



Armazenamento Mineralizado de CO₂: Avanços, Desafios e Estratégias para Mitigação Sustentável

Maria Clara V. Silva¹; Janiele A. E. R. Galvão¹; Dennys C. da Silva¹; Gregory Vinicius B. de Oliveira¹; José Luís C. Fonseca¹; Alcides de O. W. Neto¹

*1 Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Clara.vitaliano.710@ufrn.edu.br*

Palavras-Chave: Mitigação das mudanças climáticas, Dióxido de carbono, Mineralização

Introdução

O crescimento industrial e a intensificação das atividades produtivas têm aumentado o acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera, contribuindo para um aumento progressivo na temperatura média global (Mitra et al., 2016). Esse fenômeno impacta diretamente operações industriais, cadeias produtivas e o equilíbrio climático, indispensável para a sustentabilidade de diversos setores (Murshed et al., 2022). A intensificação do efeito estufa apresenta desafios estratégicos significativos para as indústrias, exigindo a adoção de tecnologias e processos inovadores e sustentáveis para mitigar emissões e assegurar a continuidade operacional em um ambiente marcado por crescentes instabilidades ambientais (Montero et al., 2024).

Entre os gases de efeito estufa, o dióxido de carbono (CO₂) destaca-se por sua contribuição significativa para o aquecimento global. A queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural, é a principal fonte de emissão (Daramola et al., 2020), sendo responsável por grandes volumes liberados em processos industriais, geração de energia e transporte (Rissman et al., 2020). Embora tenha aplicações industriais, como solvente em processos supercríticos e na carbonatação de bebidas, seu uso representa apenas uma fração das emissões totais (Braga et al., 2023). Assim, torna-se crucial avançar em estratégias que envolvam redução das emissões e tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) (Silva, 2021).

Uma alternativa promissora para a mitigação das emissões de dióxido de carbono é a mineralização, um processo que se destaca pelo seu potencial de oferecer uma solução permanente para o armazenamento deste gás (Kumar et al., 2024). Esse método consiste no armazenamento do gás carbônico em reservatórios geológicos que já não estão em uso, como antigos campos de petróleo e gás natural. Quando o gás é injetado, ele reage com os minerais das rochas, formando compostos estáveis que impedem seu retorno à atmosfera. Por exemplo, o CO₂ pode se combinar com cálcio e magnésio presentes nas rochas (Bshir et al., 2024). Essas reações entre o gás e os minerais da rocha resultam na formação de compostos carbonatados estáveis, como carbonatos de cálcio, magnésio e ferro, que possuem alta estabilidade e são capazes de imobilizar o carbono de forma segura por períodos extremamente longos (Wang et al., 2024). Como a mineralização transforma o dióxido de carbono em compostos carbonatados sólidos e estáveis, ela é considerada uma das estratégias mais seguras e duradouras para o armazenamento de carbono (Zhong et al., 2022).

Apesar dessas vantagens, o processo é naturalmente lento, pois depende da reatividade dos minerais presentes no reservatório, o que pode limitar sua aplicação em alguns contextos industriais (Kovscek et al., 2022). Por exemplo, em setores que emitem grandes volumes de

CO₂ continuamente, como usinas termelétricas a carvão, a mineralização pode não ser rápida o suficiente para capturar e armazenar todo o dióxido de carbono gerado, exigindo a combinação com outras tecnologias de captura e armazenamento (Howaniec et al., 2022). Em locais ricos em minerais altamente reativos, como magnésio e ferro, a velocidade do processo pode ser significativamente aumentada, tornando a técnica mais eficaz e viável economicamente (Osman et al., 2022). Para tornar esse método mais eficiente e acelerar o processo de mineralização, é fundamental controlar três fatores principais: pressão, temperatura e composição mineralógica do reservatório (Cheng et al., 2023).

A pressão e a temperatura influenciam a velocidade das reações químicas entre o CO₂ e os minerais, enquanto a composição mineralógica determina a capacidade do reservatório de transformar o gás em compostos sólidos estáveis (Hamza et al., 2023). Um controle preciso dessas variáveis pode aumentar a taxa de conversão do CO₂, tornando o armazenamento mais rápido e eficaz. Esses fatores são determinantes para acelerar as reações químicas e garantir a formação dos compostos carbonatados desejados (Wood et al., 2023). Além disso, a escolha criteriosa do local de armazenamento é essencial para aumentar a eficiência do processo e reduzir custos operacionais. A mineralização apresenta, portanto, um grande potencial para mitigar o acúmulo de CO₂ na atmosfera, contribuindo diretamente para a mitigação das mudanças climáticas (Raza et al., 2021).

Este trabalho de revisão é de grande relevância por fornecer um panorama abrangente sobre os avanços e desafios da mineralização de CO₂, explorando fatores críticos que influenciam a eficácia desse processo e propondo estratégias para otimizar seu uso em escala industrial. Ao sintetizar os conhecimentos mais recentes, este estudo oferece subsídios valiosos para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes de captura e armazenamento de carbono, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a mitigação das mudanças climáticas.

Material e Métodos

A metodologia adotada consistiu em uma revisão bibliográfica realizada nas bases de dados acadêmicas ScienceDirect e Google Scholar, abrangendo o período de 2020 a 2025. Foram utilizadas as palavras-chave “CO₂ mineralization”, “carbon capture and storage (CCS)” e “CO₂ sequestration” para localizar artigos científicos, revisões e relatórios técnicos relacionados ao tema.

Os artigos selecionados foram escolhidos com base em critérios de relevância, priorizando estudos que apresentavam técnicas promissoras para a mineralização do CO₂, especialmente aquelas aplicáveis a reservatórios geológicos inativos. Consideraram-se ainda as condições ideais para potencializar o processo, como pressão, temperatura e a capacidade de mineralização dos reservatórios. Foram excluídos trabalhos duplicados, com abordagem superficial ou que não apresentassem dados técnicos aplicáveis.

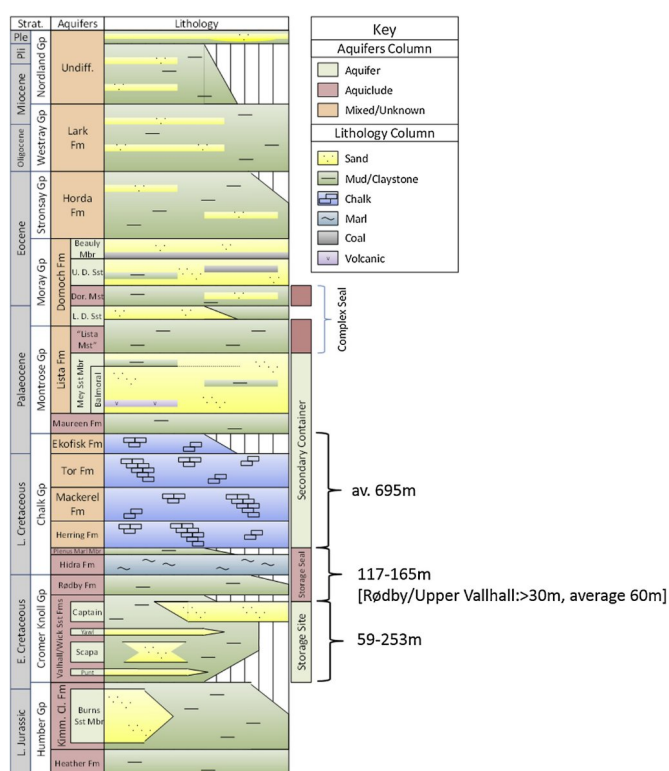
Também foram analisados os minerais presentes nos reservatórios que poderiam maximizar a eficiência do processo. A análise dos dados obtidos foi orientada por parâmetros como: (i) condições operacionais (pressão e temperatura), (ii) concentração e tipos de minerais envolvidos, (iii) eficiência da técnica de mineralização, e (iv) mecanismos de formação dos compostos carbonatados. Essa abordagem permitiu uma compreensão ampla e sistemática do método de mineralização do CO₂, destacando variáveis críticas, determinando limites mínimos

e máximos para os parâmetros operacionais e subsidiando as considerações com base nos achados mais relevantes da literatura.

Resultados e Discussão

O estudo de Wentinck *et al.* (2020) analisou as interações entre CO₂, água e rochas, destacando como essas interações podem afetar a integridade das formações geológicas e representar riscos ao armazenamento seguro de CO₂, incluindo possíveis vazamentos. A pesquisa enfatizou a necessidade de considerar condições específicas de cada local de armazenamento e avaliar as barreiras naturais capazes de mitigar problemas de vedação. No projeto Peterhead CCS, quatro fatores de risco foram identificados para a integridade do selo geológico, como a presença de esmectita e falhas preexistentes. A análise de salvaguardas apontou que a reativação de falhas é improvável, sugerindo um alto nível de segurança para o armazenamento de CO₂. A Figura 1 apresenta a análise estratigráfica detalhada das formações geológicas e suas respectivas espessuras, ilustrando as camadas que atuam como reservatório e selo para o CO₂.

Figura 1 - Complexo de armazenamento composto por local de armazenamento, selo de armazenamento, contêiner secundário e selo complexo.

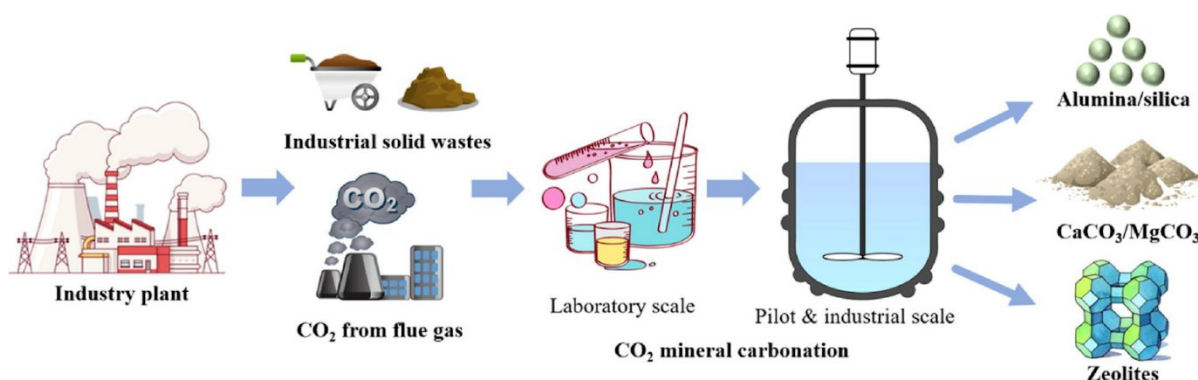


Fonte: Wentinck *et al.* (2020, p. 3).

Liu *et al.* (2021) investigaram a carbonatação mineral como alternativa promissora para mitigar o aquecimento global, especialmente com o uso de resíduos sólidos industriais como matéria-prima. Os processos de carbonatação mineral foram classificados em diretos e indiretos. Na abordagem direta, minerais ou suspensões aquosas reagem diretamente com CO₂ gasoso, enquanto na abordagem indireta, cálcio (Ca) ou magnésio (Mg) são extraídos dos minerais em condições ácidas e, posteriormente, submetidos à carbonatação em ambiente alcalino. A abordagem indireta destacou-se pela maior eficiência e condições operacionais

mais suaves, dispensando altas temperaturas e pressões, além de gerar subprodutos mais puros. A Figura 2 ilustra a formação de carbonato de cálcio através de resíduos sólidos industriais. O estudo também abordou o uso de resíduos industriais, evidenciando que cinzas volantes de carvão, apesar da alta produção global, possuem baixo teor de óxido de cálcio (CaO), o que limita a eficiência da carbonatação mineral. Em contrapartida, as escórias de siderurgia, com produção de cerca de 630 milhões de toneladas, são mais apropriadas devido à maior concentração de óxidos de cálcio e magnésio. Concluiu-se que a carbonatação indireta é mais eficiente e oferece maior potencial para o aproveitamento de resíduos industriais.

Figura 2 – Formação de carbonato de cálcio através de resíduos sólidos industriais.



Fonte: Liu *et al.* (2021, p. 1)

Pichetwanit *et al.* (2021) analisaram o uso de surfactantes não iônicos e catiônicos como aditivos em soluções de monoetanolamina (MEA) para melhorar a captura de CO₂. Os surfactantes reduziram a tensão superficial do MEA, maximizando a área de contato para absorção de CO₂ em materiais sólidos de embalagem (aço, aço inoxidável e alumínio). Apesar de aumentarem ligeiramente a viscosidade, não impactaram significativamente a capacidade ou taxa de absorção de CO₂. Surfactantes catiônicos, como o DTAB, aumentaram a capacidade de carga e a taxa de absorção de CO₂, sendo promissores para soluções de MEA.

Huan *et al.* (2024) conduziram uma análise detalhada das técnicas de mineralização de CO₂, classificando-as em mineralização *in situ* e *ex situ*. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi utilizada para quantificar recursos consumidos, consumo energético e emissões ambientais, abrangendo extração, transporte, processamento, reciclagem e manutenção. Os cálculos mostraram que cerca de 70% do CO₂ injetado se mineraliza na zona entre poços de injeção e produção. A acidez elevada do fluido injetado favoreceu a dissolução de basalto, aumentando a eficiência da mineralização. Esses resultados reforçam a importância de ajustes operacionais para otimizar a captura e o armazenamento de CO₂.

Mohammed *et al.* (2024) estudaram a formação de precipitados de carbonato de cálcio na presença do agente quelante EDTA, sob diferentes condições de temperatura (30, 50 e 80 °C) e pressão (50 a 1500 psi). A formação de precipitados não foi detectada a 30 e 50 °C, enquanto a 80 °C o fenômeno foi observado, evidenciando o papel da temperatura como variável crítica. A pressão elevada aumentou a quantidade de precipitados formados, e a temperatura mínima para precipitação foi de 80 °C, enquanto a pressão mínima necessária foi de 500 psi.

Tapanya *et al.* (2024) analisaram o impacto da temperatura no armazenamento de CO₂ por meio de simulações numéricas usando o simulador GEM, da Computer Modelling Group (CMG). O estudo focou na formação Tr1, detalhada na Tabela 1, com propriedades específicas de porosidade e permeabilidade. A injeção de CO₂ foi realizada no centro do reservatório, a

profundidades entre 2633 e 2670 metros, e os limites do reservatório foram considerados fechados para simplificação da modelagem.

Tabela 1 – Propriedades do Reservatório usadas no estudo de simulação.

Propriedades	Valor
Porosidade (%)	1,95
Permeabilidade (mD)	1.357
Profundidade máxima (m)	2300
Pressão do reservatório (Mpa) na profundidade superior	22,93
Temperatura do reservatório (°C) na profundidade superior	60,25
Compressibilidade do reservatório (Mpa ⁻¹)	2.76x10 ⁻⁵

Fonte: Adaptado de Tapanya *et al.* (2024).

Zhang *et al.* (2025) avaliaram que profundidades superiores a 800 m são necessárias para o armazenamento geológico eficaz de CO₂, onde a pressão ($\geq 7,4$ MPa) e a temperatura ($\geq 304,35$ K) mantêm o gás em estado supercrítico, facilitando o aprisionamento estrutural. As características do CO₂, dos fluidos do reservatório e da rocha influenciam diretamente a capacidade de armazenamento, enquanto a composição química da salmoura e a heterogeneidade do reservatório também impactam significativamente a eficiência do processo.

Conclusões

Com base na análise sistemática da literatura especializada, conduzida a partir de critérios definidos de seleção e avaliação dos estudos, identificou-se que a técnica de mineralização do CO₂ apresenta um potencial significativo para a formação de compostos carbonatados estáveis termodinamicamente em reservatórios geológicos. A revisão da literatura permitiu alinhar os principais parâmetros operacionais que influenciam o processo, como a composição mineralógica do reservatório, a pressão e a temperatura, fatores essenciais para otimizar a eficiência da técnica e garantir sua viabilidade econômica e ambiental em larga escala. Os avanços tecnológicos no entendimento do processo, assim como os desafios encontrados na literatura, indicam que, embora o método ainda esteja em fase de desenvolvimento, ele oferece vantagens, como a permanência do CO₂ em formas químicas estáveis e a possibilidade de utilizar reservatórios geológicos inativos. Assim, o foco do artigo foi alinhar a proposição de parâmetros de análise de exequibilidade, o que reforça a importância de se investir em pesquisas que ampliem o conhecimento sobre as condições ideais de operação e as melhorias tecnológicas necessárias. Com um entendimento consolidado dos mecanismos e das variáveis envolvidas, a implementação em larga escala do armazenamento de CO₂ por mineralização torna-se cada vez mais viável.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Tecnologia de Tensoativos e Processos de Separação (LTT/IQ) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pelo suporte



técnico e infraestrutura disponibilizados para a realização deste trabalho. Agradecem também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

BUSCH, A.; HANGX, S. J. T.; MARSHALL, J. D.; WENTINCK, H. M. Swelling clay minerals and containment risk assessment for the storage seal of the Peterhead CCS project. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 94, 102924, 2020.

HUAN, Qun; WIBOWO, Haryo; YAN, Mi; SONG, Min. A review of CO₂ mineral storage: Current processes, typical applications, and life cycle assessment. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, 12 (6), 114785, 2024.

LIU, Weizao; TENG, Liumei; ROHANI, Sohrab; QIN, Zhifeng; ZHAO, Bin; XU, Chunbao Charles; REN, Shan; LIU, Qingcai; LIANG, Bin. CO₂ mineral carbonation using industrial solid wastes: A review of recent developments. **Chemical Engineering Journal**, 416, 129093, 2021.

MOHAMMED, Isah; MAHMOUD, Mohamed; AL SHEHRI, Dhafer; BELLO, Abdulwahab. Production of colloidally stable calcium carbonate precipitates to enhance CO₂ subsurface storage through mineralization. **Journal of CO₂ Utilization**, 243, 213339, 2024.

MORI, Shunsuke; MIYAJI, Keisuke; KAMEGAI, Kazuhisa. CCS, Nuclear Power and Biomass: An Assessment of Option Triangle under Global Warming Mitigation Policy by an Integrated Assessment Model MARIA-23. **Energy Procedia**, 37, 7474-7483, 2013.

PICHETWANIT, Panatda; KUNGSANANT, Suratsawadee; SUPAP, Teeradet. Effects of surfactant type and structure on properties of amines for carbon dioxide capture. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 622, 126602, 2021.

RAMADHAN, Romal; TAPANYA, Chetsada; AKAMINE, Thakheru; LEELASUKSEREE, Cheowchan; TANGPARITKUL, Suparit. CO₂ trapping dynamics in tight sandstone: Insights into trapping mechanisms in Mae Moh's reservoir. **Journal of Environmental Management**, 370, 122442, 2024.

ZHANG, Haiyang; ARIF, Muhammad. Optimum formation depths for CO₂ structural trapping: Impact of salinity. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 10 (2), 416-424, 2025.