

11º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE DO POTENCIAL DE ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CO₂ NO CAMPO DE
PILAR - ALAGOAS

AUTORES:

Wesley Michael Pereira Silva, José Antônio Barbosa, Artur Paiva Coutinho,
Tallys Celso Mineiro, Igor Fernandes Gomes, Débora Cristina Almeida de Assis

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal de Pernambuco

POTENCIAL PARA ARMAZENAMENTO GEOLÓGICO DE CO₂ NO CAMPO DE PILAR - ALAGOAS

Resumo

Estudos com foco no desenvolvimento de tecnologia para disposição permanente de CO₂ em meio geológico (Captura e Armazenamento de Carbono - CCS) têm aumentado devido à demanda por reduzir as emissões globais de carbono e alcançar uma matriz energética sustentável. O Brasil é considerado um grande potencial contribuinte para a tecnologia CCS devido às suas bacias sedimentares que podem ser utilizadas para este fim. Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar o potencial para projetos de CCS em reservatórios do Campo de Pilar, localizado em Alagoas, NE do Brasil. Esses reservatórios maduros, em produção desde a década de 80, são compostos por arenitos de granulações variáveis que ocorrem intercalados com folhelhos micáceos. O campo Pilar compreende centenas de pequenos reservatórios de óleo e gás formados em profundidades que variam de 500 a 3500 m, e a compartimentação dos reservatórios é fortemente controlada por falhas. Devido à queda na produção de petróleo e gás, os reservatórios caminham para descomissionamento e representam uma boa oportunidade para o desenvolvimento de projetos de sequestro geológico de carbono. A infraestrutura disponível do campo e a proximidade de zonas industriais, incluindo biorrefinarias, portos e plantas petroquímicas, representam vantagens econômicas para os projetos de CCS. Análises preliminares de dados geológicos e geofísicos dos reservatórios de óleo e gás do Pilar Fiel, e posterior comparação com dados de locais considerados adequados para projetos de CCS, concluímos que os reservatórios da Formação Coqueiro Seco apresentam parâmetros adequados para armazenamento de CO₂. Esses parâmetros incluem profundidades que variam de 500 a 1.000 m, porosidade e permeabilidade médias de 20% e 100 mD, respectivamente, e espessura do reservatório de até 50 m. A pressão e a temperatura nesses intervalos variam de 120 °F a 180 °F. Em relação ao aspecto do volume potencial de armazenamento e segurança, concluiu-se que os reservatórios com gás são os mais adequados.

Palavras-chave: Captura e Armazenamento de Carbono, Campo de Pilar.

Abstract

Studies focusing on the development of technology for permanent disposal of CO₂ in geological medium (Carbon Capture and Storage - CCS) have increased due to the demand for reducing global carbon emissions and achieving a sustainable energy matrix. Brazil is considered a large potential contributor to CCS technology due to its sedimentary basins that can be used for this purpose. Thus, the present study aims to analyze the potential for CCS projects in reservoirs of Pilar Field, located in Alagoas, NE Brazil. These mature reservoirs, which are in production since the 80s, are composed of sandstones of variable granulations which occur interbedded with micaceous shales. The Pilar field comprises hundreds of small oil and gas reservoirs formed in depths that vary from 500 to 3500 m, and the compartmentalization of reservoirs is strongly controlled by faults. Due to the drop in oil and gas production, the reservoirs are heading for decommissioning and represent a good opportunity for the development of projects for geological carbon sequestration. The available infrastructure of the field and the proximity of industrial zones, including biorefineries, ports, and petrochemical plants, represent economic advantages for CCS projects. Preliminary analyses of geological and geophysical data of oil and gas reservoirs of Pilar Fiel, and further comparison with data of sites considered suitable for CCS projects, we concluded that reservoirs of the Coqueiro Seco Formation present adequate parameters for CO₂ storage. These parameters include depths ranging from 500 to 1000 m, average porosity and

permeability of 20% and 100 mD, respectively, and reservoir thickness up to 50 m. Pressure and temperature in these intervals vary from 120 °F to 180 °F. Regarding the aspect of potential storage volume and safety, it was concluded that the gas-bearing reservoirs are the most suitable.

Keywords: Carbon Capture and Storage, Pilar Field.

Introdução

Evidências têm se acumulado sobre as mudanças climáticas causadas pelo aumento da temperatura média da terra principalmente nas últimas décadas (Raza et al, 2019), e a causa principal é o crescimento das emissões de CO₂ atmosférico de origem antropogênica (Kumar et al., 2020; Papadis & Tsatsaronis, 2020). Estas emissões atingiram 59 Gtons/ano de CO₂ equivalente (GtCO₂e) em 2019. Em resposta a esta ameaça as nações e o setor industrial buscam limitar a elevação da temperatura média da terra em 1,5 °C. Acordos internacionais, como o Acordo de Paris, buscam reduzir as emissões em larga escala a um ritmo crescente, e um dos objetivos é reduzir os atuais níveis de emissões de gases do efeito estufa (GEE) para aproximadamente a metade dos índices atuais até 2030 (IPCC, 2022).

Várias ações têm sido tomadas para a redução das emissões como o uso de fontes renováveis em substituição aos combustíveis fósseis e o aumento na eficiência de fontes sujas (descarbonização da matriz energética) (Rahman et al., 2022; Lau et al., 2021; Penã & Rodríguez, 2019). Além dessas medidas, a redução das emissões requer uma melhor destinação dos GEE que ainda serão produzidos, e o sequestro, ou armazenamento definitivo (CCS – Carbon Capture and Storage), de CO₂ em meio geológico é a alternativa capaz de responder a destinação de grandes volumes deste gás de forma segura e com custos viáveis (IPCC, 2022; Global CCS Institute, 2020). Os projetos de CCS podem contribuir significativamente para a redução das emissões nos setores industrial e de energia, e esta representa a única alternativa que possibilitará o uso continuado dos combustíveis fósseis ainda nas décadas a frente.

A implementação de projetos de sequestro em meio geológico envolve a injeção de CO₂ diluído em água ou na forma supercrítica em rochas que possuem um sistema permo-poroso convencional ou fraturado (Raza et al., 2019). Este processo de injeção é realizado em aquíferos salinos, em cavernas artificiais escavadas em camadas de rochas salinas (evaporitos), reservatórios maduros de óleo e gás natural, e em jazidas de carvão mineral (Ketzer et al., 2016). A viabilidade de projetos de CCS envolvem condicionantes como a existência de meios adequados para o armazenamento e proximidade desses reservatórios de locais onde existem fontes de emissão importantes como refinarias, biorrefinarias, plantas de geração termelétricas, plantas industriais como cimenteiras, siderúrgicas e plantas petroquímicas (Ketzer et al., 2016). Desta forma, este trabalho propõe uma análise de reservatórios maduros localizados no Campo de Pilar, que está localizado na região onshore da Bacia de Alagoas (BSA), Nordeste do Brasil (Fig. 1). Este representa um dos maiores campos terrestres desta bacia.

Características dos Reservatórios

A BSA representa uma bacia marginal da margem leste do Brasil. O campo petrolífero de Pilar situa-se no município de Pilar, Alagoas (Fig. 1). As falhas do estágio rifte produziram uma intensa compartimentação dos estratos e as camadas de areia depositadas em sistemas fluviais, deltaicos e eólicos, produziram reservatórios com espessura que varia de 1 a 50 m, distribuídos nas formações Coqueiro Seco, Penedo e Barra de Itiúba. As principais camadas selantes representam folhelhos de origem deltaica e fluvial (Borba et al., 2004a, 2004b; ANP, 2016).

O Campo de Pilar corresponde a um anticlinal (rollover) associado a um agrupamento de falhas relacionadas a borda da bacia, cujo ápice é cortado por um sistema de falhas conjugadas normais direcionadas no sentido NE-SW (Weidmann & Formoso, 1987, Borba et al. 2004a). Borba et al. (2004a,

2004b) mostraram que as falhas caracterizam um sistema com três tipos de trapas: acumulações de bloco alto contra a falha, acumulações de bloco baixo contra a falha e acumulações em charneiras de dobramentos.

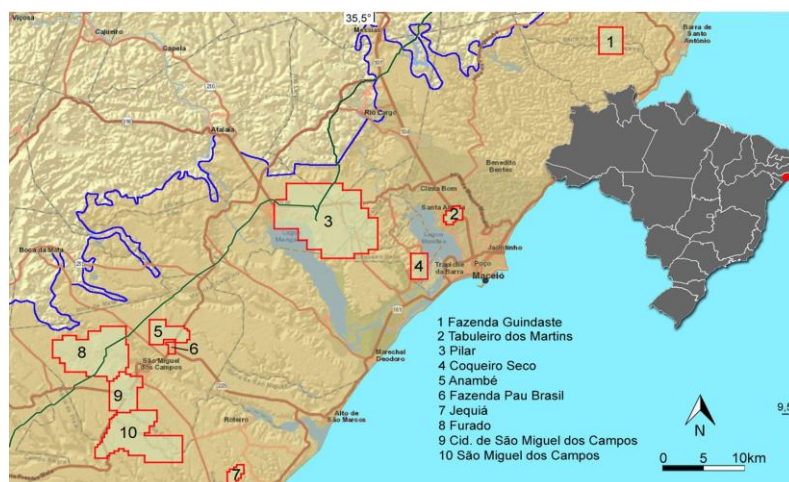


Figura 1 - Localização do campo de Pilar (3), localizado a 20 km da cidade de Maceió, na porção norte da faixa costeira da Bacia de Alagoas. Linha verde - gasoduto nordeste, linha azul - limite da bacia sedimentar, linhas de cor marrom - malha viária.

O campo de Pilar foi descoberto em 1981 e entrou em produção em 1982, e o óleo produzido possui qualidade de 39° API a 20°C e viscosidade de 1 cp (200°F). Os mecanismos primários de produção de óleo predominantes são gás em solução e capa de gás, além de reservatórios com influência de aquíferos (ANP, 2016). De acordo com Borba et al. (2004a) a produção do campo passou por um pico em 1985 (1300 m³/d) e declinou até atingir 350 m³/d em 1997. A perfuração de poços horizontais e direcionais, e a avaliação do controle tectônico na distribuição e eficiência dos reservatórios, a partir de 1998, permitiu um aumento na produção que em 2003 alcançou 1100 m³/d. Isto também permitiu o aumento das reservas totais provadas (Borba et al., 2004a). Em 2015 a produção era de cerca de 2000 bbl/d. O processo de recuperação avançada por meio da injeção de água e gás teve início a partir de 1990. De acordo com a ANP (2016) o campo possui cerca de 213 MMbbl de óleo (OOIP), e 27,9 bilhões de m³ de gás natural. A produção acumulada é de 48 MMbbl de óleo e cerca de 1 bilhão de m³ de gás.

O falhamento relacionado a formação da bacia criou uma intensa compartimentação dos reservatórios. Borba et al (2004a) indicou a existência de mais de 700 acumulações distribuídas em mais de 100 zonas produtoras (Fig. 2), cada uma com características de temperatura e pressão exclusivas. As acumulações de óleo ocorrem em arenitos deltaicos da Formação Coqueiro Seco, entre 500 e 2500 m de profundidade. Nesta unidade os reservatórios podem atingir 50 m de espessura, porosidade média de 20% e permeabilidade em torno de 100 mD. Na base da unidade Coqueiro Seco ocorre uma camada de cerca de 100 m de espessura que representa um importante reservatório de gás do campo. As acumulações de gás não-associado ocorrem em sua maioria em arenitos eólicos e fluviais da Formação Penedo, entre 2000 e 3500 m. Alguns dos principais reservatórios na unidade Penedo estão localizados em profundidades em torno de 3000 m, com permeabilidade em torno de 10%, mas arenitos eólicos contêm até 15% de porosidade e 30 mD de permeabilidade (Borba et al., 2004a, 2004b).

A Figura 2 mostra uma seção geológica esquemática interpretada a partir de um levantamento sísmico 3D, com direção E-W, localizada no sul do Campo de Pilar (Borba et al., 2004a). Os autores demonstraram o aspecto intensamente compartimentado dos reservatórios, formados por camadas de arenitos, intercaladas com camadas selantes, de folhelho. Os poços direcionais mostrados na Figura 2 objetivaram alcançar as várias acumulações formadas próximo aos planos das falhas principais que

selecionaram as camadas de arenitos dobradas. Borba et al (2004b) demonstraram também que a presença de argila influenciou o processo de selamento das falhas devido ao processo de smearing nas falhas. O atual campo de tensões e a profundidade de soterramento representam os principais aspectos controladores das rochas capeadoras e do efeito selante das falhas que formam as trapas.

Metodologia

A metodologia adotada consistiu na análise das propriedades geológicas dos reservatórios descritos a partir dos projetos de exploração realizados no campo. Além da literatura existente foram analisados os dados de poços (exploração e produção) (pasta de poço, perfis geofísicos, dados químicos), e dados de sísmica 3D que foram disponibilizados por meio do Programa de Revitalização da Atividade de Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural em Terras Terrestres - REATE do Ministério de Minas e Energia com apoio da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), e do Serviço Geológico do Brasil. Estes dados permitiram definir as características dos principais reservatórios: profundidades de ocorrência, parâmetros intrínsecos (permeabilidade, porosidade, pressão, temperatura, saturação de fluidos), e aspectos gerais do trapeamento.

Em seguida, as características dos reservatórios foram comparadas aos aspectos utilizados para a escolha de prospectos para o desenvolvimento de projetos de CCS com base em todos os casos já executados e o conhecimento acumulado pela indústria e academia. Os critérios de pré-seleção de prospectos envolvem o tipo de rocha, tipo de trapeamento, qualidade de selos, propriedades intrínsecas, profundidade e volume dos reservatórios alvo. A definição da capacidade de armazenamento, capacidade de retenção do gás definem os aspectos mais importantes.

A partir desta comparação foi realizada uma definição preliminar do potencial de utilização dos reservatórios existentes no Campo de Pilar para o armazenamento definitivo de CO₂.

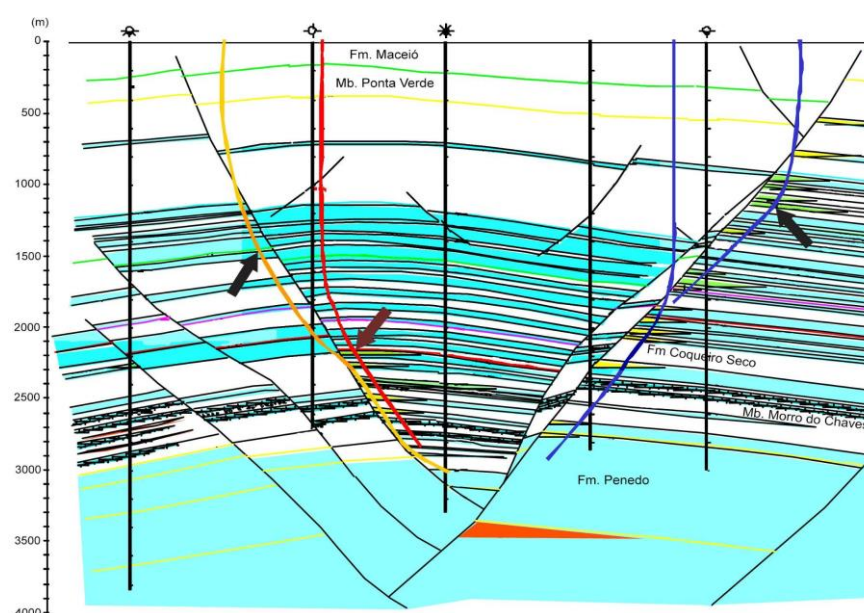


Figura 2 - Seção geológica obtida a partir de dados de poços e de sísmica de reflexão localizada no sul do Campo de Pilar (Modificado de Borba et al 2004a). A figura mostra dezenas de reservatórios em intervalos individualizados de produção, formados pelo dobramento das camadas e pela presença de falhas. Linha azul - poço direcionado para alcançar acumulações formadas contra o plano de falha em bloco alto (seta preta); linha vermelha - poço direcionado para alcançar acumulações contra o plano de falha no bloco baixo (seta marrom).

Para estimar a capacidade de armazenamento de CO₂ em reservatórios maduros utiliza-se as equações propostas por Bachu et al. (2007), que se baseiam na hipótese de que o volume de hidrocarboneto produzido/extraído do reservatório pode ser preenchido por CO₂, desconsiderando,

portanto, quaisquer alterações na integridade do reservatório resultante da produção de hidrocarbonetos. Apesar de ser uma solução simplificada, a metodologia se aproxima da realidade no caso de reservatórios maduros que não sofrem alterações no balanço de massa considerado nas formulações, como o caso de inundação por recuperação avançada de óleo.

Resultados e Discussão

A profundidade dos reservatórios é um dos critérios importantes para a definição de projetos de CCS. De forma geral, busca-se profundidades maiores do que 800 m para reservatórios do tipo meio poroso (Ketzer et al., 2012). Profundidades maiores significam maiores pressões de poro e desta forma é possível considerar uma maior densidade do fluido e um volume maior de CO₂ pode ser armazenado por unidade de volume do reservatório. Entretanto, reservatórios mais profundos requerem maior custo de perfuração e completação, além do monitoramento, e as rochas porosas de forma geral, como os arenitos, apresentam menor porosidade. Conforme critérios adotados por Callas et al. (2022), os reservatórios mais adequados estão em profundidades entre 1000 e 2000 m (Tabela 1).

Callas et al. (2022), também propuseram critérios para a seleção de reservatórios maduros de óleo e gás para armazenamento de CO₂. De acordo com os autores, é necessária uma permeabilidade mínima de 10 mD, de modo que seja possível a vazão de injeção do fluido com o menor número possível de poços, uma vez que a injetividade depende da permeabilidade do reservatório. Outro ponto destacado foi a espessura mínima do reservatório que precisa ser pelo menos 10 m, para que seja possível acompanhar o desenvolvimento da pluma de CO₂.

O estudo preliminar das características dos reservatórios do Campo de Pilar apresenta um bom potencial para o desenvolvimento de operações de armazenamento de CO₂, com base nas diretrizes propostas por Callas et al. (2022), Raza et al. (2016) e Delprat-Jannaud et al. (2014). De forma geral os reservatórios de óleo, e alguns contendo gás, localizados na Formação Coqueiro Seco apresentam parâmetros (profundidade de compactação, porosidade e permeabilidade) adequadas. A espessura dos reservatórios, entre 10 e 50 m, também se enquadram nas possibilidades de utilização (Tabela 2). Os reservatórios de gás que ocorrem na unidade Penedo, devido ao maior soterramento, acima de 2000 m (Tabela 2), precisam de uma melhor caracterização e estudos mais detalhados que permitam avaliar o impacto de custos x volume potencial de armazenamento.

Tabela 1 - Parâmetros adotados para pré-seleção de reservatórios adequados para armazenamento geológico de carbono.

Parâmetro	Critério de escolha
Profundidade até o topo de formação	1000 - 2000 m
Permeabilidade	> 10 mD
Porosidade	> 10%
Espessura do reservatório	> 10 m

Fonte: Adaptado de Callas et al. (2022)

Tabela 2 - Parâmetros de reservatórios maduros encontrados nas formações Penedo e Coqueiro Seco

Parâmetro	Form. Coqueiro Seco	Form. Penedo
Profundidade até o topo de formação	500 - 2500 m	2000 - 3500 m
Permeabilidade	100 mD	30 mD
Porosidade	20%	10%
Espessura do reservatório	Até 50 m	-

A forma de trapeamento dos reservatórios, no entanto, implica um elevado grau de complexidade geológica (Fig. 1), que envolve a manutenção da integridade das trapas por meio de falhas. A grande quantidade de reservatórios de menor volume pode ser positiva para o efeito de armazenamento a partir de técnicas de completação atuais, mas os limites de integridade precisam ser analisados por meio de simulações numéricas detalhadas, para injeção em horizontes isolados, ou múltiplos horizontes.

Conclusões

O Campo terrestre de Pilar apresenta potencial para projetos de CCS por causa de suas características geológicas, reservatórios siliciclásticos, e sua localização em relação a fontes de emissão de CO₂ (indústria de forma geral e empreendimentos do setor de energia).

A avaliação preliminar das características dos reservatórios de óleo e gás reconhecidos por meio de levantamentos geofísicos e perfuração de poços permitiu verificar que os reservatórios existentes na Formação Coqueiro Seco se enquadram em critérios primordiais para garantir efeito de injetividade do gás no meio poroso. Os reservatórios, em especial de gás, que ocorrem na Formação Penedo, em profundidades maiores que 2500 m apresentam menor potencial, devido ao efeito de redução da porosidade e permeabilidade dos arenitos portadores de acumulações. Entretanto, é necessário avaliar por meio de modelagem detalhada e simulação numérica de prospectos nesta unidade para definir o efeito de custo-benefício para projetos de CCS.

O trapeamento complexo, que envolve a formação de selo por falhas, também precisa ser avaliado por meio de simulações detalhadas que apontem de forma precisa os eventuais limites de pressão para projetos de injeção de CO₂.

Estudos posteriores, focados na modelagem e simulação de alguns reservatórios selecionados nas unidades Penedo e Coqueiro Seco, poderão apontar aspectos de volume potencial e de segurança dos condicionantes das acumulações.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP/FINEP, via PRH 48.1/UFPE (Processo ANP Nº48610.201019/2019-38), suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015. JAB agradece ao CNPq pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de produtividade processo Nº 15343/2020-6.

Referências Bibliográficas

- ANP. Plano de Desenvolvimento: Pilar. 3p., 2016.
- Bachu, S., Bonijoly, D., Bradshaw, J., Burruss, R., Holloway, S., Christensen, N.P., Mathiassen, O.M., 2007. CO₂ storage capacity estimation: methodology and gaps. *Int. J. Greenh. Gas Control* 1 (4), p. 430-443.
- Borba, C., Aguiar, L. A. M., Maciel, W. B., Almeida, M. S., Dias Filho, D. C., Souza, R. S. 2004b. Aspectos controladores do potencial selante de falhas: exemplo do Campo de Pilar, Bacia de Sergipe-Alagoas, Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 12(1): 103- 123.
- Borba, C.; Takeguma, M.S.; Souza, E.J.F.; Schneider, K.N., 2004a. Revitalization of Pilar Field (Sergipe-Alagoas Basin, Brazil) using deviated wells along fault planes – a successful experience. Paper presented at the 2004 SPE/DOE Fourteenth Symposium on improved Oil Recovery held in Tulsa, Oklahoma, USA, 17-21 April 2004.
- Callas, C., Saltzer, S. D., Steve Davis, J., Hashemi, S.S., Kavscek, A.R., Okoroafor, E.R., Wen, G., Zoback, M.D., Benson, S.M. Criteria and workflow for selecting depleted hydrocarbon reservoirs for carbon storage, *Applied Energy*. vol. 324, 2022.
- Delprat-Jannaud, F., Korre, A., Shi, J. Q., McConnell, B., Arvaniti, A., Boavida, D., Car M., Gastine, M., Grunnaleite, I., Bateman, K., Poulsen, N., Sinayuc, C., Vähäkuopus, T., Vercelli, S., Wójcicki, A. State-of-the-Art review of CO₂ storage site selection and characterisation methods, *CO₂GeoNet*, 2014, pp. A132-A605.
- Global CCS Institute (2020) Global Status of CCS 2020. Global CCS Institute.
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Ketzer, J. M. M., Machado, C. X., Rochett, G. C., Iglesias, R. S. Brazilian Atlas of CO₂ Capture and Geological Storage. Porto Alegre. EDIPUCRS, 2016.
- Ketzer, J.M., Iglesias, R., Einloft, S., 2012. Reducing greenhouse gas emissions with CO₂ capture and geological storage. In: Chen, W.-Y., Seiner, J., Suzuki, T., Lackner, M. (Eds.), *Handbook of Climate Change Mitigation*. Springer, US, pp. 1405-1440.
- Kumar S., Foroozesh J., Edlmann K., Rezk M.G., Lim C.Y. A comprehensive review of value-added CO₂ sequestration in subsurface saline aquifers, *J. Nat. Gas Sci. and Eng.*, vol. 81, 2020.
- Lau, H.C., Ramakrishna, S., Zhang, K. Radhamani, A.V. The Role of Carbon Capture and Storage in the Energy Transition Energy Fuels, vol. 35 (9), 2021, p. 7364-7386.
- Papadis, E., Tsatsaronis, G. Challenges in the decarbonization of the energy sector. *Energy*, vol. 205, 2020.
- Peña, J. I., Rodríguez, R. Are EU's Climate and Energy Package 20-20-20 targets achievable and compatible? Evidence from the impact of renewables on electricity prices. *Energy*, vol. 183, 2019, p. 477-486.
- Rahman, M. M., Alam, K., Velayutham, E. Reduction of CO₂ emissions: The role of renewable energy, technological innovation and export quality. *Energy Reports*, vol. 8, 2016, p. 2793-2805.
- Raza A., Rezaee R., Gholami R., Bing C. H., Nagarajan R., Hamid M. A. A screening criterion for selection of suitable CO₂ storage sites. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 28, 2016, p. 317–327.
- Raza, A., Gholami, R., Rezaee, R., Rasouli, V., Rabiei, M. Significant aspects of carbon capture and storage – A review. *Petroleum*, vol. 5, 2019, p. 335-340.
- Weidmann, O. H.; Formoso, S. Aspectos estruturais e sua relação com as acumulações de hidrocarbonetos no Campo de Pilar. In: *Seminário de tectônica da Petrobras*, 1987, Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1987. p. 442-458.