

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Métricas de oportunidade para reaproveitamento de poços como estratégia de abatimento de CO₂ proveniente de clusters e hubs industriais de CCUS

AUTORES:

Beatriz Rodrigues de Almeida; Adriel Ferreira Trajano; Erlon Lacerda Avelino; Davi Nasiasene Amorim; Thiago Rodrigues Cruz Justino; Gustavo Charles Peixoto de Oliveira

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

MÉTRICAS DE OPORTUNIDADE PARA REAPROVEITAMENTO DE POÇOS COMO ESTRATÉGIA DE ABATIMENTO DE CO₂ PROVENIENTE DE CLUSTERS E HUBS INDUSTRIAIS DE CCUS

Resumo

Injeção e armazenamento permanente de CO₂ são operações da cadeia de CCUS que visam neutralizar emissões em setores de difícil abatimento, tais como energia e indústria. Nos últimos anos, um novo horizonte de oportunidades começou a se abrir no Brasil para o setor de óleo e gás em resposta às tendências globais pela descarbonização de operações. Neste cenário, surge a necessidade de se identificar potenciais *clusters* e *hubs* de CCUS no país. *Clusters* e *hubs* industriais de CCUS são arranjos geográficos compostos de fontes emissoras concentradas, um arcabouço logístico para coleta e transporte do CO₂ e contêineres subterrâneos com alta capacidade de armazenamento do gás. O objetivo deste trabalho é identificar *clusters* e *hubs* de CCUS a partir de diversas métricas de oportunidade e da hipótese de reaproveitamento da infraestrutura nacional de poços de petróleo como sumidouros de CO₂. Através da pré-seleção de quatro bacias de alta prospectividade, analisamos a densidade de emissões por território, viabilidade de transporte e oportunidade operacional temporal da infraestrutura legada de poços, definindo potenciais arranjos organizáveis com base em regiões geográficas intermediárias. Os procedimentos metodológicos contemplaram: modelos matemáticos para *clusters* e *hubs*, triagem de municípios por densidade de emissões de CO₂; clusterização e análise de dados geoespaciais. Apresentamos uma visão inicial sobre a integração da infraestrutura legada para armazenamento de CO₂ em bacias de alta prospectividade em SP, RJ, BA e RN. De acordo com a metodologia e hipóteses empregadas, foram identificados 57 clusters locais de captura e 13 clusters locais de armazenamento, ambos com seus respectivos hubs, distribuídos pelas 29 regiões intermediárias que dividem os quatro estados analisados. Esperamos que este trabalho preliminar contribua para o desenvolvimento de projetos escaláveis de armazenamento geológico de carbono no país, para a avaliação da atratividade da infraestrutura legada de poços e para incentivar novos nichos de atividade econômica para players do setor de óleo e gás.

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

Abstract

Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) involve operations like injecting and permanently storing CO₂ to reduce emissions from hard-to-abate sectors such as energy and industry. In recent years, a new range of opportunities has emerged in Brazil's oil and gas sector in response to global trends towards decarbonizing operations. This context has created the need to identify potential CCUS clusters and hubs within the country. CCUS industrial clusters and hubs are geographic arrangements consisting of concentrated emission sources, a logistical framework for collecting and transporting CO₂, and underground containers with high storage capacity for the gas. The aim of this paper is to identify CCUS clusters and hubs based on various opportunity metrics and the hypothesis of repurposing the national oil well infrastructure as CO₂ sinks. By pre-selecting four highly prospective basins, we analyze the emission density by area, transport feasibility, and the temporal operational opportunity of existing well infrastructure. We define potential arrangements based on intermediate geographic regions. The methodological procedures included: mathematical models for clusters and hubs, screening municipalities based on CO₂ emission density, and geospatial data analysis and clustering. We present an initial overview of the integration of legacy infrastructure for CO₂ storage in high-prospectivity basins in SP, RJ, BA, and RN. According to the methodology and hypotheses employed, 57 local capture clusters and 13 local storage clusters were identified, each with their respective hubs, distributed across the 29 intermediate regions that divide the four analyzed states. We hope that this preliminary work will contribute to the development of

scalable geological carbon storage projects in the country, to the evaluation of the attractiveness of legacy well infrastructure, and to encourage new economic activity niches for players in the oil and gas sector.

Keywords: decarbonization, clusters and hubs, well repurposing, geological carbon storage.

1. Introdução

Na esteira do *momentum* global de propostas para os desafios da descarbonização, o setor de óleo e gás (O&G) busca equilibrar as demandas de sua cadeia produtiva com as necessidades ambientais e climáticas. De forma ampla, o setor de energia hoje aplica o conceito de “transição energética justa” para fazer associação a critérios e medidas que levem à mitigação de emissões de gases de efeito estufa provenientes de suas operações sem que a sustentabilidade e a segurança energética da sociedade sejam deterioradas. Entre as iniciativas da transição energética, o desenvolvimento de tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS, em inglês) estão entre as mais promissoras para se atingir as metas de neutralidade e reduzir as emissões de difícil abatimento oriundas de grandes indústrias e fontes pontuais (BOUCKAERT et al., 2021).

O armazenamento geológico de CO₂, acompanhado de técnicas de seleção e qualificação de pontos de injeção (CALLAS; 2022), é um exemplo de tecnologia com potencial distintivo para o setor de O&G, dada a capacidade de armazenamento de reservatórios depletados (ZOBACK; 2023, GCCSI 2022). Não surpreendentemente, os campos do pré-sal bateram recordes em reinjeção de CO₂ em 2022 mesmo operando com emissões totais inferiores à média mundial de 9,5 kgCO₂e¹. O Brasil possui capacidade de armazenamento de CO₂ atrativa devido às bacias sedimentares que cobrem o território nacional em mar e terra (KETZER et al., 2015; GOULART et al., 2020) e estimada em 3121 MtCO₂ (CIOTTA, 2021), apenas nos campos *offshore*. Por este motivo, há no país um horizonte de novas oportunidades em CCUS para o setor de O&G.

Em 2023, foram reportados 115 projetos de CCUS no mundo (GCCSI; 2023). No Brasil, a cadeia ainda está em consolidação regulatória (STM/ANP; 2024) e requererá incentivos e investimentos em P&D (CCSBR; 2023), mas é reconhecidamente indispensável para a economia brasileira avançar na transição energética (IBP; 2024)². Projetos de hubs integrados, próximos a zonas emissoras e capazes de absorver as emissões de múltiplas fontes devem dar a tônica para o setor de O&G nos próximos anos, como aventa o projeto-piloto Cabiúnas, localizado na cidade de Macaé-RJ³.

Clusters de CCUS são concentrações geográficas de fontes emissoras relacionadas que operam em um determinado setor. *Hubs* podem ser definidos como pontos de coleta, distribuição ou destinação do CO₂ mitigável (GCCSI 2016). Ambos constroem redes de conexão entre emissores e locais de armazenamento (SUN, 2021), configurando-se mediante a existência de infraestrutura compartilhada, emissões concentradas e capacidade de transporte e armazenamento. Neste artigo, apresentamos um conjunto de métricas para avaliar a oportunidade hipotética da infraestrutura legada de poços para abatimento de CO₂ a partir da triagem de clusters e hubs potenciais de CCUS. O objetivo central é gerar conhecimento para suporte à implementação de novos nichos operacionais para o setor de O&G nesta cadeia.

¹Disponível em <https://agencia.petrobras.com.br/w/negocio/pre-sal-avanca-em-direcao-a-descarbonizacao>. Acesso em 23 de julho de 2024.

²Disponível em <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2024/05/caminhos-para-a-descarbonizacao-portugues.pdf>. Acesso em 23 de julho de 2024.

³Disponível em <https://epbr.com.br/petrobras-planeja-primeiro-hub-brasileiro-de-armazenamento-de-co2/>. Acesso em 23 de julho de 2024.

2. Metodologia

2.1 Triagem e métricas para clusters de captura

A pré-seleção de clusters de captura foi realizada a partir da coleta de dados da Plataforma SEEG, que registra as estimativas de emissões de gases de efeito estufa no Brasil desde 1970 (SEEG, 2024) com a análise específica dos setores de energia e indústria sujeitas às regiões *intermediárias*, segundo as divisões territoriais do IBGE.

Densidade emissiva e função categoria de emissões: Adotamos como métrica progenitora para a triagem dos clusters de captura o seguinte coeficiente:

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

definido como *densidade emissiva*, onde E é o total de emissões positivas do k -ésimo município M para o ano t , medida em toneladas de equivalentes de CO_2 (tCO_2e), A é a área de M , em quilômetros quadrados, e m é o número de municípios na escala territorial. Para definir categorias de emissões, tomamos como base o limite nacional de emissões estabelecido na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) brasileira atualizada em 2022⁴, $E_{\text{lim}} = 1.3$ [GtCO_2e], e fracionamos essa meta entre os estados da federação, impondo

$$E_{S,\text{lim}}(t) = \frac{\sum_{p=1}^{m_S} E_{S,p}}{\sum_{k=1}^m E_k}(t) E_{\text{lim}}, t \leq 2025, \quad (2)$$

como o limite de emissões para o estado S no ano t , sendo $E_{S,p}$ a emissão do p -ésimo município do estado S , E_k a emissão do k -ésimo município da federação e m_S o número de municípios do estado S . A fim de definir limiares para categorias de emissão, executamos um procedimento de padronização de ρ sobre a região intermediária e , sendo

$$\bar{\rho}_{k,e}(t) = \frac{E_k}{\bar{A}_e}(t), E > 0, \forall k = 1, 2, \dots, m_e \quad (3)$$

a *densidade emissiva padronizada*, onde $\bar{A}_e = \text{med}(\{A_{k,e}\}_{k=1}^{m_e})$ e *med* é a “mediana” das áreas dos municípios em e . Por sua vez, estabelecemos os limiares de categoria através das expressões

$$\bar{\rho}_{10,e}(t) = 10\% \frac{E_{S,\text{lim}}}{\bar{A}_e}(t) \quad \text{e} \quad \bar{\rho}_{50,e}(t) = 50\% \frac{E_{S,\text{lim}}}{\bar{A}_e}(t), \quad (4)$$

⁴ Disponível em: <http://educaclima.mma.gov.br/wp-content/uploads/2023/08/NDC-1.3-Brasil-08-fev-2022-portugues.pdf>. Acesso em 24 de julho de 2024.

de modo que são definidas as seguintes categorias de emissão com base em e : Categoria A, municípios com emissão positiva total no ano t inferior a $\bar{\rho}_{10,e}(t)$; Categoria B, municípios com emissão positiva total no ano t entre $\bar{\rho}_{10,e}(t)$ e $\bar{\rho}_{50,e}(t)$; Categoria C, municípios com emissão positiva total no ano t superior a $\bar{\rho}_{50,e}(t)$. Matematicamente, isto se resume por:

$$\alpha_{k,e}(t) =: A, \text{ se } \bar{\rho}_{k,e}(t) < \bar{\rho}_{10,e}(t); B, \text{ se } \bar{\rho}_{10,e}(t) \leq \bar{\rho}_{k,e}(t) < \bar{\rho}_{50,e}(t); C, \text{ se } \bar{\rho}_{k,e}(t) \geq \bar{\rho}_{50,e}(t), \quad (5)$$

onde $\alpha_{k,e}$ é a função categoria de emissões.

Densidade viária e distância máxima de rota: Como fator indireto para a pré-seleção de clusters de captura de interesse, utilizamos a métrica $\phi_s = \frac{L_s}{A_s}$, definida como *densidade viária*⁵, onde L_s é o comprimento total da malha viária e A_s é a área total do estado onde encontram-se as regiões e . Em nossos cálculos, consideramos apenas a malha rodoviária gerida pela União, de modo que, por conveniência, ϕ assumirá a denominação *densidade rodoviária*. A viabilidade econômica do transporte de CO₂ é altamente influenciada pela distância (CCUS-IEA-2020). Para garantir uma margem razoável de viabilidade para o transporte entre pontos de origem e destino, adotamos a *distância máxima de rota*, R , como fator restritivo, limitando-a a 300 km, isto é, $R = d(x_i, y_j) \leq 300$, onde $d(x_i, y_j)$ é a distância de rota do centroide x_i de um cluster de captura (hub de captura) ao ponto de referência y_j que será um hub de armazenamento.

2.2 Triagem e métricas para clusters de armazenamento

Realizamos a pré-seleção de clusters de armazenamento a partir da base de dados de poços públicos da Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), onde estão concentrados os registros técnicos individuais dos poços distribuídos pelo território nacional⁶. Neste artigo, consideramos a base disponibilizada para o ano de 2023.

Capacidade de armazenamento: Utilizamos este critério de forma qualitativa, selecionando as seguintes bacias sedimentares que são de alta prospectividade: Paraná, Campos, Santos, Potiguar e Recôncavo (CIOTTA et al.; 2021, KETZER et al.; 2016). Cabe ressaltar que, a escolha dessas bacias refere-se ao fato de que elas são de alta prospectividade. Entretanto, como será explicado na próxima seção, apenas a bacia do Paraná será excluída deste estudo por não possuir status de poço entre os quatro considerados neste artigo.

Status e índice de oportunidade de poço: Reutilizar poços que foram permanentemente tamponados e abandonados é um processo custoso e desafiador, especialmente em ambientes *offshore*. Enquanto o

⁵ Na engenharia de tráfego, o conceito de densidade viária relaciona-se ao número de veículos confinados em um comprimento viário. Para nossos propósitos, a definição é análoga àquela encontrada em estudos agrícolas e florestais, quando se busca medir o potencial de impacto de rodovias sobre uma área de terra.

⁶ Disponível

em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/dados-tecnicos/mapas-e-p/dados-tecnicos-publicos-ano>. Acesso em janeiro de 2024.

retrofitting de poços é uma opção com menos adesão, aparentemente o seu mérito não é totalmente descartável (REX PROJECT; 2022). No Brasil, existem dez status possíveis para um poço de petróleo, determinados pela Resolução 669/2017 da ANP. Neste estudo, devido à inexistência de poços públicos categorizados como apenas de injeção e dada a hipótese de reuso, foram filtrados apenas poços com os seguintes status: *I - Abandonado permanentemente; II - Abandonado temporariamente com monitoramento; VI - Injetando; XI - Fechado*. O índice de oportunidade de reuso de poço para armazenamento permanente de CO₂, O_w , foi calculado dentro de uma faixa normalizada ($0 \leq O_w \leq 1$) pela fórmula:

$$O_w(t^*) = 1 - \left[\frac{t^* - t_a}{(t_{0,w} + s) - t_a} \right], \text{ se } t_{0,w} + s \geq t_a; 0, \text{ se } t_{0,w} + s < t_a, \quad (6)$$

onde t_a é o ano corrente, t^* o ano de referência futuro, s a duração média de produção dos poços reportados e $t_{0,w}$ o ano inicial de produção do poço.

2.3 Formação de clusters, hubs e redes de CCUS: modelagem e algoritmos

Como as menores instâncias do conjunto de dados de nosso estudo são municípios M , em um cluster de captura, e poços W , em um cluster de armazenamento, respectivamente, cabe definir: $C_i^e = \{M_{i1}, M_{i2}, \dots, M_{im_i}\}^e$, o i -ésimo cluster de captura da escala territorial e ; $S_j^b = \{W_{j1}, W_{j2}, \dots, W_{jw_j}\}^b$, o j -ésimo cluster de armazenamento sobre a bacia sedimentar b ; $\overline{x_i^e} = \mu(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im_i})^e$, o centroide de C_i^e , a partir do algoritmo μ , ou i -ésimo *hub* de e ; $\overline{y_j^b} = \mu(y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jw_j})^b$, o centroide de S_j^b , a partir do algoritmo μ , ou j -ésimo *hub* de armazenamento de b . Para clusterizar os dados, utilizamos o algoritmo *MeanShift*, que agrupa pontos com base na densidade de vizinhos sem especificação prévia do número de clusters desejado.

3. Resultados e Discussão

Apresentamos primeiramente os mapas coropléticos da função categoria de emissões para os estados de SP, RJ, BA e RN (Fig. 1) com base nos limiares de densidade emissiva padronizada, permitindo uma visualização detalhada da concentração de emissões por área geográfica. Em termos de região intermediária, existe predominância de municípios com média e alta emissão.

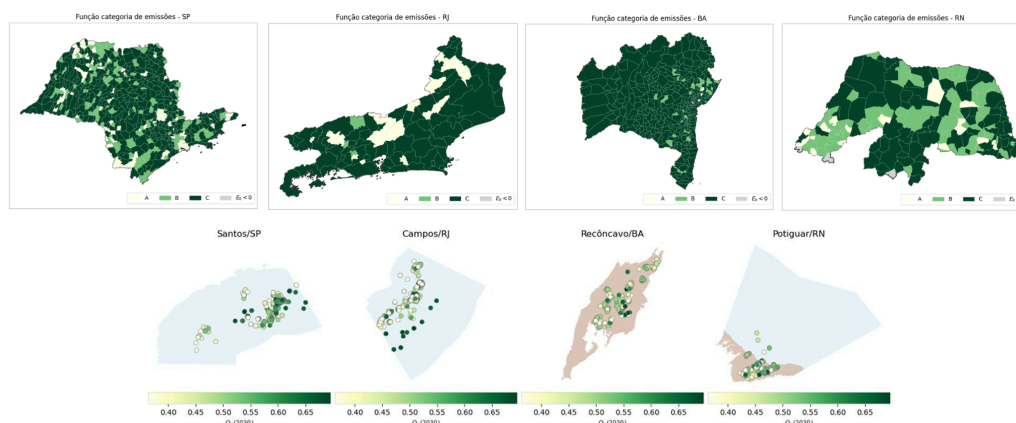


Figura 1: Coropleta da função categoria de emissões (acima). Clusters de armazenamento e índice de oportunidade de poços (abaixo).

Selecionamos para as quatro bacias de interesse, apenas poços com $O_w > 0,3$, aglomerando-os em clusters e hubs de armazenamento (Fig. 1). Neste estudo, foram identificados 57 clusters locais de captura com seus respectivos hubs, distribuídos em 20, 11, 20 e 6, e 13 clusters locais de armazenamento com seus respectivos hubs, distribuídos em 3, 2, 2 e 6, caso a caso, para SP, RJ, BA e RN, respectivamente. Selecionamos a bacia Potiguar para demonstrar as distâncias do transporte rodoviário entre os hubs de captura e armazenamento dentro do estado do RN.

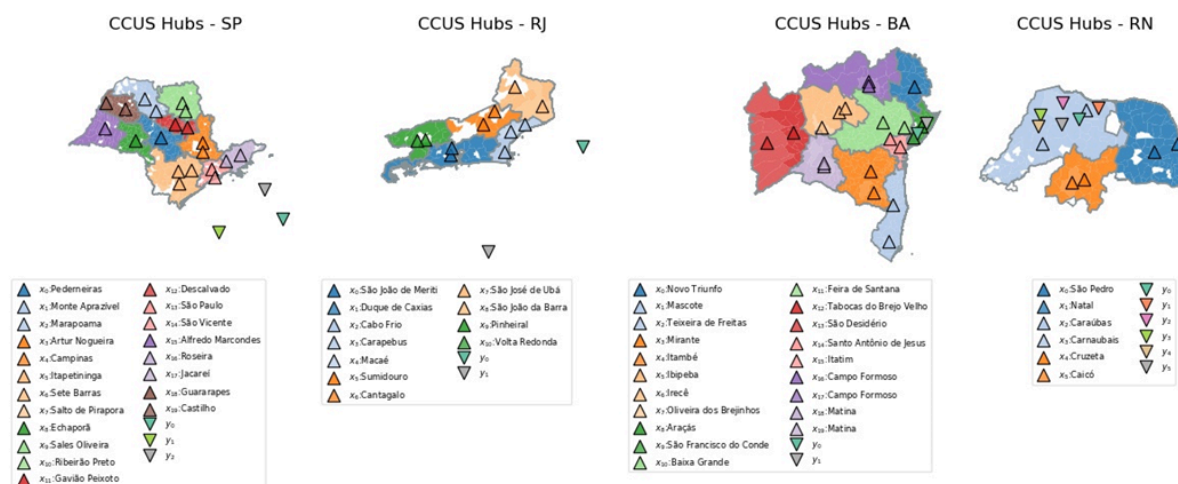


Figura 2: Hubs de captura (triângulos) e armazenamento (triângulos invertidos) identificados sobre as regiões intermediárias dos 4 estados.

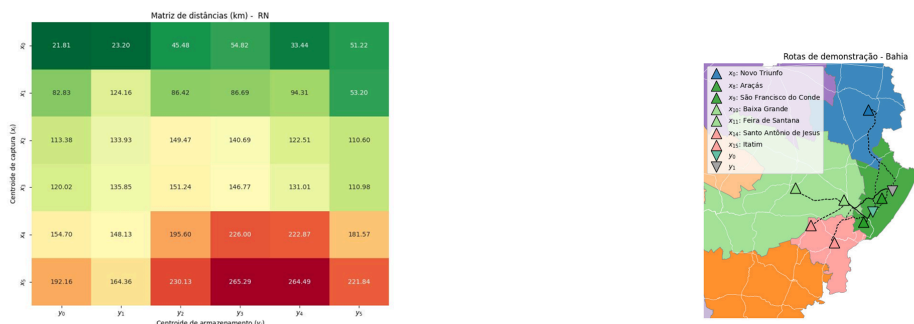


Figura 3: Demonstrações de cálculo: matriz de distância e rotas de transporte entre hubs estaduais: RN (à esquerda); BA (à direita).

Considerações Finais

Utilizamos análise geoespacial de dados e modelos matemáticos para realizar a triagem de áreas promissoras para implementação de clusters e hubs de CCUS em regiões intermediárias do Brasil. Fornecemos uma visão geral preliminar sobre como integrar a infraestrutura legada das bacias de alta prospectividade para armazenamento de CO₂ que cobrem quatro estados do país com atividade petrolífera considerável: SP, RJ, BA e RN. A continuidade deste estudo será de aprofundamento e detalhamento da larga quantidade de dados obtidos pelos mecanismos de triagem apresentados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (Processo nº 132260/2023-9). G.C.P.O., em particular, agradece a parceria com a empresa WayCarbon S.A no âmbito do Programa MAI/CNPq.

Referências Bibliográficas

- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Relatório sobre a implementação do marco regulatório de CCUS no país. 2024. https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/relatorioccusstm24.04.09.pdf.
- BOUCKAERT, S., et al., 2021. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency.
- CALLAS, C., et al., 2022. Criteria and workflow for selecting depleted hydrocarbon reservoirs for carbon storage. Appl. Energy 324, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119668>.
- CCSBR. 1º Relatório Anual de CCS no Brasil. 2023. https://www.ccsbr.com.br/_files/ugd/11a7f0_f79d8b3570e04429974fa4a67d444881.pdf
- CIOTTA, M., et al., 2021. CO₂ storage potential of offshore oil and gas fields in Brazil. Int. J. Greenh. Gas Control 112, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103492>.

GOULART, M. B. R., COSTA, P.V.M., COSTA, A.M., MIRANDA, A.C.O., MENDES, A.B., EBECKEN, N.F.F., MENEGHINI, J.R., NISHIMOTO, K., ASSI, G.R.S., 2020. Technology readiness assessment of ultra-deep salt caverns for carbon capture and storage in Brazil. *Int. J. Greenh. Gas Control* 99. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103083>.

WILLIAMS, J., et al. REX-CO2 Project. Recommendations for Reusing Wells, 2022. Disponível em: https://rex-co2.eu/documents/REX-CO2-D5.1-v2022.07.26-Recommendations_for_reusing_wells-Public.pdf. Acesso em: 24 julho 2024.

INSTITUTE, G. C., 2016. Special Report - Understanding Industrial CCS Hubs and Clusters.

INSTITUTE, G.C., 2022. Global status of CCS 2022. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-of-ccs-2022/>.

INSTITUTE, G.C., 2023. Global status of CCS 2023. <https://status23.globalccsinstitute.com/>.

IEA. CCUS in Clean Energy Transitions. 2020. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>.

KETZER, J. M. M., et al. 2015. Brazilian Atlas of CO2 capture and geological storage center of excellence in research and innovation in petroleum, mineral resources and carbon storage.

KETZER, J. M. M., et al. 2016 Atlas brasileiro de captura e armazenamento geológico de CO2. Porto Alegre, EDIPUCRS.

SEEG – Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil, 2024. <https://seeg.eco.br/>.

X. SUN et al. Hubs and clusters approach to unlock the development of carbon capture and storage – Case study in Spain. *Applied Energy*, 2021.

ZOBACK, M., SMIT, D., 2023. Meeting the challenges of large-scale carbon storage and hydrogen production. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 120 (11), <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.2202397120>.