

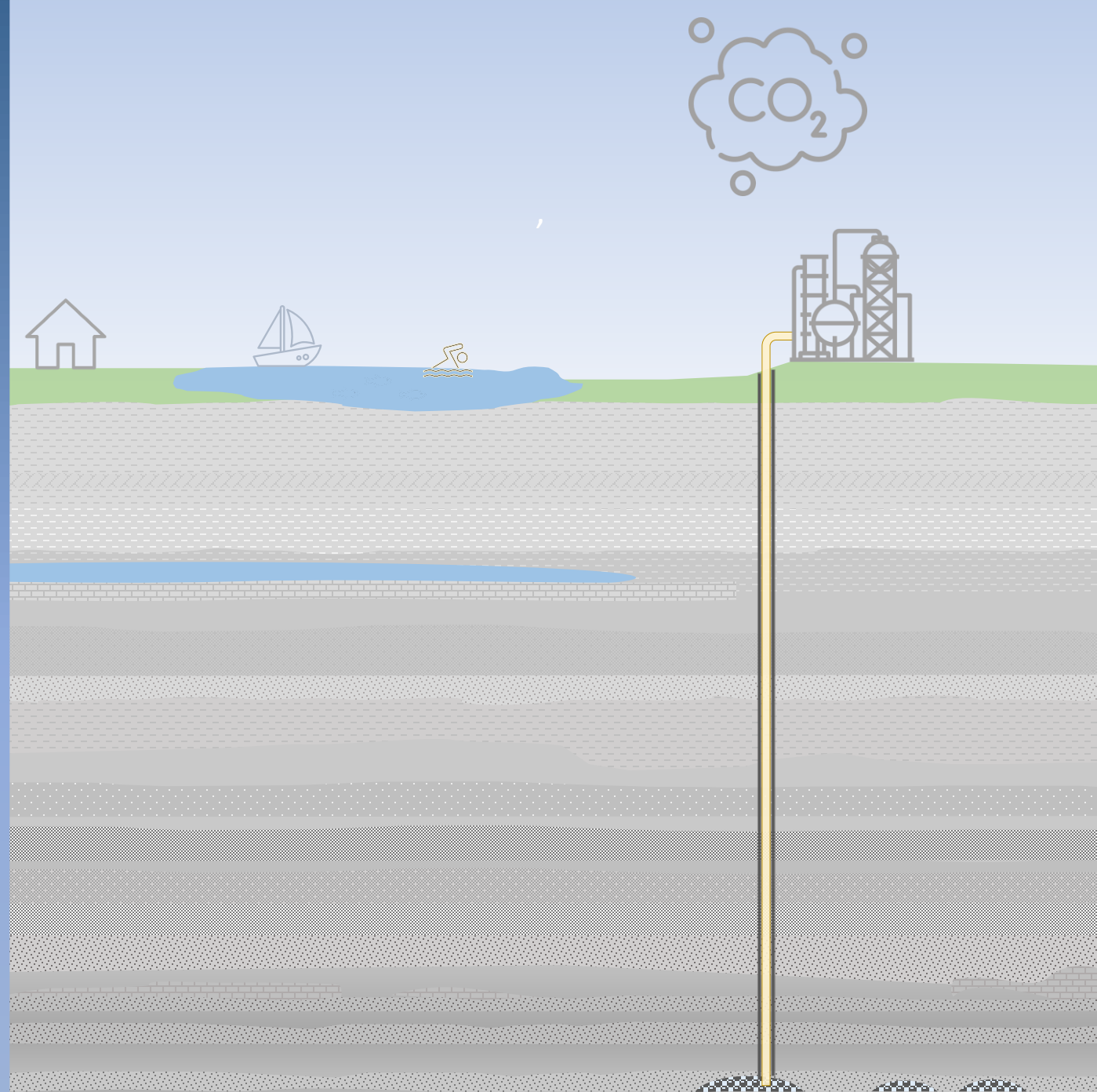
CAPTURA, ARMAZENAMENTO E UTILIZAÇÃO DE CARBONO NO BRASIL

Reservatórios Salinos:
O que está por trás de um dos
principais alvos para sítios de
armazenamento de carbono?

Superintendência de Petróleo e Gás Natural
2024



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



EPE - Empresa de Pesquisa Energética

Quem somos e o que fazemos



Empresa pública federal vinculada ao Ministério de Minas e Energia



Desenvolvemos estudos e estatísticas energéticas para subsidiar a formulação, implementação e avaliação da política energética nacional

Valor Público

A EPE realiza estudos e pesquisas para subsidiar a formulação, implementação e avaliação da política e do planejamento energético brasileiro.

Com este *fact sheet*, a EPE visa atuar, mais uma vez, como plataforma de comunicação sobre noções básicas acerca de alternativas que poderão compor o portfólio de tecnologias que, em conjunto, contribuirão para a redução e remoção do excesso de gases do efeito estufa na atmosfera. Através de uma abordagem acessível e objetiva, a EPE busca atenuar a assimetria de informações sobre as diferentes possibilidades relacionadas ao armazenamento geológico de carbono, principalmente no que tange a seleção de sítios de estocagem e a segurança das atividades necessárias.

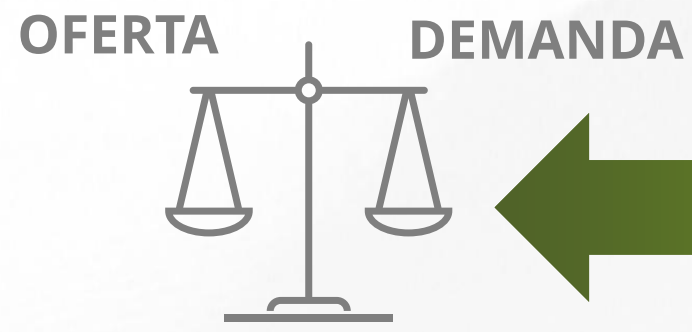
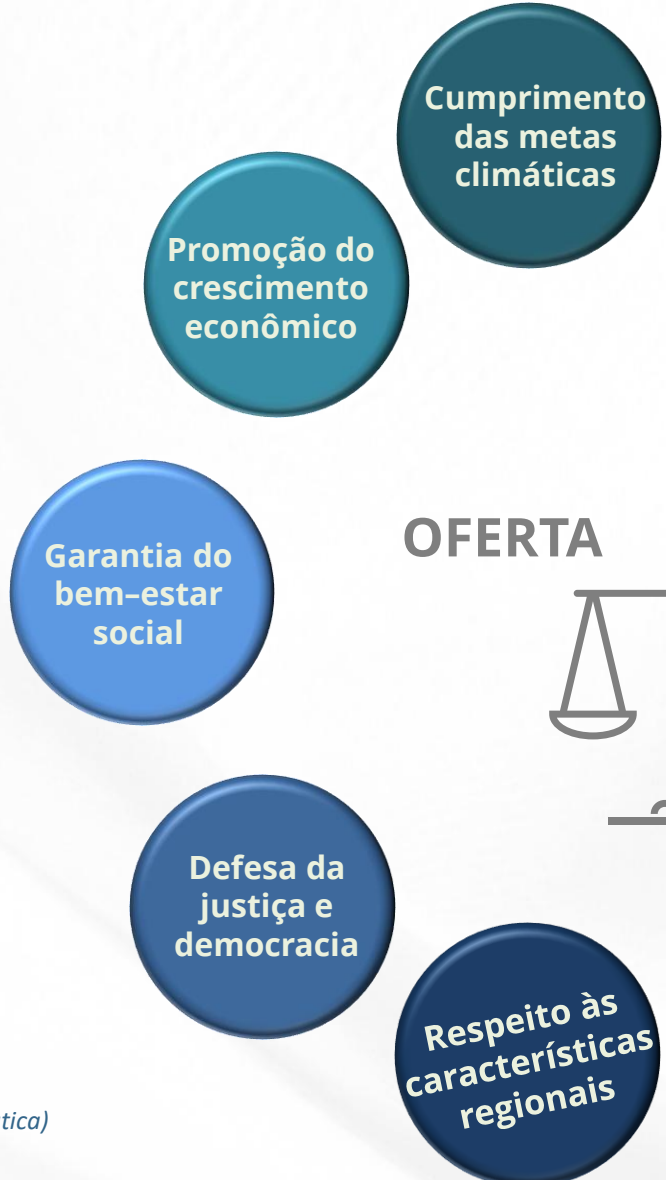


SUMÁRIO

1. Um futuro realmente sustentável
2. Espectro de alternativas para a remoção de CO₂ da atmosfera
3. Setor energético: redução e remoção do CO₂
4. CCS/CCUS: Reservatórios de interesse
5. Diferenciando os 2 principais tipos de sítios para armazenamento
6. Síntese de características dos reservatórios para armazenamento de CO₂
7. Mecanismos naturais para a segurança do armazenamento de CO₂
8. Por que os Reservatórios Salinos chamam tanto a atenção?
9. Desafios para projetos em Reservatórios Salinos

Um futuro realmente sustentável

TRILEMA ENERGÉTICO¹



REDUÇÃO DE CO₂

REMOÇÃO DE CO₂

¹ SHAH, S. A. A. et al. 2021. Energy trilemma based prioritization of waste-to-energy technologies: Implications for post-COVID-19 green economic recovery in Pakistan. Journal of Cleaner Production, v. 8, 15 February 2021, p. 124729.

Espectro de alternativas para a remoção de CO₂ da atmosfera



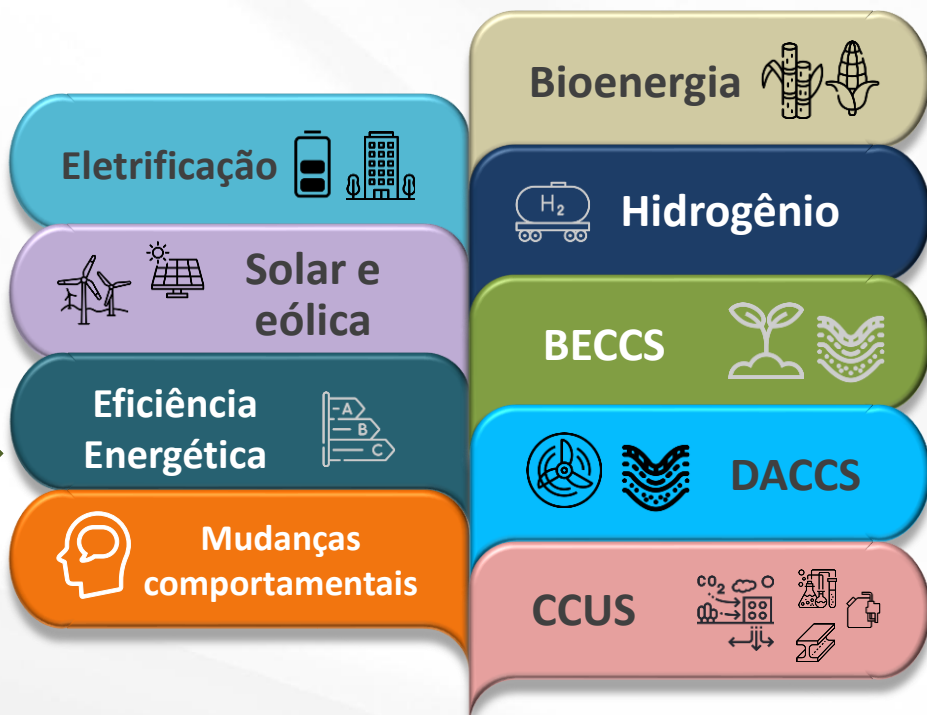
	Biológico-terrestre		Biológico-marinho		Geoquímico		Químico			
Método	Florestamento Reflorestamento Manejo Florestal	Sequestro de carbono no solo	Biochar (biocarvão)	Bioenergia com captura e armazenamento geológico de carbono (BECCS)	Captura direta do ar e armazenamento geológico de carbono (DACCS)	Intemperismo das rochas (armazenamento em minerais)	Restauração de turfeiras e pântanos	Gerenciamento de carbono azul	Aumento da alcalinidade dos oceanos	Fertilização dos oceanos (armazenamento em sedimentos marinhos)
Opções de implementação	<ul style="list-style-type: none"> Agrofloresta Plantio de árvores Silvicultura Madeira de construção Produtos de base biológica 	<ul style="list-style-type: none"> Práticas agrícolas Manejo de pastagens 	<ul style="list-style-type: none"> Resíduos agrícolas e florestais; urbano e industrial Resíduos orgânicos Culturas de biomassa cultivadas para fins específicos 		<ul style="list-style-type: none"> Sorvente sólido Solvente líquido 	<ul style="list-style-type: none"> Rochas de silicato 	<ul style="list-style-type: none"> Reumidificação Revegetação (em manguezais, florestas de macroalgas e marismas) 	<ul style="list-style-type: none"> Adição de materiais alcalinos, como carbonato ou silicato 	<ul style="list-style-type: none"> Fertilização com ferro, nitrogênio ou fósforo Ressurgência "aprimorada" ou "forçada" 	
Sistema	Terra						Oceano			
Meio de armazenamento	Edifícios	Vegetação, solo e sedimentos		Formações geológicas		Minerais	Vegetação, solo e sedimentos		Minerais	Sedimentos marinhos

Fonte: Adaptado de Castellanos, E. et al. 2022. Central and South America. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1689-1816, doi:10.1017/9781009325844.014

Setor energético: redução e remoção do CO₂

Cenário net zero 2050
(setor energético)

8% das reduções cumulativas totais de CO₂ (IEA, 2023)



ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO

Retirada (grande quantidade) de **carbono** da atmosfera por **milhares de anos**¹.

Essencial para o **abatimento** das **emissões** de setores **hard-to-abate** (motivos econômicos ou técnicos).

Emissões negativas pelo acoplamento com produção de **hidrogênio de baixo carbono** e **bioenergia**²!

Manutenção e criação de **empregos**³. Geração de **receitas**^{4 e 5}.

Desenvolvimento de **tecnologias**

Reaproveitamento de instalações ou da **faixa de território** já alterada.

¹ INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2023. Carbon Dioxide Removal: Fact Sheet. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGIII_Factsheet_CDR.pdf. Acesso em 18 dez. 2023.

² EPE. 2023. Fact Sheet "Captura e armazenamento de carbono biogênico: Bio-CCS". Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-767/FS-EPE-DPG-SDB-2023-05-BioCCS.pdf>. Acesso em 06 out. 2023.

³ GREAT PLAINS INSTITUTE. 2023. Jobs and economic impact of carbon capture deployment: Midcontinent Region. Disponível em: https://carboncaptureready.betterenergy.org/wp-content/uploads/2020/10/Midcontinent_Jobs.pdf. Acesso em 15 jan. 2024.

⁴ CENTRO BRASILEIRO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS (CEBRI), BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO (BID), EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) E CENERGIA. 2023. Neutralidade de carbono até 2050: Cenários para uma transição eficiente no Brasil – Fevereiro de 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-726/PTE_RelatorioFinal_PT_Digital.pdf. Acesso em 15 jan. 2024.

⁵ CCS BRASIL. 2023. 1º Relatório Anual de CCS no Brasil: 2022/2023. Disponível em https://www.ccsbr.com.br/_files/ugd/11a7f0_f79d8b3570e04429974fa4a67d444881.pdf. Acesso em 16 maio 2023.

CCS/CCUS: Reservatórios de interesse



Diferentes tipos de sítios¹:



Reservatórios de óleo e gás (de campos ativos ou depletados)



Reservatórios salinos (inglês, *Saline reservoirs/arquifers*)



Jazidas de carvão não-minerável



Folhelhos ricos em matéria orgânica



Rochas vulcânicas básicas

No mundo,
menor
número de
projetos¹

Acompanhe as publicações da EPE em:



RESERVATÓRIOS SALINOS

O que está por trás de um dos principais alvos para sítios de armazenamento de carbono?



FS-EPE-DPG-SPG_01-2024

O armazenamento geológico de CO₂ relacionado à mitigação dos gases do efeito estufa em excesso na atmosfera é uma tecnologia conhecida desde os anos de 1970, mas que teve apenas nos anos 90 uma escalada de interesse com a implementação de um dos maiores projetos sobre o assunto, o campo de Sleipner, no Mar do Norte.

A seleção de sítios de armazenamento geológico permanente é parte crucial para a avaliação da pertinência técnica, econômica e ambiental de projetos de captura e armazenamento de carbono (do inglês, “Carbon Capture and Storage – CCS”) e daqueles que envolvam também a utilização (“Carbon Capture, Utilisation and Storage – CCUS”).

As possibilidades de sítios mais estudadas, e que podem ser encontradas em todo o globo, são: reservatórios de óleo e gás, de campos ativos ou depletados; reservatórios salinos (isto é, contendo água com salinidade que pode variar de ligeiramente salobra a valores muito superiores à salinidade média da água do mar², mas não potáveis); jazidas de carvão não minerável; folhelhos ricos em matéria orgânica (MO) e rochas vulcânicas básicas.

Por sua ampla distribuição global, os reservatórios de óleo e gás e os reservatórios salinos detêm as maiores estimativas de capacidade volumétrica de armazenamento
Fonte: DOE, NETL (2015; 2017)

² A salinidade da água do mar varia, geralmente, entre 33 e 37 gramas de sais dissolvidos por litro (33–37 ppt) (NOAA, 2024).

Além de componente natural da atmosfera terrestre (0,04% do total), o CO₂ é o segundo fluido mais abundante da crosta, ficando atrás apenas da água (RINGROSE et al., 2021).

Presente em sua fase gasosa livre ou como um componente dissolvido em águas subterrâneas, o CO₂ tem como fontes principais em subsuperfície:

- atividade mantélica;
- transformação termoquímica da MO e geração do petróleo;
- atividade biológica.

Segundo a Agência Internacional de Energia (International Energy Agency - IEA), no cenário em que, até 2050, as emissões líquidas do setor energético alcancem valores nulos, o CCS deve sustentar até 8% das reduções cumulativas totais de CO₂ (IEA, 2023).

Demais reduções devem vir do aumento do uso de:

- Renováveis
- Hidrogênio
- Eletrificacão
- Eficiência energética
- Mudanças comportamentais
- Novas práticas de uso do solo

Tipo	Capacidade de armazenamento (GtCO ₂)
Reservatórios de óleo e gás	675–900*
Reservatórios salinos	> 1.000
Jazidas de carvão não minerável	3–200

* Não contabiliza a capacidade associada a campos ainda não descobertos

Fonte: DOE, NETL (2015)

Embora as técnicas de armazenamento estejam provadas, para que se alcancem os objetivos do Acordo de Paris, é vital aumentar o número de projetos em nível mundial. Desenvolvimentos tecnológicos que sejam capazes de reduzir os custos de implantação, especialmente no que tange a etapa de captura direta do CO₂; o gerenciamento de infraestruturas compartilhadas entre diferentes usuários e a demonstração da segurança a longo prazo do armazenamento são vitais para a ampliação desta tecnologia.

Os governos locais, por sua vez, precisam se envolver ainda mais e criar ambientes regulatórios seguros, com capacidade de gerenciamento das responsabilidades a longo prazo. O estabelecimento de apoio financeiro - seja pelo aporte de capital direto, isenções tributárias ou definição de mercados de créditos de carbono - é outro fator essencial para a escalada positiva de projetos.

Ademais, a anuência popular deve igualmente pautar o crescimento dessa alternativa. Esforços para a promoção de uma instrução isonômica, objetiva e transparente sobre a importância e eficiência do armazenamento de carbono são imprescindíveis para que a descarbonização através de CCS seja uma ambição acessível para a sociedade.

¹ DEPARTMENT OF ENERGY U.S. (DOE). NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY (NETL). 2017. Best Practices: Site Screening, Site Selection, and Site Characterization for Geologic Storage Projects. Disponível em <https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2018-10/BPM-SiteScreening.pdf>. Acesso em 07 mar. 2023.

Diferenciando os 2 principais tipos de sítios para armazenamento

O QUE É UMA ROCHA RESERVATÓRIO?

 Rocha com condições para acumulação de líquidos e/ou gases em seus poros

TIPOS DE ROCHAS RESERVATÓRIOS¹

Rochas sedimentares

Clásticas

 Arenito  Calcário oolítico

Biogênicas

 Coquina

Rochas vulcânicas e metamórficas fraturadas (porosidade secundária)

 Basalto  Muscovita Xisto

¹ UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). 2024. Seção de Materiais Didáticos do IGC-USP. Disponível em <https://didatico.igc.usp.br/rochas/>. Acesso em 20 jun. 2024.

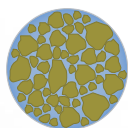


Diferenciando os 2 principais tipos de sítios para armazenamento



Síntese de características dos reservatórios para armazenamento de CO₂

Essencial para os Reservatórios Salinos



POROSIDADE E PERMEABILIDADE

Suficientemente altas para permitir a **injeção** do CO₂ a **taxas** que permitam a **remoção** do gás em excesso na atmosfera **nos prazos** necessários.



PROFUNDIDADE

Em geral, em profundidades (abaixo da superfície) muito **maiores** do que os **aquíferos** com **águas potáveis**: **> 800 m***

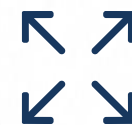
**CO₂ no estado supercrítico (densidade de fase líquida, viscosidade de fase gasosa)*



ELEVADA SALINIDADE

Contendo **fluido com alta salinidade**, em geral, superior a 1.000 mg/L de sólidos totais dissolvidos

Conteúdo salino **inviabiliza técnica e economicamente o uso** da mesma em **superfície**.



TAMANHO

Suficientemente **grande** para armazenar as **quantidades** de CO₂ **planejadas**.

A capacidade é o volume de espaços porosos que podem ser ocupados sem que haja risco para a integridade do selo.

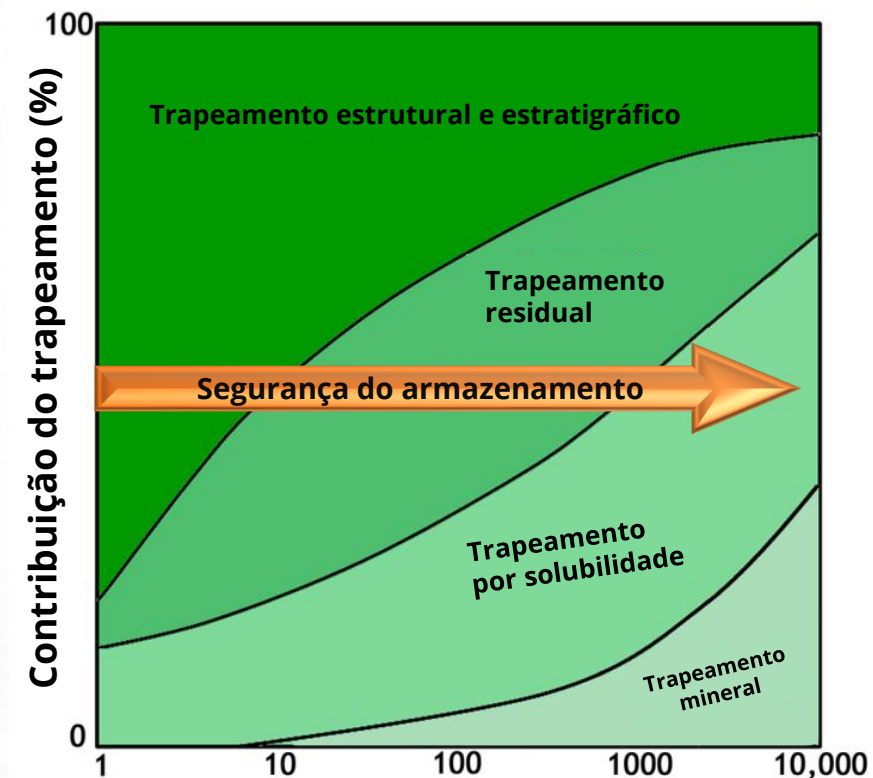


CONFINAMENTO

Presença de uma (ou mais de uma) **camada** de **rocha** com **baixa permeabilidade** à passagem de fluidos (rocha selante ou capeadora) e com **integridade preservada**.

Em geral, folhelhos, evaporitos ou vulcânicas.

Mecanismos naturais para a segurança do armazenamento de CO₂



Tempo desde encerramento da injeção (anos)

Fonte: ALTMAN, S. J.; DENG, W. 2014. Chemical and Hydrodynamic Mechanisms for Long-Term Geological Carbon Storage. Journal of Physical Chemistry C, v. 118, n. 28, pp. 15103-15113.

Grão da rocha reservatório

Rocha selante

Por que os Reservatórios Salinos chamam tanto a atenção?



Mecanismos de contenção natural permitem que o CO₂ injetado permaneça confinado por séculos ou milênios.



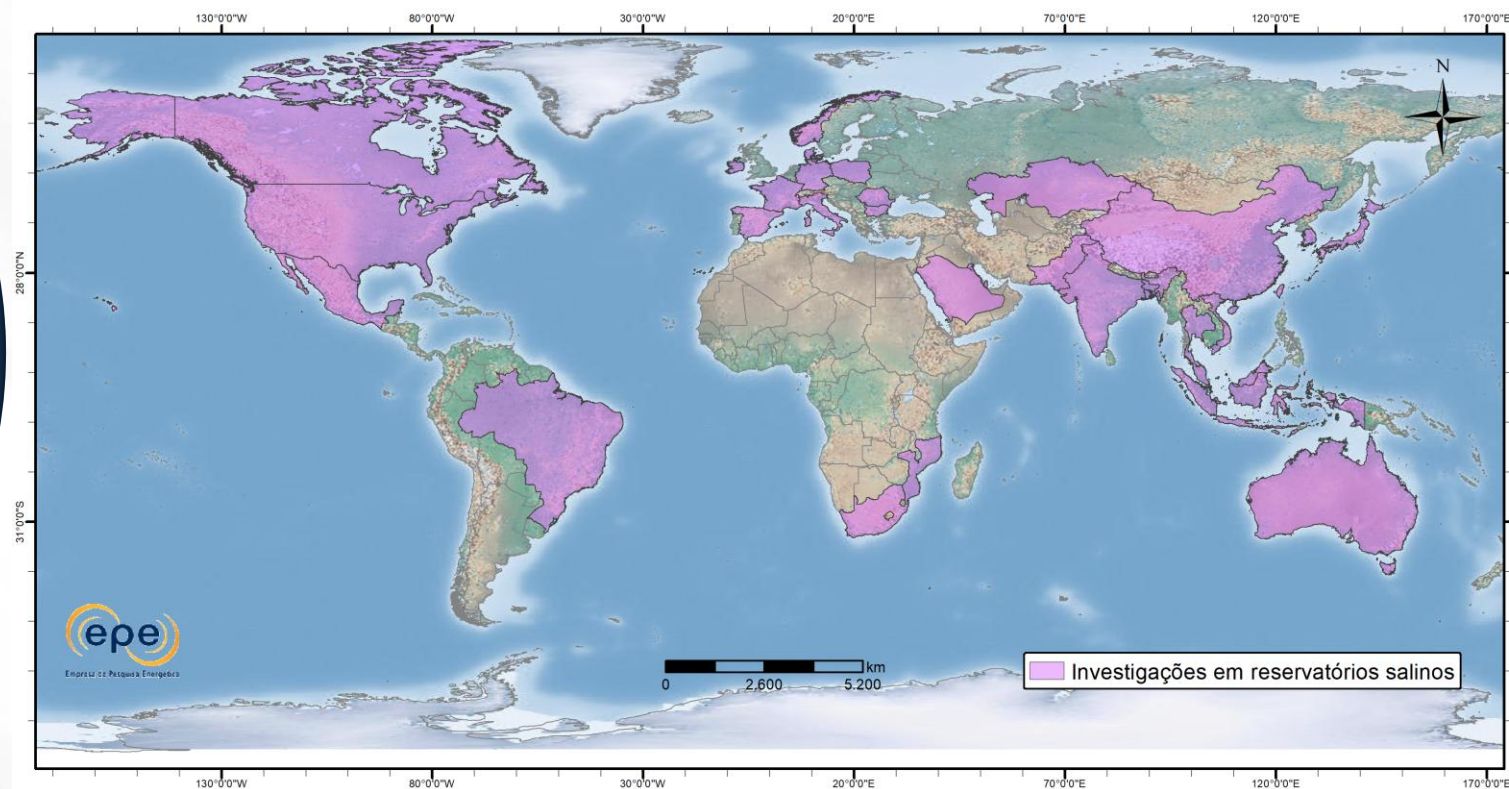
Os maiores volumes estimados em subsuperfície!

* Não contabiliza a capacidade associada a campos ainda não-descobertos
Fonte: DOE. NETL (2015)

Por que os Reservatórios Salinos chamam tanto a atenção?



Em diversas regiões do mundo



Fonte: EPE (2024) com dados de [OGCI \(2024\)](#) e [DOE \(USA, 2024\)](#)

Desafios para projetos em Reservatórios Salinos

MAPEAMENTO DE OPORTUNIDADES

Direcionar recursos humanos e financeiros para levantamentos de dados atualizados com foco específico nesses sistemas.

1

TRANSPARÊNCIA

Envolver as múltiplas partes interessadas, do setor público e privado, academia e comunidades locais, com o compartilhamento de saberes, dúvidas e expectativas.

2

ACEITAÇÃO PÚBLICA

Contribuir para a redução das preocupações públicas sobre segurança e impactos ambientais.

3



4

REGULAMENTAÇÃO

Estabelecer um arcabouço regulatório robusto e harmonizado com outros instrumentos à fim de garantir a sustentabilidade técnica, ambiental e econômica dos projetos e assegurando padrões de segurança durante todo o ciclo de vida do armazenamento de CO₂.

5

REDUÇÃO DE CUSTOS

Incentivar pesquisas e inovações tecnológicas para reduzir custos associados à captura, transporte e injeção do CO₂.

6

MONITORAMENTO

Garantir o armazenamento de CO₂ de forma segura e permanente.

7

MAXIMIZAÇÃO DA EFICÁCIA

Integrar o armazenamento com outras soluções, como energias renováveis e mudanças comportamentais.

Equipe



Heloisa Esteves
Diretora de Estudos do
Petróleo, Gás e Biocombustíveis



Marcos Souza
Superintendente de Petróleo
e Gás Natural



Marcelo a Alfradique
Superintendente Adjunto



Regina Fernandes
Consultora



Roberta Albuquerque
Consultora



Bruna Guimarães
Analista de Pesquisa
Energética



Camila Carvalho
Analista de Pesquisa
Energética



Ísis Fernandes
Analista de Pesquisa
Energética



Natália Bonavita
Analista de Pesquisa
Energética



Nathália Castro
Analista de Pesquisa
Energética



Péricles Brumati
Analista de Pesquisa
Energética



Rafael Lemme
Analista de Pesquisa
Energética



Raul Leggieri
Analista de Pesquisa
Energética



www.epe.gov.br

exploracaoeproducao@epe.gov.br

Empresa de Pesquisa Energética

Diretoria de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Superintendência de Petróleo e Gás Natural

Diretora

Heloisa Borges Bastos Esteves

Coordenação Técnica

Marcos Frederico Farias de Sousa
Marcelo Ferreira Alfradique

Regina Freitas Fernandes
Roberta de Albuquerque Cardoso

Equipe Técnica

Bruna Silveira Guimarães
Camila da Mota Carvalho
Isis Oliveira Fernandes
Natália da Veiga Bonavita Teixeira

Nathália Oliveira de Castro
Péricles de Abreu Brumati
Rafael Freitas Funcia Lemme
Raul Fagundes Leggieri

Siga a EPE nas redes sociais:



EPE - Empresa de Pesquisa Energética

Praça Pio X, n. 54 - 2º andar - Centro
20091-040

Rio de Janeiro - Brasil



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
UNIÃO E RECONSTRUÇÃO