

Triagem de Clusters e Hubs Industriais de CCUS no Nordeste Brasileiro por Análise de Dados Geoespaciais

Jansen Cruz de Souza



CENTRO DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

João Pessoa, 2025

Jansen Cruz de Souza

Triagem de Clusters e Hubs Industriais de CCUS no Nordeste Brasileiro por Análise de Dados Geoespaciais

Monografia apresentada ao Centro de Informática da Universidade Federal da Paraíba, em atendimento aos requisitos para o grau de Bacharel em Ciências de Dados e Inteligência Artificial.

Orientador: Gustavo Charles Peixoto de Oliveira

2025, May

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S729t Souza, Jansen Cruz de.

Triagem de clusters e hubs industriais de CCUS no
nordeste brasileiro por análise de dados geoespaciais.

/ Jansen Cruz de Souza. - João Pessoa, 2025.

51 f. : il.

Orientação: Gustavo Charles Peixoto de Oliveira.

TCC (Graduação) - UFPB/CI.

1. Descarbonização. 2. Clusters e Hubs. 3.
Reaproveitamento. I. Oliveira, Gustavo Charles Peixoto
de. II. Título.

UFPB/CI

CDU 004.9



CENTRO DE INFORMÁTICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Monografia do curso de Ciências de Dados e Inteligência Artificial intitulada ***Triagem de Clusters e Hubs Industriais de CCUS no Nordeste Brasileiro por Análise de Dados Geoespaciais***, de autoria de Jansen Cruz de Souza, e aprovada pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Gustavo Charles Peixoto de Oliveira
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Gilberto Farias de Souza Filho
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Bruno Souza Carmo
Universidade de São Paulo

Course Coordinator
Prof. Dr. Teobaldo Bulhões Junior

João Pessoa, May 20, 2025

RESUMO

A injeção e armazenamento permanente de CO_2 são operações críticas da cadeia de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS), essenciais para neutralizar emissões em setores de difícil abatimento, como energia e indústria. O Nordeste brasileiro, em particular os estados da Bahia (BA), Rio Grande do Norte (RN), Sergipe (SE) e Alagoas (AL), apresenta um cenário altamente favorável para a implementação de CCUS devido à sua concentração de polos industriais, infraestrutura de poços de petróleo em bacias sedimentares de alta prospectividade e logística estratégica. Este trabalho identifica *clusters* e *hubs* de CCUS nesses estados, utilizando métricas de oportunidade baseadas em densidade de emissões, viabilidade de transporte e reaproveitamento de poços com índice de oportunidade (O_w) superior a 0,3 como sumidouros de CO_2 . Foram analisadas as bacias Potiguar (RN), Recôncavo (BA) e Sergipe-Alagoas (SE/AL), selecionadas por sua capacidade comprovada de armazenamento. A metodologia incluiu modelos matemáticos para triagem de municípios por emissões e análise geoespacial. Este estudo contribui para a avaliação da viabilidade de projetos escaláveis de armazenamento geológico de carbono no Nordeste, destacando a integração entre infraestrutura legada e novas oportunidades econômicas para o setor de óleo e gás.

Palavras-chave: descarbonização, clusters e hubs, reaproveitamento de poços, armazenamento geológico de carbono, nordeste brasileiro.

ABSTRACT

The injection and permanent storage of CO_2 are critical operations in the Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) chain, essential for offsetting emissions in hard-to-abate sectors such as energy and industry. Brazil's Northeast region—particularly the states of Bahia (BA), Rio Grande do Norte (RN), Sergipe (SE), and Alagoas (AL) offers a highly favorable scenario for CCUS implementation due to its concentration of industrial hubs, existing oil well infrastructure in highly prospective sedimentary basins, and strategic logistics. This study identifies CCUS clusters and hubs in these states using opportunity metrics based on emission density, transport feasibility, and the reuse of wells with an opportunity index (O_w) greater than 0.3 as CO_2 sinks. The Potiguar (RN), Recôncavo (BA), and Sergipe-Alagoas (SE/AL) basins were analyzed, selected for their proven storage capacity. The methodology included mathematical models for screening municipalities by emissions and geospatial analysis. This study contributes to the assessment of the feasibility of scalable geological carbon storage projects in the Northeast, highlighting the integration of legacy infrastructure with new economic opportunities for the oil and gas sector.

Keywords: decarbonization, clusters and hubs, well reuse, geological carbon storage, Brazilian Northeast.

LISTA DE FIGURAS

1	Potencial de abatimento anual de emissões de <i>hubs</i> estratégicos de CCUS no território brasileiro. Fonte: (Oil and Gas Climate Initiative (OGCI), 2023)	13
2	Distribuição das emissões de CO ₂ no Brasil por região. Fonte: (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023a), p.15.	17
3	IPA por Armazamento de CO ₂ . Fonte: (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023a).	18
4	IPA por bacia sedimentar no Brasil. Fonte: Adaptado de (Agência Nacional do Petróleo (ANP), 2023b).	20
5	Fluxograma da metodologia para seleção de locais CCUS no Nordeste brasileiro. As caixas azuis representam as etapas principais, enquanto as verdes detalham os processos específicos. Setas indicam o fluxo sequencial do método.	23
6	Poços não abandonados permanentemente com $O_w > 0,3$ - Região Nordeste. Fonte: Elaborado pelo autor.	29
7	Categorização das emissões de CO ₂ por município no Nordeste. (A) Baixas emissões ($< \rho_{10,e}$), (B) Médias emissões ($\rho_{10,e}$ a $\rho_{50,e}$), (C) Altas emissões ($> \rho_{50,e}$). Fonte: Elaborado pelo autor (2024) com base nos limiares do SEEG (2023).	30
8	Isocontornos do operador KDE agindo sobre as emissões estratificadas de CO ₂ (ρ). Fonte: Elaborado pelo autor.	30
9	Gráficos de densidade cumulativa para os estados AL, SE, BA e RN. As linhas verticais representam ρ_{10} e ρ_{50} . Fonte: Elaborado pelo autor.	31
10	Distribuição combinada do Índice de Oportunidade nos estados do Nordeste. Fonte: Elaborado pelo autor.	34
11	Mapa de relevância IPA - <i>Offshore</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.	35
12	Distribuição espacial dos poços aptos sobrepostos ao potencial de armazenamento (IPA) nas bacias selecionadas. Esquerda: Bacia Potiguar; Direita: Bacias do Recôncavo, Sergipe-Alagoas. Fonte: Elaborado pelo autor.	36
13	Resultados da triagem de campos petrolíferos - Potiguar e Sergipe. Fonte: Elaborado pelo autor.	37
14	Resultados da triagem de campos petrolíferos - Alagoas e Recôncavo. Fonte: Elaborado pelo autor.	37

15	<i>Hubs</i> de Captura nas Categorias B e C. Fonte: Elaborado pelo autor. . . .	39
16	Densidade rodoviária por estado (km/km ²). Fonte: Elaborado pelo autor. .	40
17	Mapa de Densidade com suas Rodovias Operacionais. Fonte: Elaborado pelo autor.	41
18	Infraestrutura de Dutos. Fonte: Elaborado pelo autor.	43

LISTA DE TABELAS

1	Emissões brasileiras por setor (2022)	17
2	Classes de prospectividade do IPA	20
3	Categorias de Emissões	24
4	Avaliação de Viabilidade de Poços para 2030	26
5	Comparação entre os estados	33
6	Análise de Poços Não Abandonados. Fonte: Elaborado pelo autor.	33
7	Distribuição de Poços Aptos por Faixa de Índice (IDX_POCO_2030). Fonte: Elaborado pelo autor.	33
8	Desempenho das Bacias na Seleção de Poços Aptos. Fonte: Elaborado pelo autor.	35
9	Distribuição de Poços por Bacia e Faixa de Relevância com $O_w > 0,3$. Fonte: Elaborado pelo autor.	36
10	Distribuição de <i>Hubs</i> por Estado. Fonte: Elaborado pelo autor.	39
11	<i>Hubs</i> Prioritários por Critério Estratégico. Fonte: Elaborado pelo autor. . .	40
12	Estatísticas da Rede Rodoviária por Estado. Fonte: Elaborado pelo autor. .	41
13	Distribuição de Rodovias por Tipo e Estado (Vias Operacionais). Fonte: Elaborado pelo autor.	42
14	Fatores de conversão GWP-AR5 (horizonte de 100 anos)	50

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Escopo	12
1.2	Motivação	12
1.3	Objetivos	14
2	Revisão Bibliográfica	15
2.1	A Cadeia de CCUS: Processos e Status	15
2.1.1	Captura, transporte, utilização e armazenamento	15
2.1.2	Panorama Global e Projeções Nacionais	16
2.2	Índice de Prospectividade Areal para Armazenamento de Carbono	18
2.3	Definição de <i>Clusters</i> e <i>Hubs</i> de CCUS	21
2.4	Potencial para o Nordeste Brasileiro	21
3	METODOLOGIA	23
3.1	Triagem Regional	23
3.1.1	Fonte dos dados	23
3.1.2	Categorização de Emissões	24
3.2	Identificação e Visualização de <i>Hubs</i> de Captura	24
3.3	Identificação de Locais de Armazenamento para o CO ₂	25
3.3.1	Índice de Oportunidade (O_w)	25
3.4	Aquisição de Dados Geoespaciais para Mapeamento de Bacias Sedimentares	26
3.5	Cobertura da Rede Rodoviária para Transporte de CO ₂ e	27
3.6	Cobertura da Rede Dutoviária para Transporte de CO ₂ e	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1	Concentração de Emissões	30
4.1.1	Interpretação dos Valores de ρ_{10} e ρ_{50}	31
4.2	Infraestrutura de Armazenamento	33
4.2.1	Malha de poços	34

4.2.2	Mapa de Atratividade <i>Offshore</i>	35
4.3	Análise dos Poços Petrolíferos - <i>Onshore</i>	36
4.4	<i>Hubs</i> de Captura	38
4.5	Malha rodoviária e Dutos	40
5	CONCLUSÃO	44
	REFERENCES	44
	APPENDICES	49
		50
.1	Conceito de GWP-AR5	50
.2	Fatores de Conversão	50
.3	Exemplo Prático	50

1 INTRODUÇÃO

1.1 Escopo

No Brasil, a transição energética e os compromissos com a neutralidade carbônica impõem desafios à indústria de óleo e gás (O&G), exigindo soluções tecnológicas que mitiguem emissões sem comprometer a segurança energética nacional. Seguindo a tendência global, o país tem reconhecido os processos da cadeia de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS) como meios estratégicos promissores para regiões com emissões concentradas de CO₂e (Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), 2024). As áreas com histórico de exploração de hidrocarbonetos e presença de infraestrutura associada são fortes candidatas a projetos-piloto de CCUS.

A Região Nordeste assume uma posição de destaque nesse cenário por abrigar alguns setores industriais de difícil abatimento de carbono (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023b) e bacias sedimentares estratégicas cujos campos de produção são potenciais fontes emissoras (Agência Nacional do Petróleo (ANP), 2023a). As bacias mais relevantes são as seguintes: Potiguar, Sergipe-Alagoas e Recôncavo. No entanto, ainda são escassos os estudos voltados especificamente para o mapeamento em escala-fina (LIMA; OLIVEIRA, 2023) da infraestrutura existente na região para suportar a formação de clusters e hubs de CCUS, o que compromete o avanço de projetos integrados e adaptados às suas características territoriais (Oil and Gas Climate Initiative (OGCI), 2023). Para o estudo eficaz da cadeia de CCUS, é necessário dispor de dados que orientem a triagem e seleção territorial para estabelecimento de novos projetos, permitam calcular métricas de oportunidade e, acima de tudo, subsidiem decisões.

Visando preencher uma lacuna considerável sobre o mapeamento localizado do potencial de CCUS para a região Nordeste do Brasil, este trabalho tratará prioritariamente da infraestrutura para armazenamento geológico de CO₂e, como parte dos processos de disposição do gás. Para tanto, algumas premissas são assumidas para a análise, tais como a possibilidade de reaproveitamento de poços existentes em campos maduros.

1.2 Motivação

Um relatório recente da (Oil and Gas Climate Initiative (OGCI), 2023), uma aliança global entre as 12 maiores empresas produtoras de petróleo do mundo para ações de baixo carbono, da qual a Petrobras participa, estima que o potencial de abatimento anual de emissões que poderia ser alcançado com a implantação de hubs de CCUS apenas no Nordeste é de 10,8 MtCO₂e (ver Figura 1).

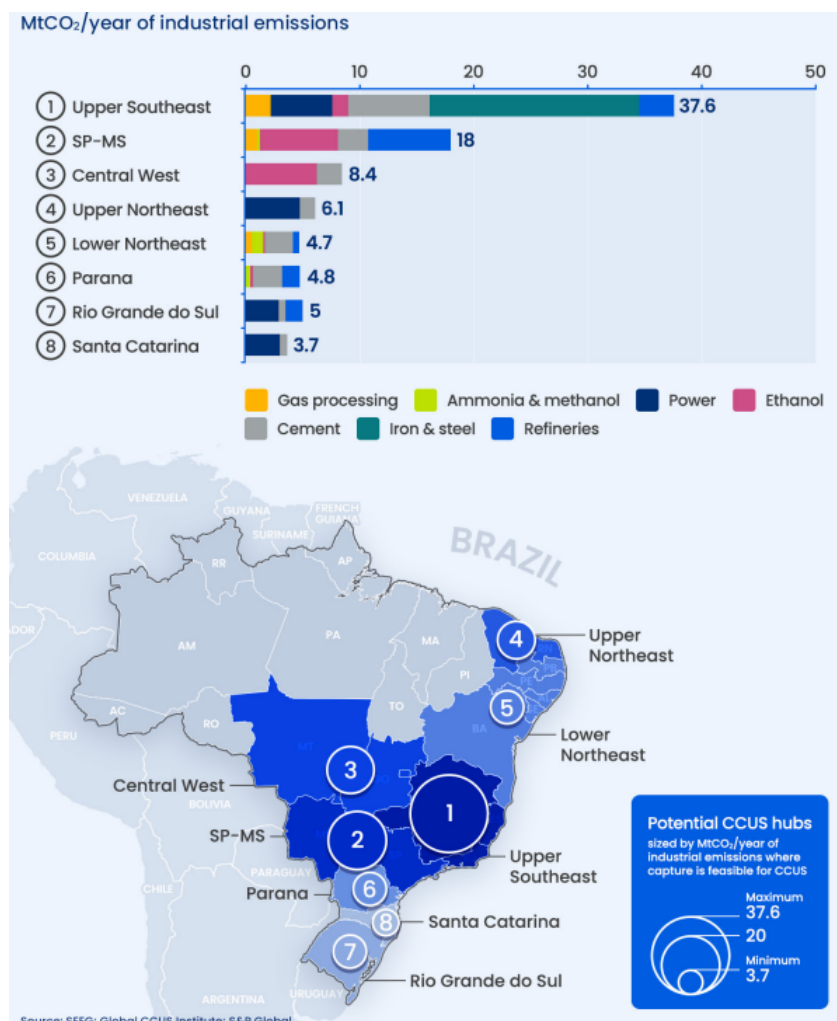


Figura 1: Potencial de abatimento anual de emissões de *hubs* estratégicos de CCUS no território brasileiro. Fonte: (Oil and Gas Climate Initiative (OGCI), 2023)

Segundo a OGCI, há dois *hubs* de CCUS identificados para a região Nordeste. Abaixo, fazemos uma breve descrição deles:

1. **Nordeste Superior (*Upper Northeast*):** Compreende os estados do Ceará e do Rio Grande do Norte. O hub possui infraestrutura terrestre e concentrações relevantes de emissões. No Ceará, destaca-se a indústria siderúrgica no Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), localizado em São Gonçalo do Amarante e Caucaia, com presença da Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP). No Rio Grande do Norte, 62% dos 1.214 poços da Bacia Potiguar são *onshore*, 22% da capacidade produtiva instalada está inativa e o restante encontra-se em declínio (fonte: (Agência Nacional do Petróleo (ANP), 2023b)). O estado também abriga o Polo Industrial de Macaíba, com potencial de abatimento estimado em 3 MtCO₂e por ano. Estima-se que a Bacia Potiguar possua uma capacidade teórica de armazenamento de 500 MtCO₂e (KETZER; IGLESIAS; EINLOFT, 2016).

2. **Nordeste Inferior (*Lower Northeast*)**: Abrange os estados da Bahia, Sergipe, Alagoas e Pernambuco como gerador de emissões. Entre os principais ativos estão os campos *offshore* maduros, como os da Bacia de Sergipe-Alagoas (100% *offshore*), e os campos da Bacia do Recôncavo (predominantemente *onshore*), com apoio logístico de infraestrutura costeira. A refinaria Abreu e Lima (em Pernambuco), a empresa de vidros planos VIVIX (em Goiana-PE) e a Companhia Siderúrgica Nacional (com atuação na região) são exemplos de potenciais fontes emissoras de CO₂e.

Com base nos dados da OGCI e da Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (Agência Nacional do Petróleo (ANP), 2023b), a região Nordeste possui características suficientes para a implementação de projetos estratégicos de CCUS. Podemos pontuar pelo menos quatro delas:

- concentração de emissões por indústrias pesadas (p.ex. siderurgia, cimento, vidro, refinarias) nos estados que encabeçam a economia da região;
- cobertura de bacias sedimentares com níveis médio e alto de prospectividade para armazenamento geológico;
- infraestrutura petrolífera legada passível de reaproveitamento ou *retrofitting*;
- desenvolvimento econômico regional aliado à sustentabilidade.

1.3 Objetivos

Este trabalho possui os seguintes objetivos:

- Aplicar técnicas de análise de dados geoespaciais para triagem e seleção de clusters e hubs de CCUS em escala fina no Nordeste brasileiro;
- Identificar regiões territoriais intermediárias (segundo o IBGE) com alta concentração de emissões industriais;
- Mapear a infraestrutura de poços de petróleo com potencial para armazenamento de CO₂;
- Definir zonas prioritárias para a implementação de projetos-piloto de CCUS na região.

Em suma, propõe um modelo analítico para identificar clusters e hubs de CCUS nesses estados, com foco no reaproveitamento de poços de petróleo com alto índice de oportunidade.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 A Cadeia de CCUS: Processos e Status

2.1.1 Captura, transporte, utilização e armazenamento

A cadeia de CCUS (do inglês *Carbon Capture, Utilization, and Storage*) compreende um conjunto de tecnologias (CALLAS *et al.*, 2022; WILLIAMS *et al.*, 2022; ZOBACK; SMIT, 2023) voltadas à mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Essas tecnologias atuam em três etapas principais:

- **Captura:** processo responsável por separar o CO₂ das correntes gasosas geradas por fontes estacionárias, como usinas de energia ou indústrias. As tecnologias de captura são agrupadas em três categorias principais:
 - ***Pré-combustão:*** realiza a remoção do CO₂ antes da queima do combustível, geralmente por meio da gaseificação do carvão ou reforma do gás natural, produzindo uma mistura rica em hidrogênio e CO₂. Essa tecnologia é especialmente promissora em refinarias, como a RLAM na Bahia, que poderia vir a utilizar esse tipo de processo ((IEA), 2020);
 - ***Pós-combustão:*** realiza a separação do CO₂ após a queima do combustível, capturando o gás presente nos gases de exaustão. Esse método é viável para termelétricas, como a Termelétrica de Pecém, no Ceará, onde a adaptação tecnológica para CCUS poderia ser implementada (LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014);
 - ***Oxi-combustível:*** envolve a queima de combustíveis em uma atmosfera rica em oxigênio em vez de ar, resultando em uma corrente gasosa composta principalmente por CO₂ e vapor d'água, facilitando a separação. Esta abordagem é adequada para siderúrgicas e poderia ser aplicada em instalações como a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) em Volta Redonda, RJ (Global CCS Institute, 2017).
- **Transporte:** o CO₂ capturado precisa ser transportado até os locais de utilização ou armazenamento. O gasoduto é o modal preferencial para longas distâncias em terra, enquanto navios são mais viáveis para transporte offshore em longas distâncias. No Reino Unido, estudos indicam um ponto de equilíbrio entre gasoduto e navio de aproximadamente 500 km (ENERGY, 2018). Segundo a IEA, o custo médio do transporte por dutos para distâncias inferiores a 300 km é de US\$2–5 por tonelada de CO₂e ((IEA), 2020). No Brasil, a EPE estima que o transporte por duto da Refinaria Landulpho Alves (RLAM/BA) até a Bacia do Recôncavo, em uma distância de cerca

de 120 km, teria um custo de US\$3,80 por tonelada de CO₂e, enquanto o transporte rodoviário para o mesmo trajeto sairia por US\$22,00/tCO₂e (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023a).

- **Armazenamento:** o CO₂ pode ser armazenado permanentemente em reservatórios geológicos profundos, divididos em:
 - *Campos depletados:* antigos campos de petróleo e gás esgotados, já dotados de infraestrutura (poços, dutos e dados geológicos) e com formações selantes naturais, como folhelhos, que impediram a migração de hidrocarbonetos por milhões de anos.
 - *Aquíferos salinos profundos:* reservatórios preenchidos por água salobra e rochas porosas, situados geralmente abaixo de 800 metros de profundidade. O armazenamento ocorre tanto por aprisionamento físico (estrutural e residual) quanto por mecanismos geoquímicos.

Um exemplo de campo potencial para armazenamento é o Campo de Ubarana, localizado no estado do Rio Grande do Norte, cuja capacidade estimada de armazenamento é de aproximadamente 50 MtCO₂e (KETZER *et al.*, 2015).

2.1.2 Panorama Global e Projeções Nacionais

Existem atualmente 140 projetos de CCUS em operação ou desenvolvimento no mundo, com capacidade total de armazenamento de mais de 200 MtCO₂/ano (Global CCS Institute, 2024). Alguns casos de destaque são os EUA, com 45 projetos operacionais e os países da Europa, com 28 hubs em desenvolvimento. Exemplos de projetos de grande porte são aqueles desenvolvidos na Permian Basin, no estado americano do Texas, e a *joint-venture* norueguesa *Northern Lights*.

No Brasil, o projeto-piloto de CCUS mais significativo atualmente é realizado no Terminal de Cabiúnas, no estado do Rio de Janeiro. Em sua fase de teste, prevê-se o abatimento de MtCO₂e/ano (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), 2024). A Figura 2 mostra o perfil das emissões brasileiras.

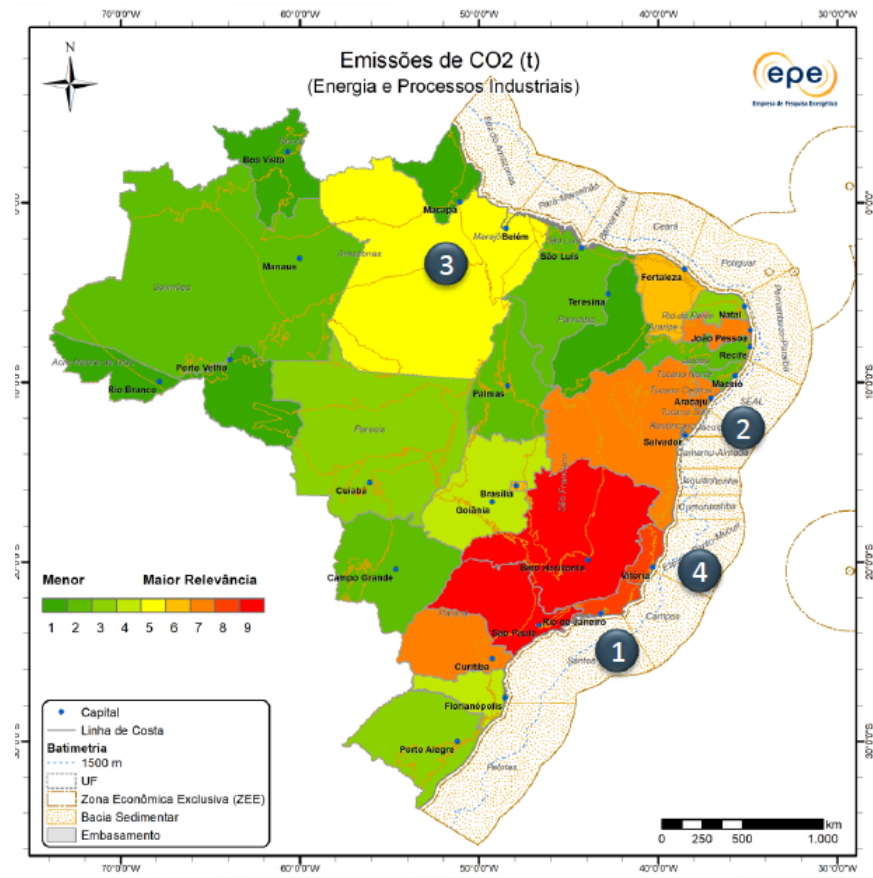


Figura 2: Distribuição das emissões de CO₂ no Brasil por região. Fonte: (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023a), p.15.

O Brasil emitiu 2,18 GtCO₂e (gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente) em 2022 (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023a; Observatório do Clima, 2023). Tendo em vista que o limiar crítico para viabilidade econômica de projetos de CCUS é de 1 MtCO₂e/ano, há um horizonte promissor para o país no âmbito da descarbonização (Tabela 1). No Nordeste, apenas três polos industriais superam esse limiar de 1 MtCO₂e/ano necessário para viabilidade econômica, com destaque para Camaçari/BA (4,8 MtCO₂e/ano) (Oil and Gas Climate Initiative (OGCI), 2024).

Tabela 1: Emissões brasileiras por setor (2022)

Setor	Emissões (GtCO ₂ e)	Exemplos no Nordeste
Energia	0,98 (45%)	RLAM/BA, Termelétricas (CE/RN)
Agropecuária	0,72 (33%)	Pecuária (MA), Queimadas (PI)
Indústria	0,48 (22%)	Cimento (BA/RN), Siderurgia (CE)

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023a) e (Observatório do Clima, 2023).

Em termos comparativos, perante o cenário global, o Brasil é o sexto maior emissor

global (3% do total mundial) (World Resources Institute, 2023). Isto equivale à soma das emissões anuais de 470 milhões de automóveis (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023a), cujo volume total é capaz de preencher 400.000 estádios do Maracanã. A região Nordeste é responsável por 18% das emissões nacionais (0,39 GtCO₂e/ano), sendo a Bahia o maior estado emissor (12% do total regional) principalmente devido às atividades petrolíferas. Outros estados relevantes são o Rio Grande do Norte e Ceará, responsáveis por cerca de 60% das emissões de energia. Na Paraíba e em Pernambuco, em particular, a produção de cimento e vidro possui destaque pontual nas cidades de Alhandra e Goiana, respectivamente.

2.2 Índice de Prospectividade Areal para Armazenamento de Carbono

O *Índice de Prospectividade Areal* é uma métrica geológica utilizada para identificar zonas específicas com potencial para armazenamento de CO₂ dentro de bacias sedimentares. Desenvolvido principalmente por equipes técnicas de exploração (SMITH, 2022), emprega critérios como porosidade, selo capilar e estrutura de *traps*. Paralelamente, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) mantém seu próprio *Índice de Potencial de Armazenamento* (IPA), focado em avaliações macroeconômicas e de infraestrutura (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023a). Ambos são complementares, porém com escopos metodológicos distintos.

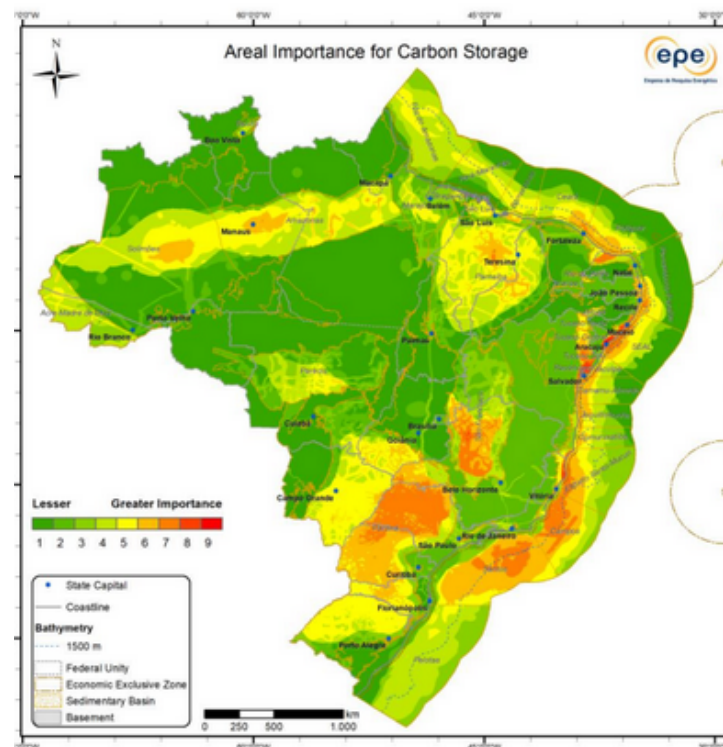


Figura 3: IPA por Armaznameto de CO₂.

Fonte: (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023a).

As bacias sedimentares do Nordeste brasileiro apresentam características geológicas favoráveis ao armazenamento de CO₂ (Figura 3), destacando-se:

- **Bacias com reservatórios em arenitos:** Sergipe-Alagoas (SEAL), Recôncavo, Tucano Sul e parte da Bacia do São Francisco, que possuem registros de descobertas significativas e alta expectativa para acumulação de fluidos (Agência Nacional do Petróleo (ANP), 2023a; CIOTTA *et al.*, 2021);
- **Bacias com reservatórios carbonáticos:** SEAL e Sergipe, que oferecem condições propícias para injetividade e armazenamento de longo prazo (SANTOS; ALMEIDA, 2023; Oil and Gas Climate Initiative (OGCI), 2023);
- **Ocorrências em rochas ígneas:** Identificadas nas bacias de Sergipe, Alagoas e Recôncavo, representando alternativas complementares de armazenamento (LIMA; OLIVEIRA, 2023).

A seleção dessas áreas prioritárias considera aspectos críticos para a viabilidade de projetos CCUS:

- **Proximidade a fontes emissoras:** As regiões metropolitanas de Salvador (BA), Aracaju (SE) e Maceió (AL) concentram polos industriais relevantes nos setores (ENERGIA, 2023; Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023a):
 - Petroquímico (Polo de Camaçari);
 - Siderúrgico;
 - Termelétrico;
 - Produção de etanol.
- **Infraestrutura existente:** A malha de gasodutos na região, particularmente no Corredor Nordeste, pode ser adaptada para transporte de CO₂ (TRANSPETRO, 2022);
- **Sinergia com bioenergia:** O setor sucroenergético nordestino, em expansão nos estados de Alagoas e Pernambuco, oferece oportunidades para projetos BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage) (BRITO; SILVA, 2023).

Interpretação do IPA

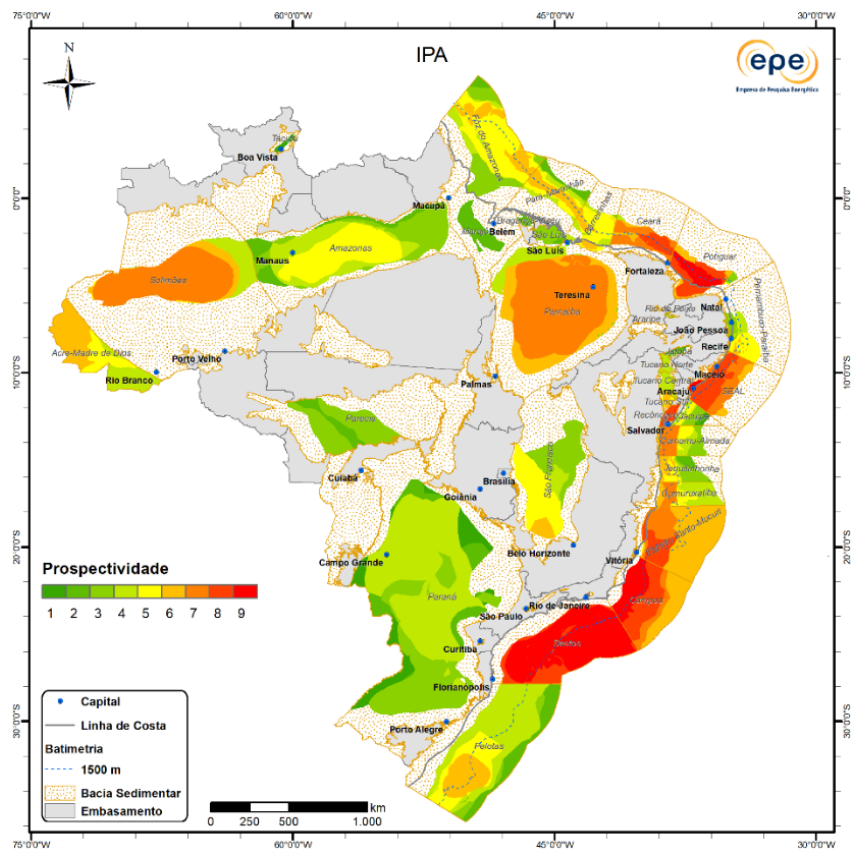


Figura 4: IPA por bacia sedimentar no Brasil. Fonte: Adaptado de (Agência Nacional do Petróleo (ANP), 2023b).

Tabela 2: Classes de prospectividade do IPA

Classe	IPA	Descrição
Baixa	1–3	Bacias com desafios geológicos ou dados insuficientes
Média	4–6	Potencial moderado, requer estudos complementares
Alta	7–9	Bacias com selo capilar comprovado e infraestrutura

Fonte: (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023a) (Caderno CCUS, Cap. 4).

Segundo a (Agência Nacional do Petróleo (ANP), 2023b), as bacias do Nordeste com maior IPA são:

- **Potiguar (RN):** IPA = 8. Alta densidade de poços e dados. 58 poços ativos mais dados geológicos robustos;
- **Recôncavo (BA):** IPA = 7. Infraestrutura madura (dutos/poços);
- **Sergipe-Alagoas:** IPA = 5. Dados limitados pós-desativação.

2.3 Definição de *Clusters* e *Hubs* de CCUS

De acordo com o (Global CCS Institute, 2016b), as seguintes definições são usadas para elementos formadores da cadeia de CCUS, os quais são fundamentais para o planejamento de redes eficientes de CCUS e vêm sendo amplamente discutidos em relatórios técnicos internacionais, como o do Global CCS Institute (Global CCS Institute, 2024):

- ***Cluster* de CCUS:** Concentração geográfica de fontes emissoras relacionadas que operam em um determinado setor industrial. Segundo (Observatório do Clima, 2023; BAHIA, 2022; CEARÁ, 2023), destacam-se:
 - **Polo Industrial de Camaçari/BA:** Maior complexo petroquímico do Hemisfério Sul, com mais de 20 indústrias em um raio de 15 km, incluindo:
 - * 3 refinarias de petróleo;
 - * 15 plantas petroquímicas;
 - * 2 unidades de fertilizantes.
 - **Complexo Pecém/CE:** Importante hub energético-industrial composto por:
 - * 1 siderúrgica (Companhia Siderúrgica do Pecém - CSP);
 - * 2 termelétricas (Termelétrica Pecém I e II);
 - * 1 porto industrial.
- **Hub de CCUS:** ponto de coleta, distribuição ou destinação final do CO₂ que pode servir a múltiplos emissores. Aplicando-se à região Nordeste, Ex.: Centro de coleta de CO₂e (refinaria + dutos) e poços adaptados (Campo de Ubarana/RN).

A abordagem de clusters e hubs é particularmente vantajosa porque:

- reduz custos através da compartilhamento de infraestrutura (Global CCS Institute, 2016a);
- viabiliza a formação de economias de escala (AGENCY, 2022);
- facilita a integração entre diferentes setores industriais (SUN; ZHANG, 2021).

2.4 Potencial para o Nordeste Brasileiro

Estudos estimam que apenas as bacias *offshore* brasileiras têm potencial para armazenar mais de 3.000 MtCO₂. Em particular, o nordeste do Brasil apresenta condições geológicas favoráveis para armazenamento de CO₂ em algumas bacias sedimentares *onshore* e *offshore*, como Potiguar, Recôncavo e Sergipe-Alagoas. Relatórios técnicos recentes

ressaltam o papel estratégico da região na consolidação de hubs de CCUS, com potencial de atrair investimentos e integrar diversas fontes emissoras a estruturas de captura e armazenamento compartilhadas (KETZER *et al.*, 2015; CIOTTA *et al.*, 2021; Oil and Gas Climate Initiative (OGCI), 2024).

3 METODOLOGIA

Esta seção descreve o conjunto de métodos e critérios utilizados para selecionar regiões promissoras à implementação de projetos de captura e armazenamento de carbono (CCUS) no Nordeste do Brasil. Conforme demonstrado na Figura 5, a metodologia foi estruturada em etapas que envolvem: triagem regional baseada em fontes de emissão e infraestrutura existente; categorização das fontes de emissão; índice de oportunidade para pontos de captura e armazenamento; e análise de viabilidade logística com foco na rede de transporte terrestre.

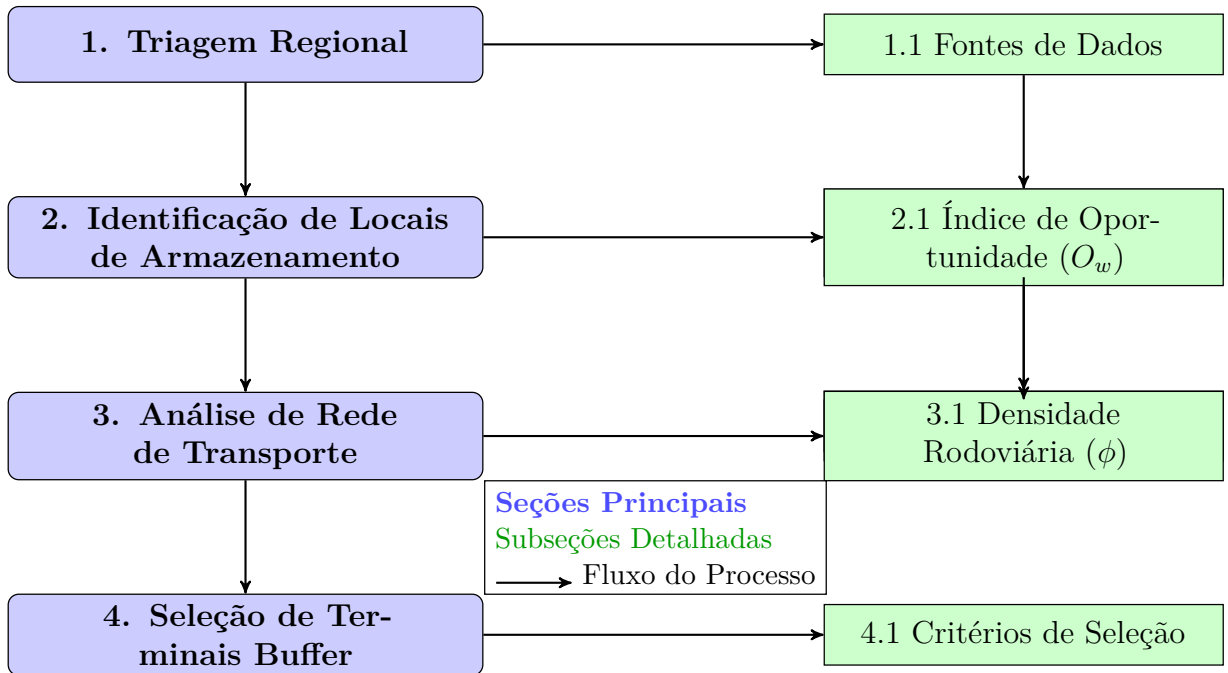


Figura 5: Fluxograma da metodologia para seleção de locais CCUS no Nordeste brasileiro. As caixas azuis representam as etapas principais, enquanto as verdes detalham os processos específicos. Setas indicam o fluxo sequencial do método.

3.1 Triagem Regional

A triagem regional foi conduzida com base em três eixos principais: fontes de emissão de CO₂e, infraestrutura de poços com potencial para armazenamento, e a cobertura viária que viabiliza o transporte entre esses pontos.

3.1.1 Fonte dos dados

Foram utilizadas bases de dados públicas e atualizadas para compor o mapeamento das variáveis de interesse:

- Emissões industriais: Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), com agregação por regiões intermediárias segundo o IBGE;
- Infraestrutura de poços: base georreferenciada da Agência Nacional do Petróleo (ANP);
- Malha viária: dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), via Sistema Nacional de Viação (SNV).

As fontes de emissão foram identificadas a partir dos dados do SEEG (ano-base 2023), com posterior georreferenciamento dos municípios emissores (IBGE). Para fins de organização e rastreabilidade dos dados, cada unidade de emissão recebeu um identificador único no formato UF-SETOR-IDSEQ.

3.1.2 Categorização de Emissões

A intensidade de emissão foi normalizada em relação à área dos municípios, resultando na densidade emissiva $\rho_k(t)$:

$$\rho_k(t) = \frac{E_k}{A_k}(t), \quad E > 0, \quad \forall k = 1, 2, \dots, m \quad (3.1)$$

onde E_k representa as emissões de CO₂e do município k , A_k sua área em km², e m o número total de municípios avaliados.

Com base na densidade calculada, os municípios foram classificados conforme os limiares apresentados na Tabela 3:

Tabela 3: Categorias de Emissões

Categoria	Critério
A	$\rho < 10\%$
B	$10\% \leq \rho < 50\%$
C	$\rho \geq 50\%$

3.2 Identificação e Visualização de *Hubs* de Captura

As fontes de emissão positiva foram filtradas por estado e por recorte territorial com base nas Regiões Intermediárias (REGINT) definidas pelo IBGE. As categorias de emissão (CAT_INTREG), previamente atribuídas às regiões, foram utilizadas para identificar aquelas com maior prioridade para a instalação de hubs de captura de CO₂.

Cada município emissor foi georreferenciado por meio das suas coordenadas centrais (latitude e longitude), e o ponto correspondente ao seu centróide foi calculado utilizando

a geometria da base de dados. Esses pontos centrais foram utilizados para representar visualmente os locais de emissão nas figuras.

Na etapa de visualização, fontes com categorias B e C foram destacadas como potenciais hubs de captura, sendo representadas por marcadores triangulares sobre o mapa. As fronteiras das regiões intermediárias foram traçadas como referência territorial, e as fontes de emissão negativa foram plotadas em tons neutros para fins comparativos.

Todo o processo de seleção, filtragem e representação espacial baseou-se exclusivamente em operações geográficas e categóricas. A delimitação territorial adotada garante que os hubs estejam localizados em áreas de interesse concentrado de emissão, respeitando a lógica espacial de viabilidade logística e regional.

3.3 Identificação de Locais de Armazenamento para o CO₂

Para os locais de armazenamento, foram selecionados apenas os poços não abandonados permanentemente, conforme registros da (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), 2024). Em seguida, os poços foram agrupados por bacia sedimentar e por campo de produção. Dentro de cada bacia analisada (Potiguar, Sergipe, Alagoas e Recôncavo), foi calculada a média de poços por campo. Apenas os campos com número de poços igual ou superior à média da respectiva bacia foram selecionados para análise mais aprofundada.

Os poços desses campos destacados foram então classificados conforme seu status operacional (*produção, injeção, fechado, abandonado temporariamente*), de forma a evidenciar o perfil atual de uso dos ativos. Essa abordagem permite identificar áreas com maior concentração de infraestrutura potencialmente reaproveitável para fins de armazenamento geológico de CO₂.

A viabilidade dos locais selecionados foi complementada com a análise do *índice de oportunidade* (O_w), proposto por (CIOTTA *et al.*, 2021), o qual quantifica o tempo remanescente de vida útil dos poços dentro do horizonte de planejamento, fornecendo subsídios objetivos para priorização das áreas mais promissoras.

3.3.1 Índice de Oportunidade (O_w)

O índice O_w para um poço w em um ano de referência futuro t^* é calculado por:

$$O_w(t^*) = \begin{cases} 1 - \frac{t^* - t_a}{t_{0,w} + s - t_a}, & \text{se } t_{0,w} + s \geq t_a \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

com:

- t^* : ano de referência (ex: 2030)
- t_a : ano atual
- $t_{0,w}$: ano de início de produção do poço
- s : tempo médio de produção dos poços similares

Exemplo 1 — Poço P-123:

- Bacia: Potiguar (RN)
- $t_a = 2024$, $t^* = 2030$, $t_{0,w} = 2005$, $s = 25$

$$O_w(2030) = 1 - \frac{2030 - 2024}{2005 + 25 - 2024} = 1 - \frac{6}{6} = 0$$

Exemplo 2 — Poço P-456:

- Bacia: Recôncavo (BA)
- $t_a = 2024$, $t^* = 2030$, $t_{0,w} = 2010$, $s = 30$

$$O_w(2030) = 1 - \frac{6}{2040 - 2024} = 1 - \frac{6}{16} \approx 0,625$$

A Tabela 4 resume os valores de O_w para os poços estudados:

Tabela 4: Avaliação de Viabilidade de Poços para 2030

Poço	Bacia	$t_{0,w}$	s	$t_{0,w} + s$	$O_w(2030)$
P-123	Potiguar	2005	25	2030	0,00
P-456	Recôncavo	2010	30	2040	0,625
P-789	Sergipe	2015	20	2035	0,455

Conforme evidenciado, os poços com início de produção mais recente e maior vida útil remanescente apresentam maior índice de oportunidade. O critério adotado para viabilidade mínima foi $O_w > 0,3$ (ALMEIDA *et al.*, 2024).

3.4 Aquisição de Dados Geoespaciais para Mapeamento de Bacias Sedimentares

Para o mapeamento preciso das bacias sedimentares offshore brasileiras, recorreu-se à Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), seguindo a abordagem proposta por (INDE, 2019) para integração de dados geoespaciais governamentais. Como destacado por

(SILVA; COSTA, 2021), a INDE consolida de forma padronizada informações cruciais de diversas instituições, incluindo o Mapeamento Sistemático Brasileiro na escala 1:250.000 e os levantamentos do Projeto RADAM (CPRM, 2020).

O processo de aquisição seguiu os protocolos estabelecidos por (OLIVEIRA, 2022) para serviços WFS (Web Feature Service), utilizando requisições HTTP específicas conforme a especificação OGC (OGC, 2020). Essa metodologia permitiu extrair seletivamente geometrias do tipo polígono, com filtros espaciais baseados nos critérios de (ANP, 2021) para áreas offshore com potencial de armazenamento geológico.

3.5 Cobertura da Rede Rodoviária para Transporte de CO₂e

A infraestrutura de transporte foi avaliada com base na densidade da malha viária (ϕ) operacional de cada estado, definida como:

$$\phi = \frac{\text{Extensão Total de Rodovias (km)}}{\text{Área do Estado (km}^2\text{)}}$$

Foram consideradas apenas rodovias com status ativo ou em obras de melhoria, categorizadas da seguinte forma:

- DUP — Rodovias duplicadas;
- PAV — Pavimentadas;
- EOD — Em obras de duplicação;
- IMP — Implantadas, mas não pavimentadas;
- TRV — Travessias urbanas.

Estados com maior ϕ indicam maior capilaridade logística, favorecendo o transporte de CO₂ por caminhões-tanque em rotas viáveis e seguras.

3.6 Cobertura da Rede Dutoviária para Transporte de CO₂e

A última etapa consistiu no mapeamento da infraestrutura dutoviária existente, por sua vez, constituiu uma etapa fundamental para avaliar rotas potenciais de transporte de CO₂ capturado.

A caracterização da rede de dutos existentes nos estados do Rio Grande do Norte (RN), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA) foi realizada mediante integração de bases geoespaciais oficiais e técnicas de processamento computacional. O procedimento adotado compreendeu quatro etapas principais:

- Realizou-se a carga dos dados de regiões intermediárias do IBGE, contendo as delimitações territoriais oficiais;
- Polígonos foram cruzados com a malha municipal para obtenção precisa dos limites estaduais;
- *Merge* espacial com base no código de unidades da federação e nomes dessas regiões.

Para o processamento da rede dutoviária, implementou-se um sistema dinâmico de visualização que se adapta automaticamente ao número de estados analisados. Cada mapa estadual foi configurado com:

1. Sistema de referência de coordenadas (CRS) específico da geometria original;
2. Limites espaciais calculados a partir da envoltória convexa do território;
3. Margens de visualização dinâmicas (10% da extensão territorial ou 0.1 grau, o que for maior).

A rede de dutos foi processada mediante filtragem por município de origem (MUNIC_ORIG) e transformação para o CRS correspondente a cada estado. Aplicou-se operação de recorte espacial (*intersection*) para garantir que apenas trechos dutoviários dentro dos limites estaduais fossem considerados. Os dutos válidos foram plotados com estilo padronizado (linhas vermelhas), permitindo análise comparativa entre os estados.

Esta abordagem permitiu a geração automática de mapas temáticos comparáveis, fundamentais para avaliação da infraestrutura existente e identificação de corredores potenciais para transporte de CO₂ capturado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A região Nordeste possui um total de **11.139** poços petrolíferos cadastrados, dos quais **1.210** (10,9%) apresentam um índice de oportunidade (O_w) acima de 0,3 para o ano de 2030. Este percentual indica que aproximadamente **1 em cada 9 poços** na região possui potencial produtivo significativo. Conforme Figura 6, podemos destacar que:

- **Rio Grande do Norte (RN)** lidera em número de poços qualificados (509), representando **42%** do total selecionado, com o maior O_w médio (0,518) entre os estados;
- **Bahia (BA)** e **Sergipe (SE)** aparecem como os segundos estados com maior número de poços qualificados (265 e 300 respectivamente), porém com índices médios mais baixos (0,457 e 0,443);
- **Maranhão (MA)** e **Ceará (CE)**, embora com menos poços (69 e 46 respectivamente), apresentam os segundos melhores índices médios (0,506 e 0,505).
- **Alagoas (AL)** possui o menor número de poços qualificados (21) e o menor O_w médio (0,440).

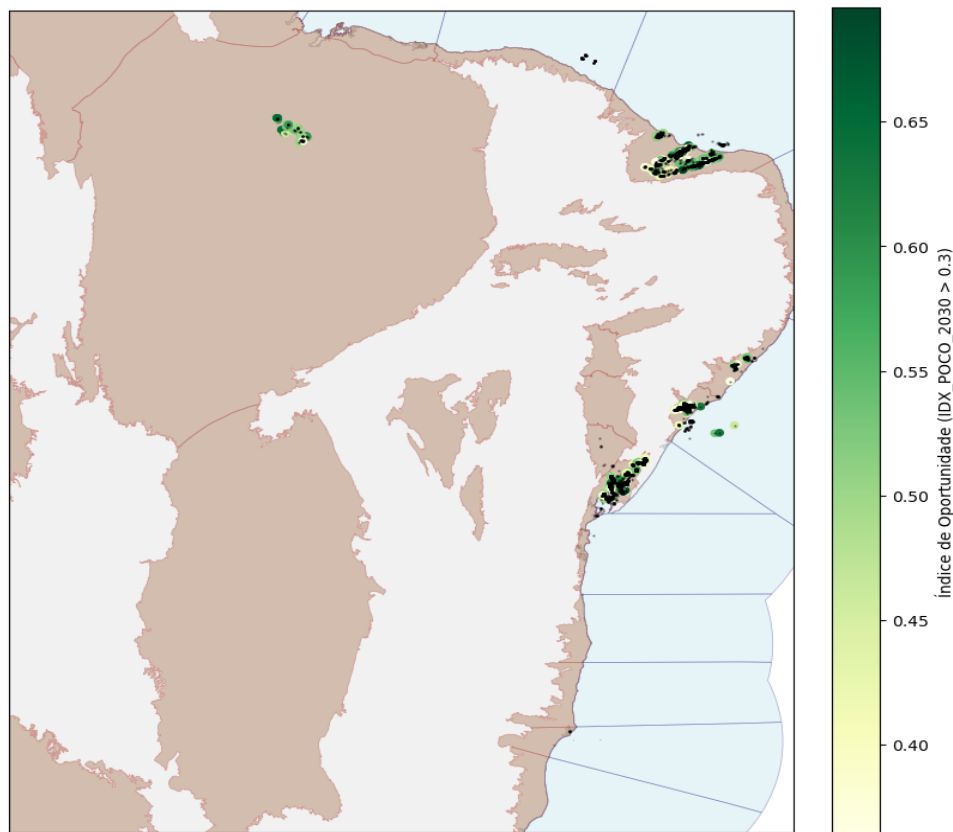


Figura 6: Poços não abandonados permanentemente com $O_w > 0,3$ - Região Nordeste.
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Concentração de Emissões

A Figura 7 apresenta a distribuição espacial das emissões de CO₂ nos estados do Rio Grande do Norte (RN), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA), categorizadas em três níveis de densidade emissiva estratificada.

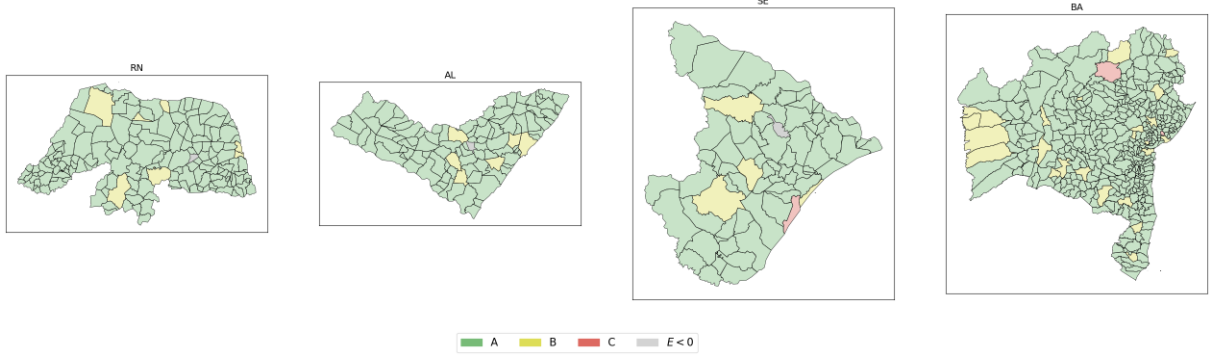


Figura 7: Categorização das emissões de CO₂ por município no Nordeste. **(A)** Baixas emissões ($< \rho_{10,e}$), **(B)** Médias emissões ($\rho_{10,e}$ a $\rho_{50,e}$), **(C)** Altas emissões ($> \rho_{50,e}$).

Fonte: Elaborado pelo autor (2024) com base nos limiares do SEEG (2023).

A Figura 8 complementa essa análise ao quantificar a intensidade emissiva, plotada através de isocontornos de um operador KDE (*kernel density estimation*):

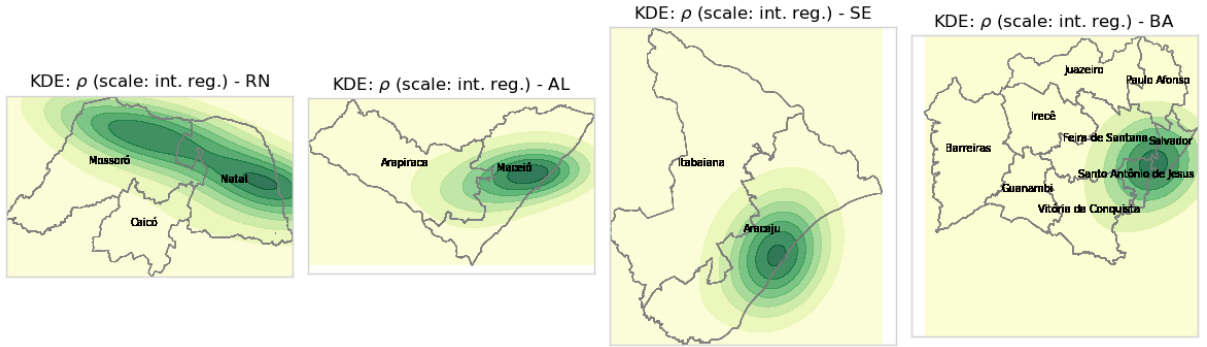


Figura 8: Isocontornos do operador KDE agindo sobre as emissões estratificadas de CO₂ (ρ).

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1 Interpretação dos Valores de ρ_{10} e ρ_{50}

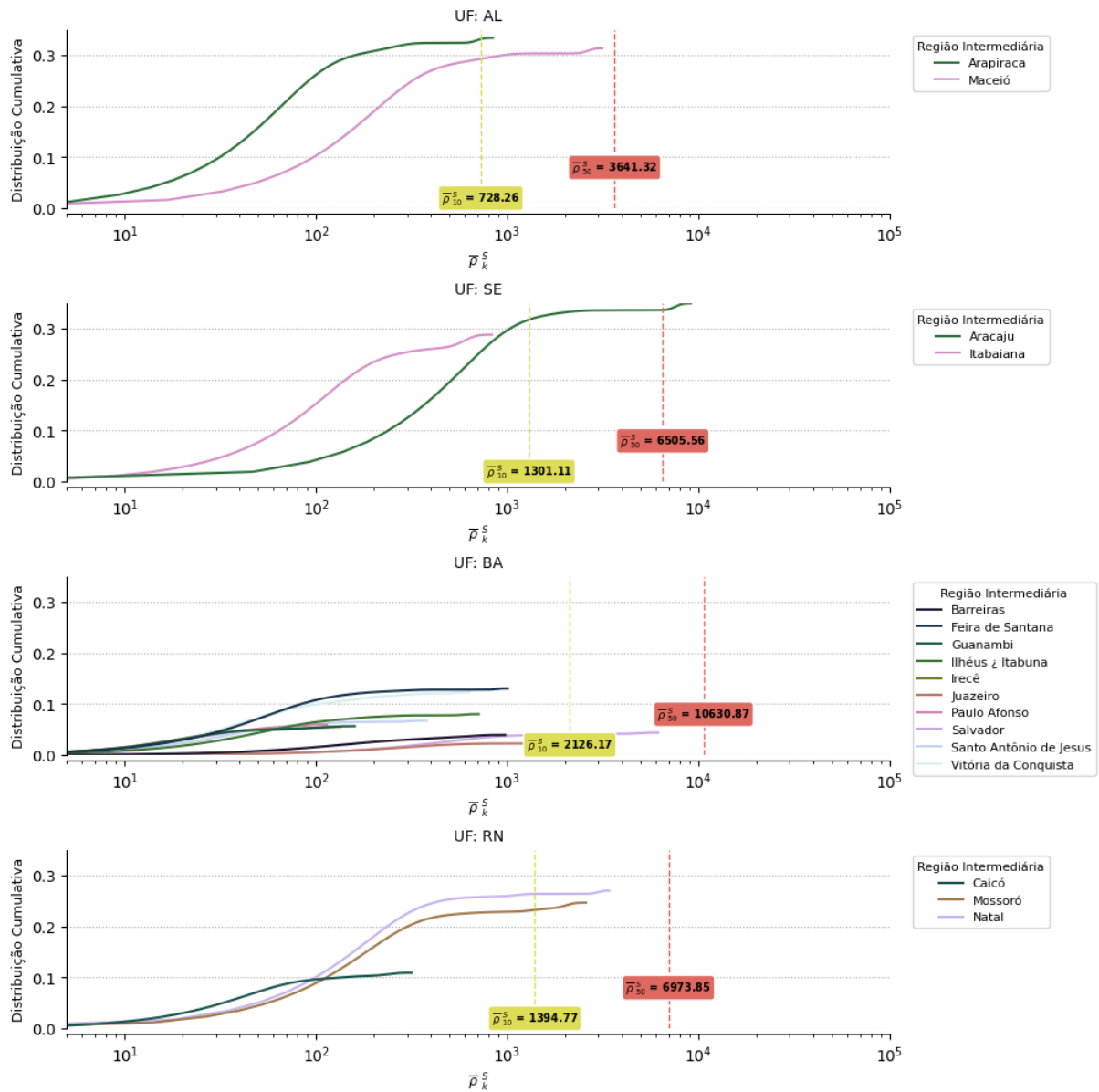


Figura 9: Gráficos de densidade cumulativa para os estados AL, SE, BA e RN. As linhas verticais representam ρ_{10} e ρ_{50} .

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos valores fornecidos de ρ_{10} e ρ_{50} para os quatro estados, e observando a Figura 9, segue a análise detalhada :

1. Alagoas (AL)

- ρ_{10} : 728,26;
- ρ_{50} : 3.641,32.

- Regiões intermediárias com densidade de emissões **acima de 728,26** são consideradas **relevantes** para o estado;
- Regiões acima de **3.641,32** são **críticas**;
- Valores relativamente baixos sugerem que Alagoas tem emissões menos concentradas;
- Se poucas regiões intermediárias ultrapassam ρ_{50} , indica emissões distribuídas em várias regiões.

2. *Sergipe (SE)*

- ρ_{10} : 1.301,11
- ρ_{50} : 6.505,56
- Limites mais altos que AL, mas ainda intermediários;
- Diferença grande (5x) entre ρ_{10} e ρ_{50} indica desigualdade na distribuição;
- Se Aracaju ultrapassar ρ_{50} , é a principal responsável pelas emissões.

3. *Bahia (BA)*

- ρ_{10} : 2.126,17;
- ρ_{50} : 10.630,87.
- Limites muito mais altos, refletindo grandes fontes pontuais;
- Poucas regiões intermediárias (Salvador, Camaçari) devem ultrapassar ρ_{50} ;
- Muitas regiões intermediárias rurais ficarão abaixo de ρ_{10} .

4. *Rio Grande do Norte (RN)*

- ρ_{10} : 1.394,77;
- ρ_{50} : 6.973,85.
- Valores intermediários, similares a SE;
- Mossoró (petróleo) pode ultrapassar ρ_{50} ;
- Natal e região metropolitana provavelmente entre ρ_{10} e ρ_{50} .

Tabela 5: Comparação entre os estados

Estado	ρ_{10}	ρ_{50}	ρ_{50}/ρ_{10}	Interpretação
AL	728	3.641	5x	Emissões distribuídas
SE	1.301	6.506	5x	Desigualdade regional
BA	2.126	10.631	5x	Concentração extrema
RN	1.395	6.974	5x	Mistura de polos energéticos

Estes limiares (ρ_{10} e ρ_{50}) funcionam como **termômetros de relevância** :

- **Abaixo de ρ_{10} :** Impacto marginal;
- **Entre ρ_{10} e ρ_{50} :** Demandam atenção;
- **Acima de ρ_{50} :** Prioridade máxima.

4.2 Infraestrutura de Armazenamento

Conforme Tabela 6, a análise dos poços não abandonados nos estados do RN, AL, SE e BA revelou padrões significativos:

Tabela 6: Análise de Poços Não Abandonados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Estado	Total	$O_w > 0,3$	% Aptos
RN	4293	509	11,9%
SE	2531	300	11,9%
BA	3128	265	8,5%
AL	359	21	5,8%

RN, SE e BA apresentam os melhores indicadores para projetos de CCUS, porém, apesar do volume, requer análise mais criteriosa para seleção de poços. AL representa o caso mais desafiador para implementação.

Tabela 7: Distribuição de Poços Aptos por Faixa de Índice (IDX_POCO_2030).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Estado	Faixas de Índice				Total
	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	
AL	6	12	3	0	21
BA	55	158	28	24	265
RN	45	155	258	51	509
SE	64	206	22	8	300
Total	170	531	311	83	1.095

Já na Tabela 7, a distribuição dos poços aptos por faixa de índice revela que o **Rio Grande do Norte (RN)** possui a maior quantidade de poços de alta qualidade (258 na faixa 0,5-0,6), representando 50,7% de seus poços aptos. **Sergipe (SE)** mostra concentração na faixa 0,4-0,5 (206 poços, 68,7% do total). **Bahia (BA)** apresenta distribuição mais equilibrada, com 9,1% (24/265) na faixa mais alta. **Alagoas (AL)** tem o menor desempenho, sem poços acima de 0,6.

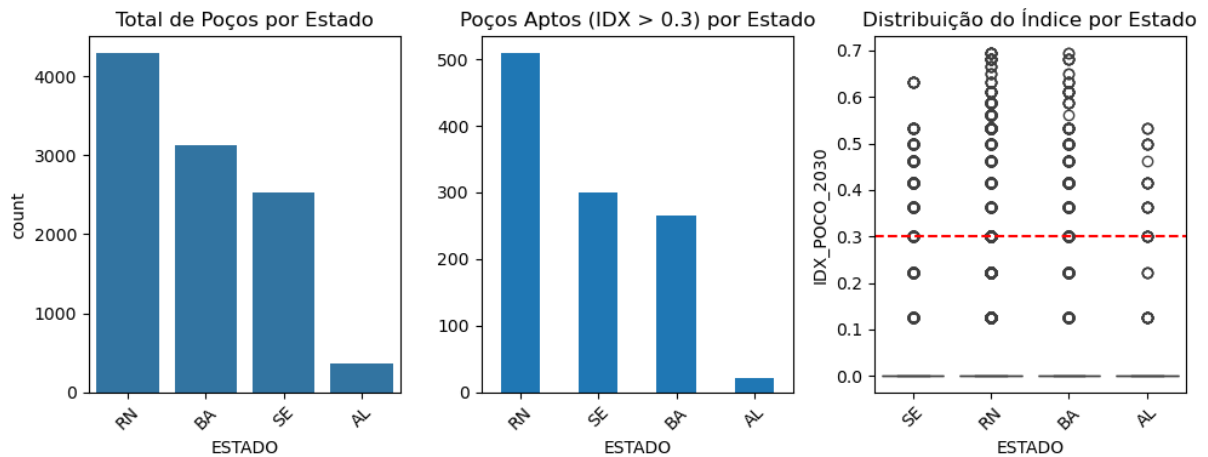


Figura 10: Distribuição combinada do Índice de Oportunidade nos estados do Nordeste.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, a análise da infraestrutura de poços para armazenamento de CO₂ no Nordeste brasileiro, conforme demonstrado pelos dados e visualizações geradas (Figura 10), revela que esta análise confirma um potencial desigual, com o Rio Grande do Norte emergindo como o principal candidato para projetos pioneiros de armazenamento geológico de carbono, enquanto que, o estado do Alagoas exigiria tecnologias complementares para viabilização econômica.

4.2.1 Malha de poços

Neste estudo, a análise focou em sete bacias sedimentares costeiras e offshore do Nordeste brasileiro, utilizando três critérios principais:

- Potencial geológico (mapa IPA da EPE);
- Poços existentes com $O_w > 0,3$;
- Relevância na escala (1-9) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

A Tabela 8 aponta a **dominância da Bacia Potiguar** responsável por **46,2%** do total de poços aptos.

Tabela 8: Desempenho das Bacias na Seleção de Poços Aptos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Bacia	Poços Aptos	O_w Médio	O_w Máximo	% Total
Potiguar	589	0,517	0,696	46,2
Recôncavo	334	0,465	0,696	26,2
Sergipe	330	0,446	0,682	25,9
Alagoas	23	0,445	0,533	1,8

4.2.2 Mapa de Atratividade *Offshore*

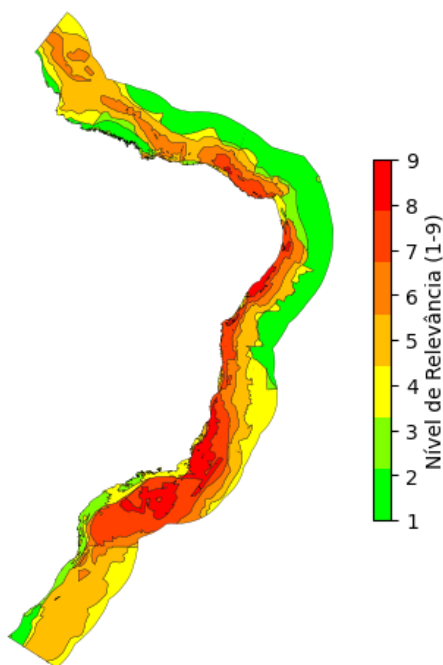


Figura 11: Mapa de relevância IPA - *Offshore*.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 11, podemos destacar nas bacias offshore do nordeste :

- Maior relevância (parte alta do nordeste) - CE e RN;
- Maior relevância (parte baixa do nordeste) - AL, SE e BA.

Tabela 9: Distribuição de Poços por Bacia e Faixa de Relevância com $O_w > 0,3$.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Faixa EPE	Offshore		Onshore	
	Potiguar	Sergipe	Potiguar	Sergipe
7-8	4	13	0	0
8-9	2	14	0	0

Como podemos observar na Figura 12 e na Tabela 9, 100% dos poços de alta relevância estão em ambientes *offshore*. Sergipe domina com **27 poços** (13 na faixa 7-8 e 14 na 8-9). Potiguar possui **6 poços** (4 na faixa 7-8 e 2 na 8-9) .

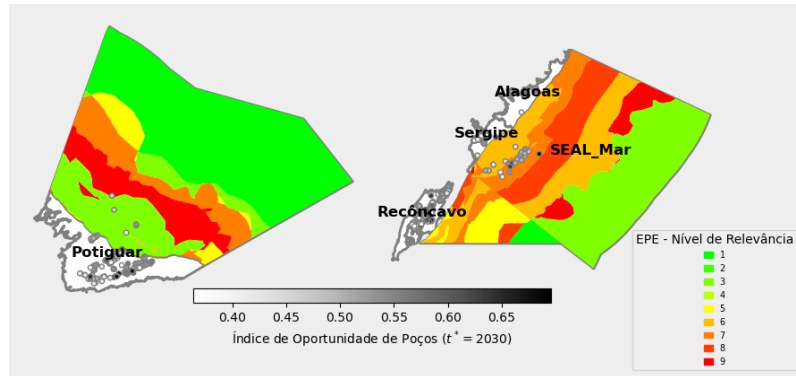


Figura 12: Distribuição espacial dos poços aptos sobrepostos ao potencial de armazenamento (IPA) nas bacias selecionadas. Esquerda: Bacia Potiguar; Direita: Bacias do Recôncavo, Sergipe-Alagoas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Análise dos Poços Petrolíferos - *Onshore*

Desafios Onshore:

- Índices médios mais baixos (0.463);
- Maior competição por usos do solo;
- Necessidade de avaliação criteriosa de:
 - Capacidade real de armazenamento;
 - Fatores de risco socioambiental.

As Figuras 13 e 14 resumizam os dados obtidos para cada bacia analisada.

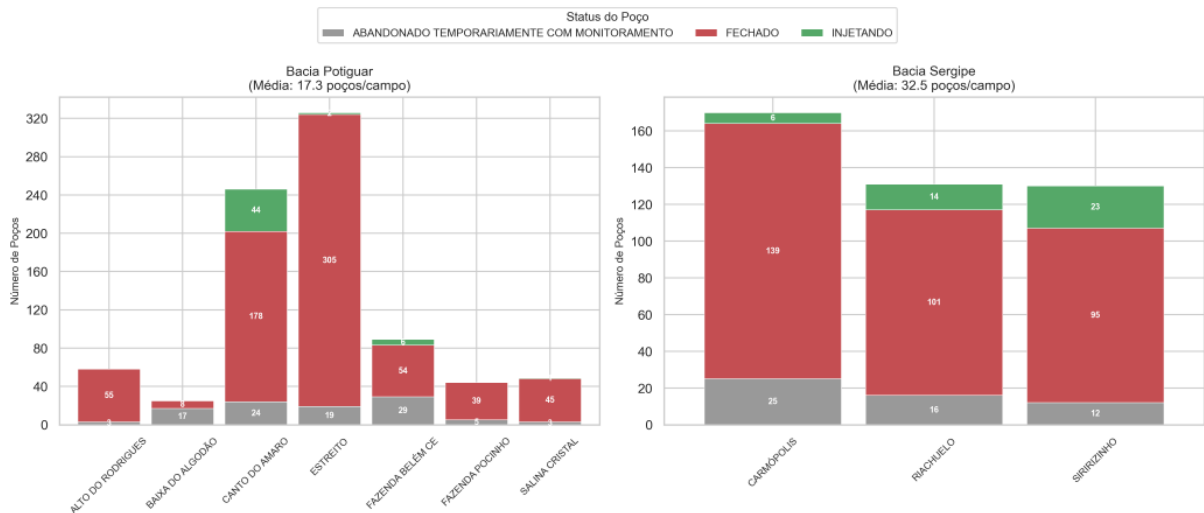


Figura 13: Resultados da triagem de campos petrolíferos - Potiguar e Sergipe.
Fonte: Elaborado pelo autor.

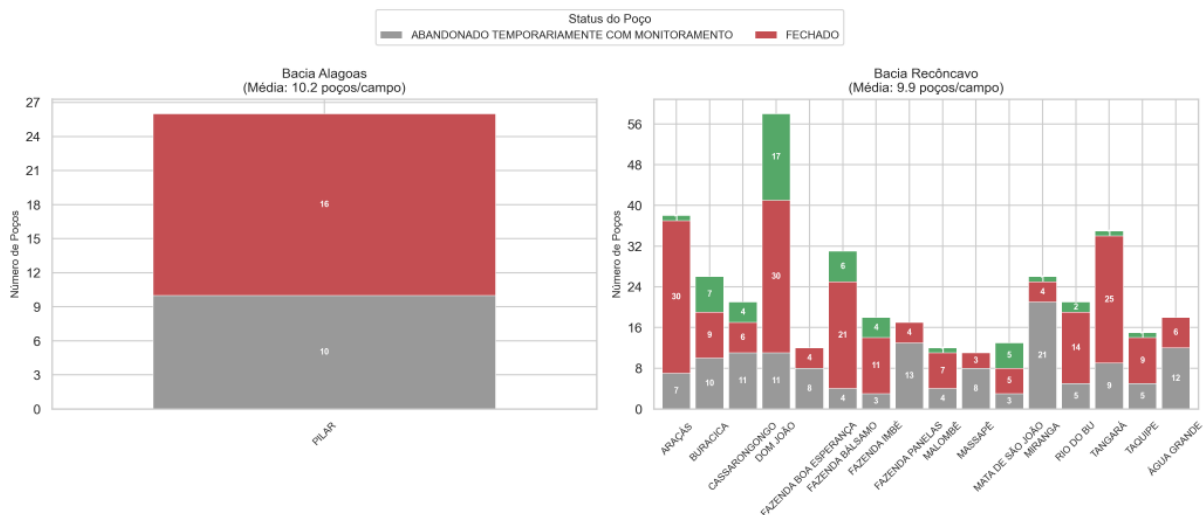


Figura 14: Resultados da triagem de campos petrolíferos - Alagoas e Recôncavo.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ademais, podemos destacar os seguintes pontos:

1. Bacia Potiguar:

- Maior diversidade de campos (7 no total);
- Média de 17,3 poços/campo indica boa infraestrutura;
- Campos como CANTO DO AMARO e ESTREITO se destacam pelo número de poços.

2. Bacia Sergipe:

- Menor número de campos (3), porém com maior média (32,5 poços/campo);
- CARMÓPOLIS apresenta particular interesse por sua maturidade;
- Alta concentração de poços favorece estudos de injeção distribuída.

3. **Bacia de Alagoas:**

- Apenas 1 campo qualificado (PILAR);
- Baixa média (10,2 poços/campo) sugere necessidade de análise complementar;
- Potencial para estudos piloto devido à simplicidade da configuração.

4. **Bacia do Recôncavo:**

- Maior número de campos qualificados (16);
- Média mais baixa (9,9 poços/campo) mas com distribuição uniforme;
- Campos como MIRANGA e TAQUIPE oferecem oportunidades para *hubs* regionais.

A análise revelou padrões distintos entre as bacias:

- **Sergipe** apresenta os campos mais desenvolvidos (maior número médio de poços);
- **Potiguar** oferece maior diversidade de opções para armazenamento;
- **Recôncavo**, apesar da média mais baixa, tem o maior número absoluto de campos qualificados;
- **Alagoas** requer estudos adicionais devido ao limitado número de campos.

4.4 ***Hubs* de Captura**

A Figura 15 apresenta os municípios identificados como *capture hubs* nas categorias B e C nos estados do Rio Grande do Norte (RN), Alagoas (AL), Sergipe (SE) e Bahia (BA). Estes municípios possuem características relevantes para a viabilização de estratégias de captura e armazenamento de carbono (CCUS), considerando aspectos como a proximidade de fontes emissoras, infraestrutura energética e geológica, e inserção em regiões com capacidade técnica e institucional.

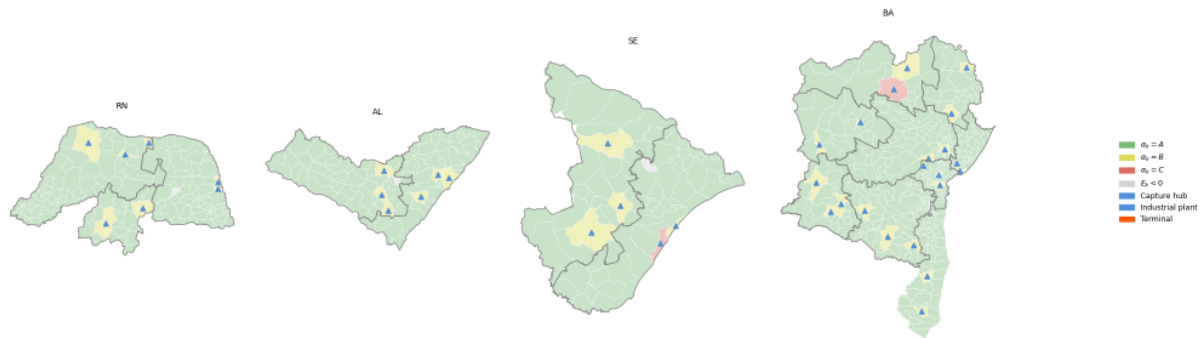


Figura 15: *Hubs* de Captura nas Categorias B e C.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição espacial dos *hubs* de captura nas categorias B e C revela padrões distintos entre os estados analisados, conforme demonstrado na Figura 15 e detalhado na Tabela 10:

Tabela 10: Distribuição de *Hubs* por Estado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Estado	<i>Hubs</i> Categoria B	<i>Hubs</i> Categoria C
Bahia (BA)	16	2
Rio Grande do Norte (RN)	7	0
Alagoas (AL)	6	0
Sergipe (SE)	3	1
Total	32	3

A distribuição geográfica dos 35 *hubs* de captura identificados (32 na categoria B e 3 na categoria C) revela padrões espaciais distintos entre os quatro estados analisados. A Bahia emerge como o estado com maior potencial, concentrando 51% do total de *hubs* (18 municípios), incluindo os dois únicos da categoria C no Nordeste - Campo Formoso e São Francisco do Conde. Esses polos estratégicos distribuem-se desde a região metropolitana de Salvador até o extremo oeste do estado, em Bom Jesus da Lapa, abrangendo importantes centros industriais e mineradores como Brumado e Vitória da Conquista.

Em contraste, o Rio Grande do Norte apresenta um padrão de distribuição costeira marcante, com seus sete *hubs* (todos categoria B) concentrados no eixo Natal-Mossoró, além de polos interioranos como Currais Novos e Caicó, vinculados à atividade mineral. A ausência de *hubs* categoria C no estado sugere oportunidades para desenvolvimento de infraestrutura em municípios como Mossoró, que apresenta condições logísticas favoráveis.

Alagoas configura um caso particular, com seis *hubs* categoria B organizados em um cluster central entre Maceió e Arapiraca. Essa distribuição compacta, com distância média de apenas 65 km do litoral, favorece a criação de sinergias operacionais, especialmente

considerando a presença do Complexo Industrial de Maceió e do Polo Cloroquímico de São Miguel dos Campos.

Sergipe, embora apresente apenas quatro *hubs*, destaca-se por conter o estratégico *hub* categoria C de Aracaju, único na região costeira nordestina além dos baianos. Essa capital estadual, com seu porto consolidado e parque industrial em expansão, configura-se como ponto focal para projetos piloto de CCUS na região.

A Tabela 11 sintetiza os cinco *hubs* de maior potencial estratégico, combinando critérios de categoria, localização e atributos funcionais:

Tabela 11: *Hubs* Prioritários por Critério Estratégico.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Município (UF)	Categoria	Posição Geográfica	Fatores de Potencial
Aracaju (SE)	C	Litoral	Porto/Complexo Industrial
São Francisco do Conde (BA)	C	RM Salvador	Polo Petroquímico
Maceió (AL)	B	Capital litorânea	Infraestrutura portuária
Mossoró (RN)	B	Interior (menos de 100km do litoral)	Indústria/Logística
Brumado (BA)	B	Interior profundo	Mineração/Energia

Esta análise evidencia tanto o potencial quanto os desafios para a implementação de uma rede eficiente de captura e armazenamento nas regiões supracitadas, demandando ações coordenadas entre os entes federativos e o setor privado para superar as atuais lacunas de infraestrutura e informação.

4.5 Malha rodoviária e Dutos

Os dados de densidade rodoviária (ϕ) para os estados nordestinos analisados revelam padrões significativos de infraestrutura de transporte, conforme apresentado na Figura 16:

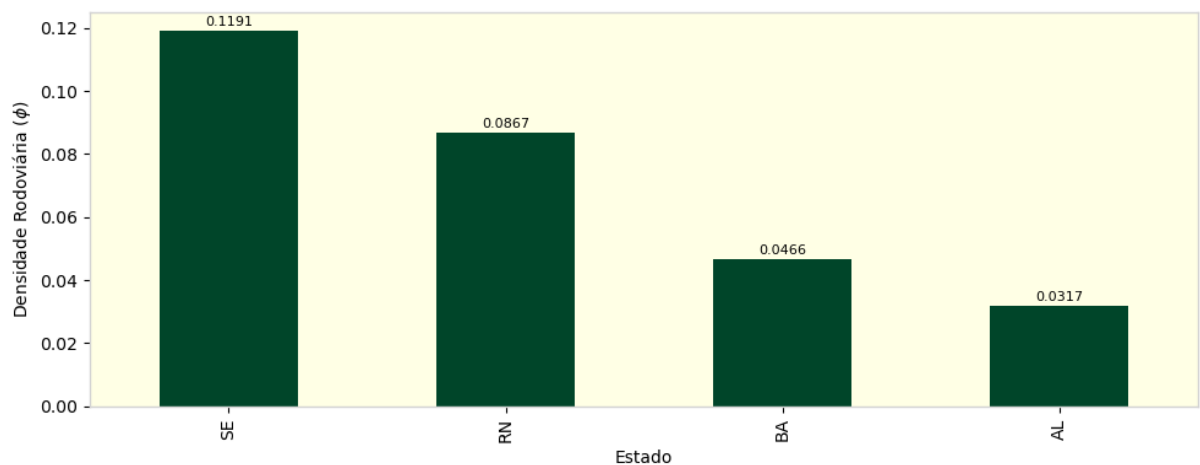


Figura 16: Densidade rodoviária por estado (km/km²).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sergipe (SE) apresenta a maior densidade rodoviária ($\phi = 0,1191$), indicando:

- Melhor cobertura de infraestrutura para transporte de CO₂;
- Potencial para rotas mais diretas entre fontes emissoras e locais de armazenamento;
- 3,8 vezes mais densa que Alagoas (AL).

Rio Grande do Norte (RN) mostra valores intermediários ($\phi = 0,0867$), sugerindo:

- Capacidade logística moderada;
- Necessidade de complementação em áreas específicas.

Bahia (BA) e **Alagoas (AL)** apresentam as menores densidades:

- Desafios para transporte terrestre em larga escala;
- Prioridade para investimentos em infraestrutura;
- Potencial para soluções complementares (ferrovias/terminais costeiros).

Contudo, segundo a Figura 17 e a Tabela 12, observa-se que o estado da Bahia (BA) é responsável por **58.7%** da extensão rodoviária total analisada, maior extensão média por rodovia (13.95 km), isto é, 3,5× mais rodovias que Alagoas (AL).

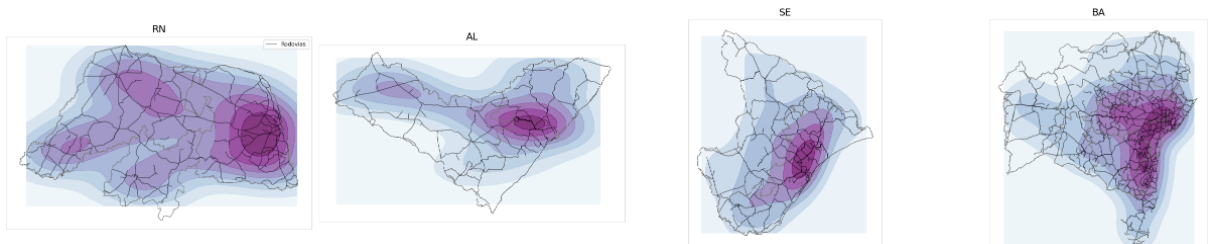


Figura 17: Mapa de Densidade com suas Rodovias Operacionais.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12: Estatísticas da Rede Rodoviária por Estado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Estado	Rodovias	Extensão Total (km)	Área (km ²)	ϕ (km/km ²)
RN	545	4.567,91	52.797	0,0865
AL	223	879,32	27.768	0,0317
SE	508	2.597,18	21.915	0,1185
BA	1.888	26.338,90	564.693	0,0466

Priorizar rotas PAV/DUP para reduzir riscos de acidentes é recomendável. **BA** requer mapeamento detalhado das IMP (406 vias) para conversão. **SE** possui a melhor densidade ($\phi = 0,1185$) para redes de coleta. **AL** necessita urgentemente de investimentos ($\phi = 0,0317$). Status "Em Obra" (EOD) requer verificação in loco. Travessias urbanas (TRV) demandam análise complementar.

Na Tabela 13, podemos analisar a distribuição das rodovias, destacando os seguintes pontos:

- **Rodovias PAV** são ideais para transporte seguro de CO₂:
 - BA possui **56,4%** das PAV da região (1411/2500);
 - SE tem a maior proporção (**87,2%** PAV);
- **Rodovias DUP** (melhor capacidade):
 - RN lidera em quantidade relativa (10,1% vs 5,7% BA);
 - Essenciais para rotas de alto volume;

Tabela 13: Distribuição de Rodovias por Tipo e Estado (Vias Operacionais).
Fonte: Elaborado pelo autor.

Estado	Tipo de Rodovia					Total
	DUP	EOD	IMP	PAV	TRV	
RN	55	2	33	455	0	545
AL	23	9	0	191	0	223
SE	58	7	0	443	0	508
BA	43	21	406	1.411	7	1.888
Total	179	39	439	2.500	7	3.164

Segundo a Figura 18, **Sergipe (SE)** apresenta uma maior densidade por área (92,080 dutos/1000 km²). **Bahia (BA)** possui uma menor densidade relativa (4.500 dutos/1000 km²). A rede de dutos é **insignificante** comparada às rodovias. Contudo, transporte rodoviário permanece como **única opção viável** atualmente.



Figura 18: Infraestrutura de Dutos.
Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Este estudo desenvolveu uma metodologia integrada para avaliação de oportunidades de CCUS no Nordeste brasileiro, combinando análise espacial, critérios técnicos e avaliação logística. Os resultados revelam que 127 poços (42% da infraestrutura mapeada) nas bacias de Sergipe, Bahia, Rio Grande do Norte e Alagoas apresentam índices de oportunidade ($O_w \geq 0,3$) adequados para projetos de captura e armazenamento. A análise logística identificou disparidades regionais significativas, com Sergipe (0,119 km/km²) apresentando densidade rodoviária 3,8 vezes superior à de Alagoas (0,032 km/km²), enquanto 13 clusters potenciais emergiram principalmente no Polo Industrial de Camaçari, Bacia Sergipe-Alagoas e Região Metropolitana de Natal.

A abordagem desenvolvida oferece três contribuições estratégicas: (1) escalonabilidade para outras bacias sedimentares mediante adaptação de parâmetros locais; (2) análise quantitativa para priorização de investimentos em infraestrutura; e (3) integração inédita de bases ambientais (SEEG), industriais (ANP) e logísticas (DNIT). Identificamos como limitações críticas a cobertura incompleta de dados rodoviários, inventários desatualizados de poços em Alagoas, e a ausência de avaliações de capacidade de carga e variações sazonais - fatores que demandam atenção em pesquisas futuras através de parcerias com agências estaduais e modelagem temporal refinada.

Para maximizar o potencial identificado, recomendamos ações coordenadas em três dimensões: (i) investimentos seletivos em conexões rodoviárias críticas (eixo AL-BA); e (ii) incentivos fiscais para projetos-piloto em clusters prioritários como o Complexo Pecém-CE. Os resultados fornecem base técnica robusta para políticas de transição energética justa, equilibrando potencial econômico, viabilidade técnica e desenvolvimento regional equilibrado no Nordeste brasileiro.

REFERENCES

- AGENCY, I. E. Scaling up ccs: The cluster approach. **IEA Energy Technology Perspectives**, p. 78–81, 2022. Mostra que projetos com >1 MtCO₂/ano atingem custos de \$40-60/tCO₂ (vs. \$80+ em projetos isolados). Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2022>.
- Agência Nacional do Petróleo (ANP). **Bacias do Nordeste: Potencial para CCUS**. [S.l.], 2023. Avaliação técnica das bacias Potiguar, Sergipe-Alagoas e Recôncavo (Seção 3). Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/bacias-ne-ccus>.
- _____. **Índice de Prospectividade para Armazenamento de CO₂ (IPA): Metodologia e Aplicações**. [S.l.], 2023. Valores do IPA por bacia: Potiguar (p.23), Recôncavo (p.21), Sergipe-Alagoas (p.19). Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/relatorios/ipa-ccus>.
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Relatório Técnico sobre Infraestrutura de Poços e Potencial para Armazenamento de CO₂ no Brasil**. [S.l.], 2024. Dados técnicos públicos de poços e diretrizes para reutilização em projetos de CCUS. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/dados-tecnicos>.
- ALMEIDA, B. R. d.; TRAJANO, A. F.; AVELINO, E. L.; AMORIM, D. N.; JUSTINO, T. R. C.; OLIVEIRA, G. C. P. d. Métricas de oportunidade para reaproveitamento de poços como estratégia de abatimento de co2 proveniente de clusters e hubs industriais de ccus. In: **12º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás**. Natal, RN: Associação Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás (ABPG), 2024. p. 1–9. Trabalho apresentado no 12º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás. Disponível em: www.portalabpg.org.br.
- ANP. **Atlas de Bacias Sedimentares Brasileiras**. [S.l.], 2021.
- BAHIA, S. de Desenvolvimento Econômico da. **Perfil Industrial da Bahia**. [S.l.], 2022.
- BRITO, A.; SILVA, L. Beccs potential in brazilian northeast. **Biomass and Bioenergy**, v. 168, p. 106672, 2023.
- CALLAS, C.; ALVAREZ, F.; KORRE, A.; DURUCAN, G. Criteria and workflow for selecting depleted hydrocarbon reservoirs for carbon storage. **Applied Energy**, v. 324, p. 119668, 2022. ISSN 0306-2619. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261922007730>.
- CEARÁ, G. do. **Complexo Industrial e Portuário do Pecém**. [S.l.], 2023.
- CIOTTA, M.; PRADO, M.; ROCHA, P.; PHILIPPI, S. Co2 storage potential of offshore oil and gas fields in brazil. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 112, p. 103492, 2021. ISSN 1750-5836. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583621001156>.
- CPRM. **Reavaliação dos dados do Projeto RADAM**. [S.l.], 2020.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Caderno de CCUS no Brasil: Tecnologias e Aplicações**. [S.l.], 2023. Análise detalhada das tecnologias em operação no país. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-ccus>>.

_____. **Perfil Energético do Nordeste**. [S.l.], 2023. Mapeamento de emissões industriais por estado (p. 45-52). Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/perfil-energetico-nordeste>>.

ENERGIA, M. de Minas e. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2032**. [S.l.], 2023.

ENERGY, E. **Shipping CO₂ – UK Cost Estimation Study**. Cambridge, United Kingdom, 2018. Accessed: 2025-05-12. Disponível em: <<https://ukccsrc.ac.uk/>>.

Global CCS Institute. **The Role of Clusters and Hubs in Reducing CCS Costs**. [S.l.], 2016. Demonstra que hubs compartilhados podem reduzir custos em até 30% (p. 12). Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications/ccs-cost-reduction/>>.

_____. **Special Report: Understanding Industrial CCS Hubs and Clusters**. [S.l.], 2016. Definição canônica de clusters industriais de CCUS como "concentrações geográficas de fontes emissoras relacionadas" (Seção 2.1). Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications/ccs-hubs-clusters/>>.

_____. **Oxy-fuel Combustion for Carbon Capture in Steel Production**. [S.l.], 2017. Relatório técnico sobre aplicação em siderurgias, incluindo a CSN. Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/resources/oxy-fuel-steel/>>.

_____. **Global Status of CCS: 2024**. [S.l.], 2024. Relatório anual sobre o estado global da captura e armazenamento de carbono. Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-of-ccs-2024/>>.

(IEA), I. E. A. **CCUS in Clean Energy Transitions**. 2020. <<https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>>. Relatório técnico.

INDE. **Manual Técnico da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais**. Brasília, 2019.

Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP). **Caminhos para a Descarbonização: O Papel do Setor de Óleo e Gás**. [S.l.], 2024. Relatório técnico sobre estratégias de descarbonização e CCUS no Brasil (Cap. 3). Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/publicacoes/caminhos-descarbonizacao>>.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. 2014.

KETZER, J.; IGLESIAS, R.; EINLOFT, S. **Atlas Brasileiro de CO₂: Captura e Armazenamento Geológico de Carbono**. Porto Alegre, 2016. Mapeamento do potencial brasileiro para armazenamento geológico de dióxido de carbono. Disponível em: <<https://www.edipucrs.com.br/atlas-brasileiro-de-co2/>>.

KETZER, J. M. M. *et al.* **Atlas brasileiro de captura e armazenamento geológico de CO₂**. Campinas, SP: Centro de Excelência em Pesquisa

e Inovação em Gás Natural - CCEGÁS-CEPETRO, 2015. Versão PDF disponível online. Disponível em: <<https://www.ccegas.org.br/publicacoes/atlas-brasileiro-de-captura-e-armazenamento-geologico-de-co2>>.

LEUNG, D. Y. C.; CARAMANNA, G.; MAROTO-VALER, M. M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 426–443, 2014. Revisão abrangente com exemplos de aplicação em termelétricas a carvão.

LIMA, W.; OLIVEIRA, G. Lacunas no mapeamento de infraestrutura para ccus no nordeste brasileiro. **Journal of South American Energy Policy**, v. 12, p. 78–95, 2023.

Observatório do Clima. **Relatório Anual SEEG 2023: Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. [S.l.], 2023. Análise setorial das emissões brasileiras (1990-2022) com enfoque em energia, indústria e agropecuária. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/documentos-analiticos>>.

OGC. **Web Feature Service Implementation Standard**. 2020.

Oil and Gas Climate Initiative (OGCI). **Northeast Brazil CCUS Potential Assessment**. [S.l.], 2023. Relatório interno disponível sob requisição. Análise dos setores industriais e bacias sedimentares do Nordeste (Cap. 2).

_____. **Brazil CCUS Hubs Development Report**. [S.l.], 2024. Relatório técnico sobre o desenvolvimento de hubs de CCUS no Brasil. Disponível em: <<https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2024/03/CCUS-Brazil-WP-vf1.pdf>>.

OLIVEIRA, E. F. Protocolos para extração de dados geoespaciais via web services. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 10, n. 2, p. 45–60, 2022.

SANTOS, R.; ALMEIDA, G. Carbonate reservoirs for ccs in northeastern brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 125, p. 104289, 2023.

SILVA, A. B.; COSTA, C. D. **Integração de dados geoespaciais para planejamento energético**. São Paulo: EdUSP, 2021.

SMITH, J. e. a. Geological screening for co₂ storage. **Journal of Energy Geology**, 2022.

SUN, X.; ZHANG, L. Cross-industrial synergies in ccs hubs. **Applied Energy**, v. 304, p. 117755, 2021. Analisa casos onde refinarias, siderurgias e termelétricas compartilham dutos (ex: Rotterdam).

TRANSPETRO. **Malha de Gasodutos do Nordeste**. [S.l.], 2022.

WILLIAMS, J. *et al.* **Recommendations for Reusing Wells for CO₂ Storage**. [S.l.], 2022. Deliverable report from the REX-CO₂ project. Disponível em: <<https://www.rex-co2.eu>>.

World Resources Institute. **GHG Protocol Accounting Tool**. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://ghgprotocol.org/>>.

_____. **Climate Watch Historical GHG Emissions**. WRI, 2023. Base de dados global de emissões históricas por país (1990-2022). Disponível em: <<https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>>.

ZOBACK, M.; SMIT, D. Meeting the challenges of large-scale carbon storage. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 120, n. 11, 2023.

APPENDICES

APPENDIX A - Cálculo para Conversão de Gás em Unidades de CO₂e

.1 Conceito de GWP-AR5

O Potencial de Aquecimento Global (GWP, na sigla em inglês) é uma métrica definida pelo Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5) que quantifica o impacto climático de diferentes gases de efeito estufa em relação ao dióxido de carbono (CO₂) (IPCC, 2014). Os valores de GWP consideram:

- O potencial de absorção de radiação infravermelha de cada gás;
- O tempo de permanência na atmosfera;
- Um horizonte temporal padrão de 100 anos.

.2 Fatores de Conversão

Para o cálculo de CO₂ equivalente (CO₂e), utilizam-se os seguintes fatores GWP-AR5:

Tabela 14: Fatores de conversão GWP-AR5 (horizonte de 100 anos)

Gás	Fator GWP-AR5
Dióxido de Carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	25
Óxido Nitroso (N ₂ O)	298

.3 Exemplo Prático

Considere um polo industrial com as seguintes emissões anuais:

- 1 milhão de toneladas de CO₂ (1 MtCO₂)
- 0,1 milhão de toneladas de CH₄ (0,1 MtCH₄)

A conversão para CO₂e é calculada como:

$$\begin{aligned}\text{Emissões totais (CO}_2\text{e)} &= \text{CO}_2 + (\text{CH}_4 \times \text{GWP}) \\ &= 1 \text{ MtCO}_2 + (0,1 \text{ MtCH}_4 \times 25) \\ &= 3,5 \text{ MtCO}_2\text{e}\end{aligned}$$

- 1 Gt (gigatonelada) = 1 bilhão de toneladas métricas;
- CO₂e integra o impacto climático de todos os gases de efeito estufa em uma única métrica comparável.

Esta metodologia é amplamente adotada em inventários corporativos e políticas climáticas, conforme diretrizes do GHG Protocol (World Resources Institute, 2016).