

MINERALIZAÇÃO DE CARBONO COMO NOVA FRONTEIRA DAS ROTAS DE CCS

Elaboração:



Uma solução que transforma um processo natural em oportunidade

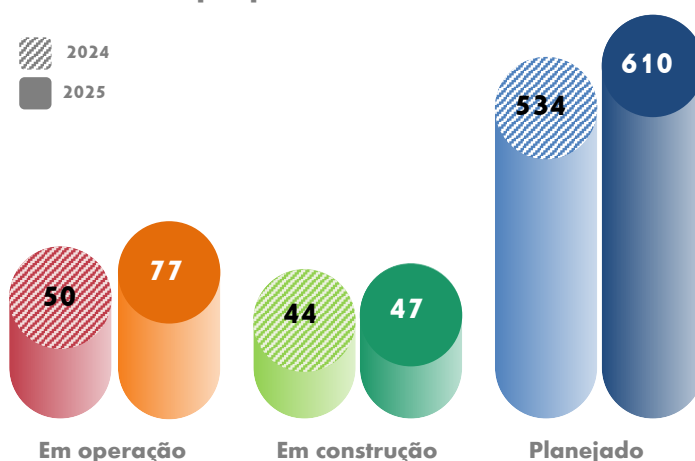
FS-EPE-DPG-SPG_02-2026

Ao longo das últimas décadas, as atividades de captura e armazenamento de carbono (CCS – *Carbon Capture and Storage*) têm sido crescentemente reconhecidas como instrumentos estratégicos para a transição energética global, sendo consideradas necessárias e tecnologicamente viáveis por diversos países. A recuperação avançada de petróleo com dióxido de carbono (CO₂) (do inglês, *Enhanced Oil Recovery – EOR*) vem sendo empregada nos Estados Unidos e no Canadá desde a década de 1960 como meio de aumentar a produção de campos petrolíferos maduros. Em 1972, essa técnica alcançou sua primeira aplicação em larga escala no mundo com o início do projeto *Scurry Area Canyon Reef Operating Committee* (SACROC), no estado do Texas, Estados Unidos.

Na década de 1990, houve um novo marco na história das atividades de CCS com o início, em 1996, do primeiro grande projeto CCS focado apenas na redução das emissões de carbono e não no aumento da produção de hidrocarbonetos, o projeto *Sleipner*, no Mar do Norte, na Noruega. Desde então, o avanço tecnológico, o aumento da preocupação com a mudança do clima e o amadurecimento dos marcos regulatórios em diferentes países têm impulsionado a expansão e a diversificação dos projetos de CCS em escala global.

Embora sua implementação seja gradual, o CCS vem passando, nos últimos anos, por uma fase de expansão significativamente acelerada. Segundo o *Global CCS Institute* (GCCSI, 2025), o número de instalações comerciais (soma do número de projetos operacionais, em construção e planejados) passou de 628 em 2024 para 734 em 2025, com unidades em operação aumentando de 50 para 77, o que elevou a capacidade global de captura em 23% em apenas um ano, alcançando cerca de 64 MtCO₂/ano de capacidade já instalada.

Número de projetos de CCS no mundo



Fonte: GCCSI (2025)

Tipos de armazenamento nos projetos em operação



Fonte: Adaptado de GCCSI (2025)

De acordo com o *Global CCS Institute* (GCCSI, 2025), há mais projetos em operação que armazenam carbono por meio de EOR e em reservatórios salinos do que projetos que armazenam CO₂ em campos de hidrocarbonetos depletados e por meio do processo de mineralização de carbono.

Este documento apresenta o processo de CCS por mineralização de carbono, demonstrando sua viabilidade e vantagens em escala global e nacional. O presente trabalho dá continuidade à série de publicações da EPE dedicadas ao tema CCS, sendo este o terceiro *fact sheet* sobre o tema. Os *fact sheets* já publicados incluem:



CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO: Um breve guia sobre uma das alternativas-chave para a transformação do setor de óleo e gás no Brasil (EPE, 2023)



RESERVATÓRIOS SALINOS: O que está por trás de um dos principais alvos para sítios de armazenamento de carbono? (EPE, 2024)

¹ Na lista do GCCSI, há a informação de que apenas o projeto CarbFix Storage armazena CO₂ por meio da mineralização de carbono. Entretanto, os projetos Climeworks Orca (Orca), Climeworks Mammoth (Mammoth) e Silverstone (Silverstone), que estão na lista, também fazem esse tipo de armazenamento. O projeto Silverstone é uma continuação do projeto CarbFix Storage e, portanto, os dois foram considerados como um projeto só. Além disso, o projeto Nesjavellir (Nesjavellir) foi considerado no gráfico, embora não conste na lista da GCCSI.

Por que olhar para a mineralização de CO₂?

No ciclo natural do carbono, o tempo de residência aumenta progressivamente entre os diferentes compartimentos da Terra ([Snaebjörnsdóttir et al., 2020](#)). Em termos quantitativos, a maior fração do carbono está armazenada na litosfera, encontrando-se predominantemente na forma de minerais que compõem rochas carbonáticas (ex: calcário), o que acaba evidenciando a estabilidade do armazenamento mineral de carbono e sendo uma excelente indicação do porquê esse sistema pode e deve ser investigado como opção de sumidouro do carbono a ser capturado pelos esforços que visam reduzir as emissões de fontes pontuais ou remover as emissões de CO₂ diretamente da atmosfera.

Apesar das rochas carbonáticas demorarem milhões de anos para se formar, o processo de cristalização de minerais pode ser acelerado através do emprego de tecnologias conhecidas.

Ciclo do Carbono: Tempo médio de residência

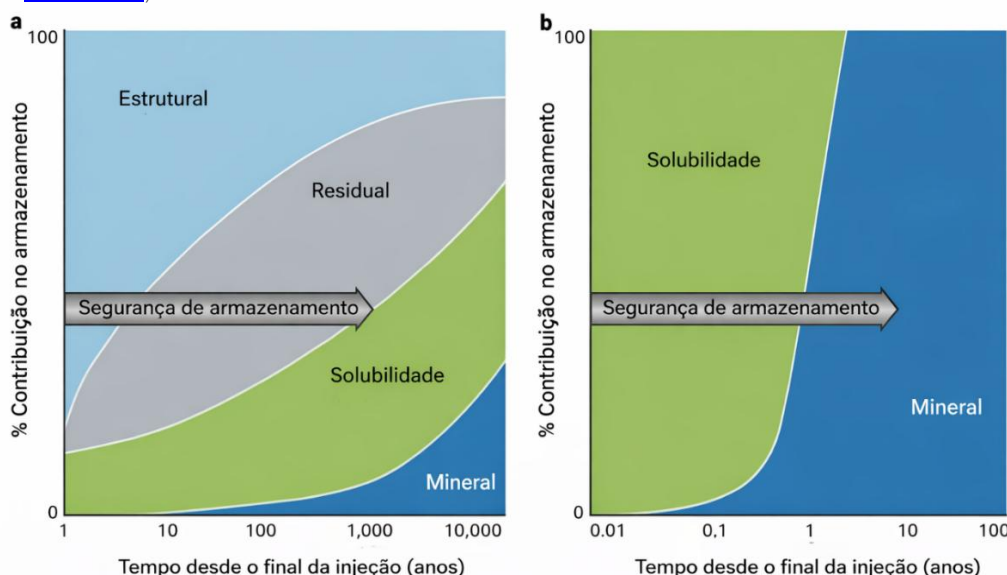


Mecanismos de trapeamento do CO₂

O CO₂ pode ser injetado em reservatórios geológico de duas maneiras distintas: puro ou dissolvido em água.

Quando injetado em sua **forma pura** (Figura a), inicialmente o dióxido de carbono é retido sob camadas de rochas impermeáveis, no chamado **trapeamento estrutural ou estratigráfico**. Com o tempo, parte do gás fica aprisionada em pequenos poros da rocha (**trapeamento residual**). À medida que o processo evolui, o CO₂ se dissolve gradualmente na água subterrânea (**trapeamento por solubilidade**) e, por fim, uma fração do carbono dissolvido reage com os minerais da rocha, formando novos minerais estáveis (**trapeamento mineral**). Esse conjunto de mecanismos torna o CO₂ progressivamente menos móvel, aumentando a segurança do armazenamento, embora a conversão mineral completa possa levar milhares de anos ou mais ([Benson et al., 2005](#)).

Por outro lado, quando o CO₂ é injetado **dissolvido em água** (Figura b), não há necessidade de aprisionamento sob rochas impermeáveis, uma vez que o fluido não é flutuante e não tende a migrar em direção à superfície. Após a injeção, o **trapeamento por solubilidade** ocorre de forma imediata, e o **trapeamento mineral** pode se concretizar em um intervalo de tempo significativamente curto, da ordem de poucos anos (menos de 10 anos) ([Snaebjörnsdóttir et al., 2020](#)).



Mecanismos de trapeamento ao (a) injetar o CO₂ puro e (b) ao injetar CO₂ dissolvido em água.

Figura retirada de [Orita e Cruz \(2022\)](#), modificada de [Snaebjörnsdóttir et al., 2020](#).

A possibilidade de **acelerar o trapeamento mineral** por meio da injeção de CO₂ dissolvido em água vem despertando interesse crescente. Nesse contexto, destaca-se que a **mineralização de carbono** apresenta desempenho particularmente elevado em reservatórios constituídos por rochas ígneas máficas e ultramáficas (Box 1).

O que são rochas ígneas máficas e ultramáficas?

Rochas ígneas máficas e ultramáficas são rochas ricas em minerais ferromagnesianos, como olivina, piroxênio e anfibólio, o que geralmente lhes confere cor escura e alta densidade. As rochas máficas possuem teor moderadamente baixo de sílica, enquanto as ultramáficas apresentam teores ainda menores e maior predominância de minerais ferromagnesianos.

Exemplo de rochas máficas



Exemplo de rochas ultramáficas



Imagens de
Britannica e
IGC – USP

Além de seu potencial para a mineralização de carbono, as rochas ígneas máficas e ultramáficas também são importantes fontes de minerais estratégicos, como níquel, cobalto, cromo e elementos do grupo da platina, amplamente utilizados em



BATERIAS



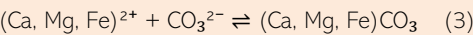
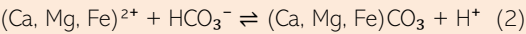
TECNOLOGIAS DE BAIXO CARBONO



APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

Por que rochas máficas e ultramáficas favorecem a mineralização do carbono?

Rochas ígneas máficas e ultramáficas - compostas predominantemente por minerais como piroxênio, plagioclásio, olivina e anfíbólio - apresentam elevada reatividade geoquímica com o dióxido de carbono dissolvido em água. Durante a interação rocha–fluido, esses minerais sofrem dissolução, liberando cátions divalentes (Ca²⁺, Mg²⁺ e Fe²⁺), que reagem com espécies carbonatadas do CO₂, resultando na formação de minerais carbonáticos estáveis. O elevado potencial dessas rochas para a conversão permanente do CO₂ injetado pode ser descrito de forma simplificada pelas reações de carbonatação:



Nesse processo, o CO₂ dissolvido forma ácido carbônico, que se dissocia em bicarbonato e carbonato (1). Os cátions liberados das rochas máficas e ultramáficas reagem com essas espécies (2 e 3), promovendo a precipitação de minerais carbonáticos, como calcita (CaCO₃), dolomita (CaMg(CO₃)₂), magnesita (MgCO₃) e siderita (FeCO₃) (Orita e Cruz (2022)).

A mineralização de carbono é particularmente eficiente em rochas máficas e ultramáficas porosas e reativas, com destaque para os basaltos. Essas rochas são as mais abundantes na crosta terrestre, ocorrendo em grandes volumes tanto em províncias basálticas continentais quanto, de forma ainda mais extensa, no assoalho oceânico.

Projetos em Andamento no Mundo

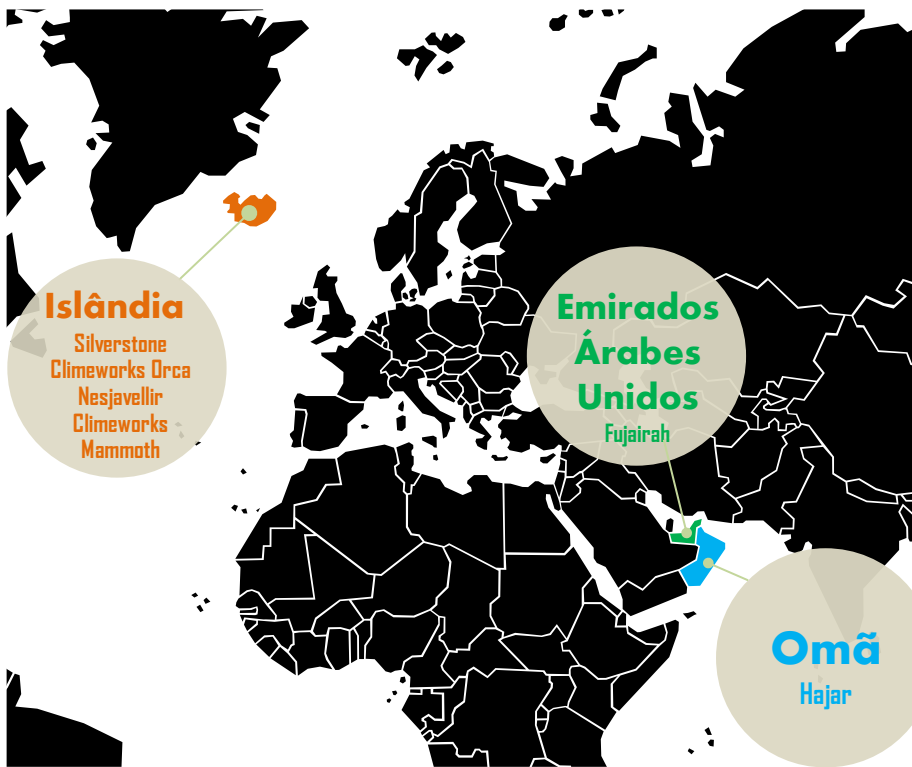
A Islândia concentra os quatro maiores projetos em operação de CCS que envolvem a mineralização de basaltos para armazenamento permanente do CO₂.

Projeto	Silverstone	Climeworks Orca	Nesjavellir	Climeworks Mammoth
Partes envolvidas	CarbFix, ON Power	CarbFix, ON Power, Climeworks	CarbFix, ON Power	CarbFix, ON Power, Climeworks
Início da operação	2014	2021	2023	2024
Tipo de captura	Captura pontual. CO ₂ proveniente de efluentes de usina geotérmica.	Captura direta do ar (DAC - Direct Air Capture)	Captura pontual. CO ₂ proveniente de efluentes de usina geotérmica.	Captura direta do ar (DAC - Direct Air Capture)
Capacidade de captura e armazenamento	~12,0 mil tCO ₂ /ano desde 2014. Com a integração completa ao projeto Silverstone (2021), ~34,0 mil tCO ₂ /ano	~4,0 mil tCO ₂ /ano	~3,0 mil tCO ₂ /ano	~36,0 mil tCO ₂ /ano
Custo	Garantiu até € 3,9 milhões em financiamento do Fundo de Inovação da União Europeia	US\$ 10-15 Milhões	Sem informações	

Referências de projetos: Silverstone e Nesjavellir – Carbfix (carbfix.com) Orca e Mammoth – Climeworks (climeworks.com). Informações adicionais: inea.ec.europa.eu e geoengineeringmonitor.org

Ademais, há o projeto Hajar (Omã), com capacidade estimada de 1,0 mil tCO₂/ano, que atualmente está em fase de construção (GCCSI, 2025). 44.01 e AirCapture realizarão a captura de CO₂ a partir da captura direta do ar e o gás carbônico será dissolvido na água para ser posteriormente injetado em peridotitos, rochas ígneas ultramáficas (Hajar).

A Holcim e a 44.01 anunciaram o lançamento do primeiro projeto-piloto para mineralizar CO₂ capturado da indústria do cimento, o projeto Fujairah (Emirados Árabes Unidos). Em peridotitos, rochas ígneas ultramáficas, iniciou-se a injeção a uma taxa de 5 t/dia e espera-se aumentar para 20 t/dia. O poço tem uma capacidade estimada de CO₂ de 25.000 t/ano (Fujairah).



A mineralização de carbono no Brasil

A experiência internacional mostra que a mineralização de carbono pode oferecer uma forma segura e permanente de armazenamento de CO₂, ao convertê-lo em minerais sólidos e estáveis.

No Brasil, essa abordagem é particularmente atrativa em função da ampla distribuição de rochas máficas e ultramáficas, presentes tanto em terrenos geológicos antigos quanto em grandes províncias vulcânicas e bacias sedimentares. Essas ocorrências concentram-se principalmente nos estados de Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Pará, Bahia, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

Contudo, a adoção dessa tecnologia em escala relevante no país ainda depende da superação de desafios estratégicos e técnicos, em grande parte compartilhados com outros países, como os custos associados à captura e ao armazenamento do CO₂ e a demanda energética dos processos.

No contexto brasileiro, somam-se desafios adicionais relacionados à gestão da água, à necessidade de mapeamento detalhado de aquíferos para proteção de reservatórios de água doce, uma vez que áreas favoráveis à mineralização podem coincidir com sistemas aquíferos de importância estratégica.

Por isso, o avanço da mineralização de carbono no Brasil tende a se apoiar no desenvolvimento de técnicas, metodologias e arranjos institucionais adaptados ao contexto nacional, com participação de instituições acadêmicas, centros de pesquisa e empresas do setor energético.

Até o momento, a maior parte dos estudos se concentra na Bacia do Paraná, em função da extensa ocorrência de basaltos. Ainda assim, outras bacias sedimentares brasileiras, como Santos, Campos e Pelotas, vêm sendo mencionadas como potenciais candidatas à avaliação desse tipo de armazenamento geológico (EPE, 2026).

Principais estados com ocorrências de rochas máficas e ultramáficas no Brasil



O empreendedor interessado em implementar projetos de CCS pode consultar o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) para referência inicial. Entretanto, será indispensável a condução de estudos hidrogeológicos de alta resolução na área de interesse do empreendimento, de modo a garantir a adequada caracterização das condições locais e, assim, evitar a contaminação de aquíferos de água doce (salinidade < 500 ppm).

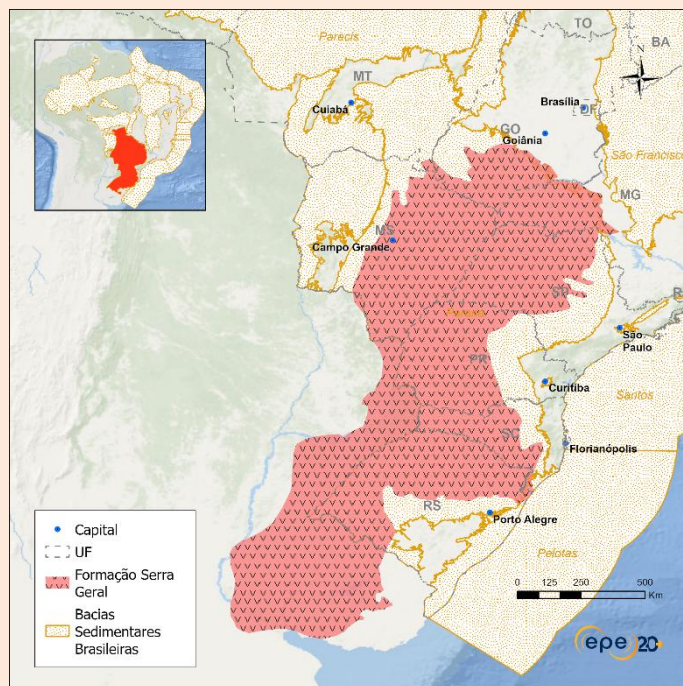
No Brasil, o SIAGAS, desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB), constitui uma base de dados destinada ao armazenamento e à consulta de informações sobre poços tubulares. Entretanto, a representatividade espacial dessa base ainda é limitada, uma vez que a distribuição dos poços cadastrados cobre apenas uma pequena porção do território nacional. Ademais, observa-se que a maioria dos registros corresponde a poços de pequena profundidade, o que restringe a disponibilidade de informações sobre aquíferos mais profundos.

Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná tem sido o principal foco dos estudos sobre mineralização de carbono no Brasil, em função da ampla ocorrência dos basaltos da Formação Serra Geral, que compõem uma das maiores províncias ígneas do mundo, com empilhamentos vulcânicos que podem atingir até 2.000 m de espessura (ANP, 2017). Em escala regional, esses basaltos apresentam potencial como reservatórios geológicos, sobretudo em intervalos fraturados, onde a porosidade e a permeabilidade efetivas permitem a circulação de fluidos e favorecem as reações de carbonatação (Orita e Cruz (2022)).

A localização da bacia, em uma região densamente povoada e industrializada, constitui ainda uma vantagem logística, ao reduzir as distâncias entre fontes emissoras de CO₂ e potenciais sítios de armazenamento.

Entretanto, os basaltos fraturados da Formação Serra Geral integram o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), um dos principais reservatórios de água do país, o que impõe restrições técnicas relevantes. Segundo Orita e Cruz (2022), a injeção de CO₂ deve ocorrer em porções do sistema hidrogeologicamente isoladas, afastadas de áreas de recarga e desconectadas de aquíferos superficiais, de modo a minimizar os riscos de migração do CO₂ e impactos sobre os recursos hídricos. A proteção do SASG, portanto, constitui um condicionante central para a viabilidade de projetos de mineralização na bacia.



Repsol
Sinopec
Brasil

PUCRS

IPR
INSTITUTO DO PETRÓLEO E
DOS RECURSOS NATURAIS

Em 2024, a Repsol Sinopec Brasil, em parceria com o Instituto do Petróleo e dos Recursos Naturais (IPR-PUCRS), inaugurou em Porto Alegre (RS) a primeira planta experimental de Captura Direta de Ar (DAC) da América Latina. Com capacidade para remover cerca de 300 toneladas de CO₂ por ano, a iniciativa integra o projeto DAC-SI (Direct Air Capture System Integration), voltado ao desenvolvimento de tecnologias de emissões negativas no país.

O potencial de mineralização do CO₂ nas rochas basálticas da Bacia do Paraná é investigado com o objetivo de analisar a adequação da rota às condições geológicas e ambientais brasileiras. Ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento, sem definição, até o momento, de aplicação em escala operacional, os esforços consideram a necessidade de compatibilização com o uso múltiplo do subsuperfície, incluindo a proteção dos recursos hídricos associados ao Sistema Aquífero Serra Geral (PETRONOTÍCIAS, 2024; REPSOL, 2022).



Diretoria de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis
Superintendência de Petróleo e Gás Natural

Coordenação Geral
Heloísa Borges Bastos Esteves

Coordenação Executiva
Marcos Frederico Farias de Souza

Equipe Técnica
Bruna Silveira Guimarães
Nathália Oliveira de Castro
Pedro de Moura Bernardino

Rafael Freitas Funcia Lemme
Regina Freitas Fernandes
Roberta de Albuquerque Cardoso

Acompanhe a
EPE em



A EPE se exime de quaisquer responsabilidades sobre decisões ou deliberações tomadas com base no uso das informações contidas neste documento, assim como pelo uso indevido dessas informações.