor. Além disso, a falta de transparência em relação às matérias-primas e processos pode suscitar dúvidas sobre a sustentabilidade do projeto em termos de energia e geração de resíduos. Nesse cenário, a supervisão próxima do governo é crucial para fiscalizar e avaliar o impacto ambiental da produção desse ativo.

Ambas as rotas tecnológicas demonstram potencial como alternativas capazes de reduzir drasticamente a dependência externa do Brasil no consumo de fertilizantes a longo prazo. Para concretizar esse objetivo, é essencial promover pesquisas, estudos de viabilidade técnica e econômica, além de investimentos maciços, uma legislação clara que garanta a proteção ambiental e incentivos governamentais para produção e consumo.

Em última análise, essas rotas não são mutuamente exclusivas e podem operar de maneira complementar, especialmente quando se trata das necessidades de nitrogênio do solo e da cultura. Em um cenário em que já se observa a necessidade e o empenho no desenvolvimento do país como um grande produtor de fertilizantes, o Brasil, como potência alimentar, energética e ambiental, está apto a progredir em ambas as direções.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAS, C.; CHAVES, N.; HURTADO, M. R.; LIMA, L. G.; LOPES, D.; PANIK, M. S.; PINKOWSKI, A.; ROSSI, J. A. D. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde**. Câmara de Indústria e Comércio Brasil-Alemanha do Rio de Janeiro, 27 out. 2021.

BUENO, O. C.; JUNIOR, A. A. M. Participação da Energia Fóssil na Produção dos Fertilizantes Industriais Nitrogenados com Ênfase na Ureia. **Revista Energia na Agricultura**, v. 30, n. 4, p. 442-447, 2015.

BRANDÃO, L. E. T.; OZORIO, L. M.; PINTO, C. L. B; RODRIGUES, R. B. Opção de Troca de Produto na Indústria de Fertilizantes. **Revista Administração**, v. 50, n. 2, p. 129-140, 2015.

BRASIL. Decreto-Lei nº 4954, de 14 de janeiro de 2004. **Dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura**. Brasília, DF: Presidência da República, 2004. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2004-2006/2004/Decreto/D4954.htm#ementa](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D4954.htm#ementa). Acesso em: 4 de jan. de 2024.

\_\_\_\_\_. Decreto-Lei nº 8384, de 29 de dezembro de 2014. **Altera o Anexo ao Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que aprova o Regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura**. Brasília, DF: Presidência da República, 2014. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2014/decreto/D8384.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2014/decreto/D8384.htm). Acesso em: 4 de jan. de 2024.

\_\_\_\_\_. Decreto-Lei nº 10375, de 26 de maio de 2020. **Institui o Programa Nacional de Bioinsumos e o Conselho Estratégico do Programa Nacional de Bioinsumos**. Brasília, DF: Presidência da República, 2020a. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2020/decreto/D10375.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10375.htm) . Acesso em: 4 de jan. de 2024.

\_\_\_\_\_. **Estudo Estratégico: Produção Nacional de Fertilizantes.** Governo Brasileiro – Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos, 2 jul. 2020b. Disponível em: <[https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae\\_publicacao\\_fertilizantes\\_v10.pdf](https://www.gov.br/planalto/pt-br/assuntos/assuntos-estrategicos/documentos/estudos-estrategicos/sae_publicacao_fertilizantes_v10.pdf)>.

\_\_\_\_\_. Plano Nacional de Fertilizantes 2050: Uma Estratégia para os Fertilizantes no Brasil. Brasília, DF: Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos, 2022. 195 p. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2022/03/plano-nacional-de-fertilizantes-brasil-2050.pdf>. Acesso em 5 de jan. de 2024.

CANÁRIO, P. **Como o Brasil conseguiu destruir sua própria indústria de fertilizantes.** Bloomberg Línea, 17 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.bloomberglinea.com.br/2022/03/17/como-o-brasil-conseguiu-destruir-sua-propria-industria-de-fertilizantes/>> Acesso em: 7 jan. 2024.

CELLA, D.; ROSSI, M. C. L. Análise do Mercado de Fertilizantes no Brasil. **Revista Interface Tecnológica.** São Paulo. v.7, p.41–50, 2010.

CEPEA. PIB-AGRO/CEPEA: PIB do agro cresce 8,36% em 2021; participação no PIB brasileiro chega a 27,4%. **Cepea Esalq USP**, 16 mar. 2022. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/releases/pib-agro-cepea-pib-do-agro-cresce-8-36-em-2021-participacao-no-pib-brasileiro-chega-a-27-4.aspx#:~:text=Diante%20do%20bom%20desempenho%20do,52%2C63%25%2C%20respectivamente>. Acesso em: 7 jan. 2024.

CFQ. Conselho Federal de Química. **Químicos Criam Biofertilizante Vegetal Nanotecnológico.** 2021. Disponível em: <<https://cfq.org.br/noticia/quimicos-criam-biofertilizante-vegetal-nanotecnologico/>>. Acesso em: 7 de jan. de 2024.

CHINDA, R. C. **Simulação da Seção de Síntese de uma Unidade de Produção de Ureia – Processo Stamicarbon.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. p. 129, 2015.

CNA. Demanda mundial de fertilizantes chega a 182 milhões de toneladas. 3 out. 2017. Disponível em: <https://cnabrasil.org.br/noticias/demanda-mundial-de-fertilizantes-chega-a-182-milh%C3%B5es-de-toneladas>. Acesso em: 7 jan 2024.

DA CUNHA, A. L. C. **Fertilizantes: Processos de Produção de Fertilizantes Fosfatados**. Rio de Janeiro: Notas de Aula da Disciplina de Processos Inorgânicos – EQ UFRJ, 11p. 2020a.

\_\_\_\_\_. **Fertilizantes: Processos de Produção de Fertilizantes Nitrogenados** – Parte 1. Rio de Janeiro: Notas de Aula da Disciplina de Processos Inorgânicos – EQ UFRJ, 34 p. 2020b.

DIAS, V. P.; FERNANDES, E. Fertilizantes: Uma Visão Global Sintética. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 24, p. 97-138, set. 2006.

EICHHORN, S. E.; EVERT, R. F.; RAVEN, P. H. **Biologia Vegetal**. 8ª ed. Rio de Janeiro. Guanabara Koogan, 2014. 1637 p.

EMBRAPA. **Nanotecnologia**. 2009. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-nanotecnologia/nota-tecnica>. Acesso em: 4 de jan. de 2024.

\_\_\_\_\_. **Arbolina**. 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/8046/arbolina>>. Acesso em 5 de jan. de 2024.

\_\_\_\_\_. **Nutrientes para a Agricultura: Condicionantes e Tendências do Uso de Fertilizantes no Brasil**. Brasília, DF. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/visao-de-futuro/intensificacao-tecnologica-e-concentracao-da-producao/sinal-e-tendencia/nutrientes-para-agricultura-condicionantes-e-tendencias-do-uso-de-fertilizantes-no-brasil>> Acesso em: 4 de jan. de 2024.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 7 jan 2024.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Banco de dados 2019 a 2022. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#home>>. Acesso em: 7 jan 2024.

FILHO, C. R. S. **Síntese de Ureia Enriquecida com Isótopo  $^{13}\text{C}$  e/ou  $^{15}\text{N}$** . Tese (Doutorado-Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de concentração: Química na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba, p. 155, 2011.

FREITAS, L. S.; MARQUES, J. J.; RAMOS, A. L. D.; SANTOS, R. G. V. M.; SANTOS, V.; SOUZA, M. M. V. M. S. Atual Estágio de Desenvolvimento da Tecnologia GTL e Perspectivas para o Brasil. **Revista Química Nova**, v. 34, n. 10, p. 1704-1716, 2011.

FREUA, S. GHIRALDELLI, G. **Importação de fertilizantes pelo Brasil aumenta 440% de 1998 a 2021**. CNN Brasil, 8 jun. 2022. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/economia/importacao-de-fertilizantes-pelo-brasil-aumenta-440-de-1998-a-2021/>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**, 4ª ed. São Paulo: Atlas, 176 p. 2002

GLAUBER, J.; LABORDE, D. How sanctions on Russia and Belarus are impacting exports of agricultural products and fertilizer. **International Food Policy Research Institute (IFPRI)**, 9 nov. 2022. Disponível em: <<https://www.ifpri.org/blog/how-sanctions-russia-and-belarus-are-impacting-exports-agricultural-products-and-fertilizer>>. Acesso em: 7 jan 2024.

GLOBAL FERT. **Inundações na China atingem a indústria de fertilizantes**. 26 ago. 2020. Disponível em: <<https://globalfert.com.br/noticias/mercado/inundacoes-na-china-atingem-a-industria-de-fertilizantes/>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

GOVERNMENT OF CANADA. **Discussion document: Reducing emissions arising from the application of fertilizer in Canada's agriculture sector**. 10 abr. 2022. Disponível em: <<https://agriculture.canada.ca/en/department/transparency/public-opinion-research-consultations/share-ideas-fertilizer-emissions-reduction-target/discussion>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

GRO INTELLIGENCE. **Russia Extends and Tightens Fertilizer Export Quotas Through May 2023**. 23 dez. 2022. Disponível em: <<https://www.gro-intelligence.com/insights/russia-extends-and-tightens-fertilizer-export-quotas-through-may-2023>>. Acesso em: 7 jan 2024.

GUARALDO, M. Brasil é o quarto maior produtor de grãos e o maior exportador de carne bovina do mundo, diz estudo. **EMBRAPA**, 1 jun. 2021. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62619259/brasil-e-o-quarto-maior-produtor-de-graos-e-o-maior-exportador-de-carne-bovina-do-mundo-diz-estudo>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

HKTDC. **China Announces 2021 Fertiliser Import Tariff Quotas and Application Procedures.** 11 nov. 2020. Disponível em: <<https://research.hktdc.com/en/article/NTgxNjkwMjEx>>. Acesso em: 7 jan 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017: Resultados Definitivos.** Rio de Janeiro, v. 8, p. 105, 2019.

IBP. Instituto Brasileiro de Petróleo. **Maiores produtores mundiais de gás natural em 2021.** Julho 2022. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/maiores-produtores-mundias-de-gas-natural-em-2020/>>. Acesso em: 7 jan 2024.

KARDÁS, S. **Conscious uncoupling: Europeans' Russian gas challenge in 2023.** European Council on Foreign Relations (ECFR). 13 feb 2023. Disponível em: <<https://ecfr.eu/article/conscious-uncoupling-europeans-russian-gas-challenge-in-2023/>> Acesso em 7 jan. 2024.

KPMG. Krilltech crowned the 2021 Global Tech Innovator winner. 2021. Disponível em: <<https://kpmg.com/xx/en/home/insights/2021/03/kpmg-private-enterprise-global-tech-innovator.html>>. Acesso em: 5 de jan. de 2024.

KULAIF, Y. **A nova configuração da indústria de fertilizantes fosfatados no Brasil.** Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 1999. 244p.

LARKIN, N.; SPENCE. E. **Rússia reafirma corte de gás para a Europa e commodities sentem o baque.** EXAME Agro. 5 set. 2022. Disponível em: <<https://exame.com/agro/russia-reafirma-corte-de-gas-para-a-europa-e-commodities-sentem-o-baque/>>. Acesso em: 7 jan. 2024

LEÃO, R. **Com aumento da disponibilidade, uso do gás natural é desafio estratégico.** 17 jan. 2020. Disponível em: <<https://editorabrasilenergia.com.br/com-aumento-da-disponibilidade-uso-do-gas-natural-e-desafio-estrategico/>>. Acesso em: 7 jan 2024.

LEMOS, J. C. L. J. **Concentrações de Arbolina no Desenvolvimento de Alface (*Lactuca sativa L.*) Baby.** Monografia (Bacharelado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. Brasília. p.39. nov. 2021.

LINS, F. A; LUZ, A. **Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações.** 2ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990p.

LOPES, A. S. **Guia de Fertilidade do Solo.** 3ª ed. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2003.

LOPES, A. S.; SILVA, D. R. G.; **Princípios Básicos para Formulação e Mistura de Fertilizantes.** Boletim Técnico- nº 89, UFLA, p. 1-46, 2012.

MAPA. Ministério da Agricultura e Pecuária. **Ministra diz que Brasil tem fertilizantes suficientes até o início da próxima safra, em outubro.** 31 out. 2022 Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/ministra-diz-que-brasil-tem-fertilizantes-suficientes>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

\_\_\_\_\_. Ministério da Agricultura e Pecuária. **O Plano Nacional de Fertilizantes.** 3 mai. 2022b Disponível em: < <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/o-plano-nacional-de-fertilizantes>>. Acesso em: 7 jan. 2024

MARIANI, T. Consequences for European food security of a total ban on Belarusian potash imports. **European Parliament,** 19 abr. 2023. Disponível em: <[https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-9-2023-001273\\_EN.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/E-9-2023-001273_EN.html)>. Acesso em: 7 jan. 2024.

MARTINS, A. L. S.; SOARES, E. C. **Ensino de eletrólise: sequência didática. Uma proposta de sequência didática para o ensino de eletrólise na educação básica.** Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências Naturais). Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Cuiabá-MT. 39 p. 2017.

MATTIAZZO, M. E.; PIRES, A. M. M. Avaliação da Viabilidade do Uso de Resíduos na Agricultura. **Circular Técnica Embrapa**, Jaguariúna, n. 19, p. 9, nov. 2008.

NOVAES, F. **Mercado de fertilizantes com o economista Flavio Novaes de Abu Dhabi!**. Youtube, 28 mai. 2021. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=o3bTzrXnbj4&list=PL19MLgYPGYXrkaI9iyndRWPD3\\_rtkWL4&index=3](https://www.youtube.com/watch?v=o3bTzrXnbj4&list=PL19MLgYPGYXrkaI9iyndRWPD3_rtkWL4&index=3)>. Acesso em: 7 jan. 2024.

OLIVEIRA, R. C. **Panorama do Hidrogênio no Brasil.** Instituto de Pesquisa Aplicada- IPEA, Brasília- DF. ago. 2022.

ONU. Organização das Nações Unidas. **População mundial deve chegar a 9,7 bilhões de pessoas em 2050, diz relatório da ONU.** Nações Unidas Brasil, 17 jun. 2019. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/83427-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-deve-chegar-97-bilh%C3%B5es-de-pessoas-em-2050-diz-relat%C3%B3rio-da-onu>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

\_\_\_\_\_. **Crise de fertilizantes arrasta metade do mundo para insegurança alimentar.** 14 dez. 2022. **Nações Unidas Brasil** Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2022/12/1806712#:~:text=A%20causa%20C3%A9%20a%20crise,199%25%20desde%20maio%20de%202020.&text=A%20disparada%20de%20alimentos%2C%20combust%C3%ADveis,tamb%C3%A9m%20fomenta%20as%20tens%C3%B5es%20socioecon%C3%B4micas>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

PEREIRA, M. G.; STAFANATO, J. B.; ZONTA, E. Fertilizantes Minerais, Orgânicos e Organominerais. *In*: BORGES, Ana L. **Recomendações de Calagem e Adubação para Abacaxi, Acerola, Banana, Citros, Mamão, Mandioca, Manga e Maracujá.** 2. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2021, pg. 263-303.

PIRES, C. **Desenvolvido na UnB, Unicórnio Brasileiro tem Potencial para Revolucionar o Agronegócio**. UNB. 2020. Disponível em: <<https://noticias.unb.br/117-pesquisa/4628-desenvolvido-na-unb-unicornio-brasileiro-tem-potencial-para-revolucionar-agronegocio>>.

Acesso em 5 de jan. de 2024.

PRECEDENCE RESEARCH. **Agriculture Fertilizers Market (By Form: Solid, Liquid, By Nature, Inorganic, Organic; By Product: Nitrogenous, Phosphatic, Potash, Secondary Micronutrient, Micronutrient, Others) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2023 -2032**. Dez. 2023. Disponível em: <<https://www.precedenceresearch.com/agriculture-fertilizers-market>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

REETZ, H. F. **Fertilizantes e seu Uso Eficiente**. Tradução de A.S. Lopes. São Paulo: ANDA, 2017. 178 p.

RIBEIRO, D. Processo de Haber-Bosch. **Revista Ciência Elementar**, v. 1, p. 68-69, 2013.

RIBEIRO, P. H. **Contribuição ao Banco de Dados Brasileiro para o Apoio à Avaliação do Ciclo de Vida: Fertilizantes Nitrogenados**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 375. 2009.

ROMANELLO, M. **Fertilizantes: Formação de preços, cenário atual e perspectivas do mercado (Safras & Mercado)**. Youtube, 15 ago. 2022. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=fjk6c5Y1ZxU&t=1038s>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

SHELL. **Shell e INPA Investem em Nanobiotecnologia para Recuperar Áreas Degradadas da Amazônia**. 2023. Disponível em: <<https://www.shell.com.br/imprensa/press-releases-2023/shell-e-inpa-investem-em-nanobiotecnologia-para-recuperar-areas-degradadas-da-amazonia.html>>. Acesso em: 5 de jan. de 2024.

SOUZA, J. A. B. **Uso de Bioestimulantes e Fitorreguladores na Cultura do Morangueiro**. Dissertação (Mestrado Profissional em Oleicultura) – Instituto Federal Goiano, Morrinhos- GO. p. 45, 2023.

SOUZA, V. **Recordes no agronegócio e aumento da fome no Brasil: como isso pode acontecer ao mesmo tempo.** G1. 11 ago. 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2021/08/11/recordes-no-agronegocio-e-aumento-da-fome-no-brasil-como-isso-pode-acontecer-ao-mesmo-tempo.ghtml>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

STATISTA. **Production of fertilizers worldwide from 2005 to 2021, by nutrient.** 23 jul. 2023. Disponível em:< <https://www.statista.com/statistics/1290786/global-fertilizer-production-by-nutrient/>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

TRADE. **International Trade Administration. Final Determination in the Countervailing Duty Investigations of Phosphate Fertilizers from Morocco and Russia.** 9 fev. 2021. Disponível em: <<https://www.trade.gov/faq/final-determinations-countervailing-duty-investigations-phosphate-fertilizers-morocco-and>>. Acesso em: 25 Jan. 2024.

TRAGE, D. R. **Estudo do Mercado de Fertilizantes no Brasil por meio de Previsões Estatísticas.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, p. 132. 2019.