



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

**CRISTIANO NOBRE BARROS**

**CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO: UMA REVISÃO**  
**BIBLIOMÉTRICA ENTRE 1994 E 2025**

**FORTALEZA**

**2024**

CRISTIANO NOBRE BARROS

CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA  
ENTRE 1994 E 2025

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Petróleo do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Petróleo.

Orientador: Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

B275c Barros, Cristiano Nobre.

Captura e armazenamento de carbono: uma revisão bibliométrica entre 1994 e 2025 / Cristiano Nobre Barros. – 2024.

41 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Petróleo, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata.

1. Sequestro de carbono. 2. Methodi Ordinatio. 3. Indústria do petróleo. 4. Revisão sistemática. I. Título.  
CDD 665.5092

---

CRISTIANO NOBRE BARROS

CAPTURA E ARMAZENAMENTO DE CARBONO: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA  
ENTRE 1994 E 2025

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Petróleo do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Petróleo.

Aprovada em: 02 de outubro de 2024

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Júnior  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Me. Gustavo Alencar Rolim  
Universidade de São Paulo (USP)

A Deus.

Aos meus pais, Nilson Barros da Silva e  
Luciene Nobre Silva. E à minha esposa  
Gabriela Sanders Guedes.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Bruno de Athayde Prata, pela excelente orientação e amizade a quem sou muito grato.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Ernesto Ferreira Nobre Junior e ao Eng. Me. Gustavo Alencar Rolim pelo seu valioso tempo e disponibilidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro ao período sanduíche que passei na Molde University College, através do programa Ciência sem Fronteiras.

Ao Doutorando Matheus Gomes Correia pela excelente orientação, amizade e seu valioso tempo, e por sempre acreditar em mim.

Ao Engenheiro Eric Freire Sampaio por sua amizade e seu valioso tempo, e por ter me ajudado ao longo da minha formação acadêmica.

À Maria Cristina Nascimento por ter sempre me incentivado, acreditado e me ajudado ao longo dos anos para minha formação.

À minha esposa Gabriela por ter me dado forças nos momentos difíceis e estar sempre ao meu lado, a quem sou muito grato.

Aos meus Pais e meu irmão que sempre estiveram presentes me incentivando a enfrentar os desafios e por seu apoio incondicional.

## RESUMO

Este estudo bibliométrico investiga a produção científica sobre Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) entre 1994 e 2024, utilizando a equação *InOrdinatio* para ranquear a relevância das publicações. O objetivo principal é mapear a evolução da pesquisa em CCS, identificar os principais atores, tendências, temas de pesquisa e redes de colaboração, visando compreender o desenvolvimento e dessa área do conhecimento. A pesquisa foi realizada nas bases de dados Scopus e Web of Science, utilizando uma combinação de palavras-chave em inglês, e aplicando critérios de inclusão e exclusão para selecionar os artigos mais relevantes. Os dados foram analisados utilizando o software RStudio e o pacote *bibliometrix*. Os resultados demonstram um crescimento significativo na produção científica sobre CCS, impulsionado pela crescente preocupação com as mudanças climáticas. A China destaca-se como líder em publicações, seguida pelos Estados Unidos. A análise de coautoria revelou uma forte colaboração internacional, com a formação de grupos de pesquisa liderados principalmente por autores chineses. A análise de temas de pesquisa identificou o sequestro de carbono, o armazenamento geológico, a captura de CO<sub>2</sub> e a recuperação avançada de petróleo como áreas de grande relevância. O estudo conclui que a pesquisa em CCS tem se expandido globalmente, com a China liderando os esforços de pesquisa e desenvolvimento. A equação *InOrdinatio* mostrou-se eficaz na identificação dos trabalhos mais relevantes, revelando a influência de autores e instituições-chave na pesquisa em CCS. O estudo contribui para a compreensão da evolução da pesquisa em CCS e aponta direções para futuras investigações.

**Palavras-chave:** sequestro de carbono; Methodi Ordinatio; indústria do petróleo; revisão sistemática.

## ABSTRACT

This bibliometric study investigates the scientific production on Carbon Capture and Storage (CCS) between 1994 and 2024, using the *InOrdinatio* equation to rank the relevance of publications. The main objective is to map the evolution of CCS research, identify the main actors, trends, research themes, and collaboration networks, aiming to understand the development and state of the art of this field of knowledge. The research was conducted in the Scopus and Web of Science databases, using a combination of keywords in English, and applying inclusion and exclusion criteria to select the most relevant articles. The data were analyzed using RStudio software and the *bibliometrix* package. The results show significant growth in scientific production on CCS, driven by the increasing concern about climate change. China stands out as the leader in publications, followed by the United States. The co-authorship analysis revealed strong international collaboration, with the formation of research groups mainly led by Chinese authors. The analysis of research themes identified carbon sequestration, geological storage, CO<sub>2</sub> capture, and enhanced oil recovery as areas of great relevance. The study concludes that CCS research has expanded globally, with China leading the research and development efforts. The *InOrdinatio* equation proved effective in identifying the most relevant works, revealing the influence of key authors and institutions in CCS research. The study contributes to the understanding of the evolution of CCS research and points out directions for future investigations.

**Keywords:** carbon sequestration; Methodi Ordinatio; oil industry; systematic review.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção Científica Anual .....	26
Figura 2 – Autores Mais Relevantes.....	28
Figura 3 – País do Autor Correspondente.....	29
Figura 4 – Produção Científica por País.....	30
Figura 5 – Instituições Mais Relevantes.....	31
Figura 6 – Mapa de Colaboração Entre os Autores .....	32
Figura 7 – Tendências de Assunto .....	35
Figura 8 – Mapa de Palavras .....	37
Figura 9 – Mapa Estratégico.....	39

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Número de estudos retornados em cada base de dados .....	23
Tabela 2 – Resumo estatístico dos dados utilizados neste estudo. ....	25
Tabela 3 – Os 10 documentos mais citados .....	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCS	Captura e Armazenamento de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DAC	Captura Direta do Ar
EOR	Recuperação Avançada de Petróleo
MCP	<i>Multiple Country Publications</i>
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NETL	National Energy Technology Laboratory
SCP	<i>Single Country Publications</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	Problemática e Justificativa.....	14
1.2	Problema de Pesquisa.....	15
1.3	Objetivos.....	15
1.4	Estrutura do Trabalho .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	Captura e Armazenamento de Carbono.....	17
2.2	Transporte de CO2 .....	18
2.3	Armazenamento.....	18
2.4	<i>Methodi Ordinatio</i> .....	19
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>22</b>
3.1	Visão Geral.....	22
3.2	Justificativa e Limitações.....	22
3.3	Processo de Coleta de Dados.....	23
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>25</b>
4.1	Análise de Desempenho.....	25
4.1.1	<i>Desempenho dos autores</i> .....	27
4.1.2	<i>Desempenho de instituições</i> .....	30
4.1.3	<i>Documentos</i> .....	33
4.2	Estrutura Conceitual.....	35
4.2.1	<i>Tendências de Assunto</i> .....	35
4.2.2	<i>Palavras-chave</i> .....	37
4.2.3	<i>Diagrama Estratégico</i> .....	38
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>40</b>

**REFERÊNCIAS.....42**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Problemática e Justificativa

As emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), impulsionadas pela atividade humana, se intensificaram aumentando o efeito estufa e o aquecimento global, conduzindo a uma crise climática com consequências cada vez mais evidentes para todos os países. O aumento da temperatura global, o derretimento das calotas polares, a elevação do nível do mar, a intensificação de eventos climáticos extremos, a perda da biodiversidade nos demonstra um cenário alarmante que exige ações urgentes para reverter essa trajetória. Gabric (2023) afirma que “a atual crise climática se manifesta através de problemas complexos e interligados e é o resultado da contínua dependência da sociedade global em combustíveis fósseis como sua principal fonte de energia”.

Diante dessa crise, a busca por soluções para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> torna-se imperativa para alcançar as metas de descarbonização propostas em acordos internacionais entre os países. Tecnologias como a Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) despontam como peças-chave e se tornarão cada vez mais essenciais para que os objetivos climáticos sejam alcançados (GIBBINS, 2019), oferecendo uma ferramenta poderosa para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> e contribuir para um futuro de baixo carbono.

Mas como acelerar o desenvolvimento e a implementação do CCS? Como identificar as áreas de pesquisa mais promissoras e os principais atores nesse campo em constante evolução? É nesse contexto que a análise bibliométrica se apresenta como uma ferramenta de grande relevância, capaz de mapear a produção científica, desvendar tendências, conectar pesquisadores e impulsionar a inovação em CCS.

Através da análise de grandes volumes de dados bibliográficos, a bibliometria nos permite compreender a trajetória das pesquisas científicas, identificando os autores e instituições mais influentes, os temas de pesquisa mais relevantes, redes de colaboração e as áreas emergentes. Ao revelar os padrões e tendências que moldam a pesquisa na área, a análise bibliométrica nos fornece informações valiosas que são capazes de orientar o investimento em pesquisas de grande relevância para a comunidade assim como aumentar a colaboração entre pesquisadores e instituições.

Este estudo se propõe a utilizar análise bibliométrica para ter uma visão geral da produção científica em CCS e suas tendências futuras, com o objetivo de acelerar o desenvolvimento dessa tecnologia essencial para a mitigação das mudanças climáticas e a

construção de um futuro sustentável ao mapear os caminhos da inovação, conectando pesquisadores e inspirando novas descobertas para esse tema de grande relevância para a sociedade.

## **1.2 Problema de Pesquisa**

O aumento das temperaturas globais acima e a crescente preocupação com as mudanças climáticas e seus impactos socioambientais no mundo, tem impulsionado a busca por soluções que visam reduzir as emissões de gases do efeito estufa, principalmente para o CO<sub>2</sub>. A indústria do petróleo, embora essencial para o fornecimento de energia, é uma das principais fontes de emissões de CO<sub>2</sub> e nesse contexto, a tecnologia CCS surge como uma ferramenta crucial para descarbonizar a produção de energia a partir de combustíveis fósseis, permitindo assim uma exploração mais sustentável principalmente pela indústria petrolífera.

A implementação do CCS em larga escala, no entanto, enfrenta desafios complexos, como os elevados custos da tecnologia, a necessidade de infraestrutura adequada para o transporte e armazenamento de CO<sub>2</sub>, e a superação de barreiras regulatórias e de percepção pública. Essas questões abrem um leque importante de investimentos tanto privados como governamentais, dessa forma visando compreender a evolução da pesquisa em CCS, os avanços tecnológicos, e as principais áreas de investigação assim como os desafios a serem superados é fundamental a pesquisa bibliométrica para orientar as ações de pesquisadores, formuladores de políticas e empresas do setor.

## **1.3 Objetivos**

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a produção científica sobre Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) entre 1994 e 2024 por meio de um estudo bibliométrico, com o intuito de mapear sua evolução, identificar os principais atores, tendências, temas de pesquisa e redes de colaboração, visando compreender o desenvolvimento e o estado da arte dessa área do conhecimento.

Para atingir esse objetivo geral, a pesquisa se propõe a alcançar os seguintes objetivos específicos:

- a) Mapear a evolução da produção científica em CCS entre 1994 e 2024: analisar as tendências de crescimento, identificar os principais periódicos e as áreas de pesquisa com maior número de publicações.

- b) Identificar os autores e instituições mais relevantes na pesquisa em CCS: utilizar indicadores bibliométricos, como o número de publicações, citações e a equação *InOrdinatio*, para ranquear os autores de maior impacto na área e os países mais relevantes que atuam na pesquisa de CCS.
- c) Mapear as redes de colaboração em CCS: visualizar as relações de coautoria entre pesquisadores e instituições, identificando os principais clusters de pesquisa e o grau de colaboração internacional.
- d) Analisar os temas de pesquisa mais relevantes: identificar os temas de pesquisa mais frequentes, as relações entre eles e as tendências emergentes, utilizando ferramentas como nuvens de palavras, mapas de cocitação e análise de tendências de assunto.

#### 1.4 Estrutura do Trabalho

A presente monografia, dedicada à análise bibliométrica da pesquisa em Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), está estruturada em cinco capítulos. O primeiro capítulo, a introdução, contextualiza a pesquisa, apresentando a temática do CCS, sua relevância no contexto da crise climática e a necessidade de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. Ele também descreve a justificativa para a realização do estudo, os objetivos da investigação e o escopo da pesquisa.

O segundo capítulo, dedicado à revisão de literatura, aborda as diferentes tecnologias de CCS, os desafios e oportunidades associados à sua implementação, e discute brevemente a metodologia *Methodi Ordinatio* e sua relevância para a pesquisa.

O terceiro capítulo desvenda a metodologia da pesquisa bibliométrica, apresentando em detalhes as fontes de dados, a coleta e a estratégia de busca, os critérios de seleção de documentos, as ferramentas de análise e os indicadores bibliométricos utilizados para traçar o panorama da pesquisa em CCS.

O quarto capítulo, núcleo da investigação, revela os resultados da análise bibliométrica, utilizando gráficos, tabelas e mapas para ilustrar as principais tendências, os autores de maior destaque e os temas de pesquisa mais relevantes, permitindo uma compreensão clara e objetiva dos achados da pesquisa.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões do estudo, sintetizando os resultados, discutindo suas implicações e limitações. Ele também aponta direções para futuros estudos em CCS, completando a investigação e abrindo caminhos para novas descobertas nesse campo em constante evolução.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Captura e Armazenamento de Carbono

A Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), descrita por Metz *et al.* (2005) como “uma cadeia de tecnologias que envolve a captura de CO<sub>2</sub> de fontes pontuais, seu transporte para um local de armazenamento e seu isolamento da atmosfera”, surge como uma ferramenta fundamental na luta contra as mudanças climáticas. A etapa inicial do processo se dá pela captura de CO<sub>2</sub>, que é realizada por diferentes métodos, divididos em três categorias: pós-combustão, pré-combustão e oxicomustão, cada um com suas particularidades, vantagens e desvantagens.

A pós-combustão é um processo de captura que envolve o resfriamento dos gases de combustão, a absorção do CO<sub>2</sub> por um solvente químico, a regeneração do solvente para liberar o CO<sub>2</sub> capturado e a compressão do CO<sub>2</sub> para transporte e armazenamento (BUI *et al.*, 2021). Ela é caracterizada por remover CO<sub>2</sub> dos gases de exaustão após a queima de combustível. Essa técnica é particularmente relevante para a indústria do petróleo, pois pode ser aplicada em usinas termelétricas a gás natural que fornecem energia para as operações, em refinarias e até mesmo em plataformas offshore. A flexibilidade, tecnologia madura e adaptabilidade são vantagens desse método, tornando-o uma ótima opção para a indústria. As desvantagens envolvem corrosão, alto consumo de energia e elevado custo, o que abre campos de pesquisa interessantes para tentar mitigar esses problemas e tornar a tecnologia mais barata.

A pré-combustão, diferentemente da pós-combustão, atua de forma antecipada, removendo o carbono antes do processo de combustão. Esse processo se baseia na transformação do combustível em uma mistura gasosa rica em hidrogênio (H<sub>2</sub>) e CO<sub>2</sub>, que pode ser facilmente capturado utilizando métodos convencionais de separação de gases, como a absorção com solventes químicos. O hidrogênio resultante, livre de carbono, pode ser utilizado como combustível limpo em diversos processos, como a geração de energia e a produção de combustíveis sintéticos. A vantagem desse método, como mencionado por Gibbins e Chalmers (2008), é que “a captura de CO<sub>2</sub> em sistemas de pré-combustão é geralmente mais fácil e menos dispendiosa do que em sistemas de pós-combustão, devido às altas concentrações de CO<sub>2</sub> no fluxo de gás”, e que essas concentrações elevadas permitem separar o CO<sub>2</sub> da mistura de maneira mais eficiente, reduzindo os custos do processo e tornando esse método atraente. A grande desvantagem é a complexidade do processo de gaseificação, que exige

condições operacionais específicas e equipamentos de ponta, sendo um processo ainda em desenvolvimento e com desafios em sua implementação.

Por fim, há a oxicombustão, uma tecnologia inovadora para a CCS, oferecendo uma alternativa com vantagens específicas em relação aos métodos tradicionais de pós-combustão e pré-combustão. A oxicombustão envolve a queima do combustível em uma atmosfera rica em oxigênio, resultando em um fluxo de gás de combustão concentrado em CO<sub>2</sub> e vapor d'água (CHEN *et al.*, 2021), e seu princípio básico reside na modificação do processo de combustão, utilizando oxigênio puro (O<sub>2</sub>) ao invés de ar atmosférico, o que gera um fluxo de gás de combustão com uma alta concentração de CO<sub>2</sub>, facilitando a captura. As vantagens desse processo são a captura simplificada devido à alta concentração de CO<sub>2</sub>, boa eficiência energética comparada com a pós-combustão e ausência de N<sub>2</sub>, o que evita a formação de NO<sub>x</sub> e reduz a poluição.

## **2.2 Transporte de CO<sub>2</sub>**

Após a captura, o CO<sub>2</sub> deve ser transportado para locais de armazenamento apropriados. O transporte por dutos, conforme destacam Metz *et al.* (2005), é considerado a "opção mais econômica para grandes volumes de CO<sub>2</sub> e longas distâncias". O armazenamento geológico, principalmente em formações salinas profundas, campos de petróleo e gás esgotados e camadas de carvão não mineráveis, destaca-se como uma solução promissora para o isolamento permanente do CO<sub>2</sub>.

A sinergia entre a expansão da infraestrutura e o desenvolvimento tecnológico é essencial para a viabilização da CCS em larga escala. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de transporte mais eficientes, seguras e de baixo custo, em conjunto com a construção de uma infraestrutura robusta e interconectada, pavimentarão o caminho para a adoção do CCS como uma ferramenta crucial na luta contra as mudanças climáticas.

## **2.3 Armazenamento**

A etapa de armazenamento representa o isolamento do CO<sub>2</sub> capturado da atmosfera. Para garantir um armazenamento eficaz, é necessário analisar a escolha adequada do local, o entendimento dos mecanismos de aprisionamento e o monitoramento constante para que o CO<sub>2</sub>

aprisionado não retorne à atmosfera, assegurando a segurança e a eficácia a longo prazo do processo.

O armazenamento geológico oferece a maior segurança para guardar grandes volumes de CO<sub>2</sub> por longos períodos, destacando-se as formações geológicas subterrâneas nesse processo. Tecnologias de monitoramento, incluindo sísmica 4D, gravimétrica e geoquímica, desempenham um papel fundamental na garantia da segurança e da eficácia a longo prazo do armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> (CHADWICK *et al.*, 2020). Os campos de petróleo e gás esgotados também representam uma opção viável para o armazenamento de CO<sub>2</sub>, com a vantagem de reutilizar a infraestrutura existente e o potencial para a Recuperação Avançada de Petróleo (EOR) (Metz *et al.*, 2005). A injeção de CO<sub>2</sub> em reservatórios de petróleo pode aumentar a produção, ao mesmo tempo em que armazena o gás no subsolo. Outra opção é o armazenamento em camadas de carvão não mineráveis, onde o CO<sub>2</sub> é adsorvido pelo carvão, podendo até deslocar o metano e gerar uma fonte adicional de gás natural.

Dentre as formações geológicas adequadas para o armazenamento de CO<sub>2</sub>, destacam-se os aquíferos salinos, caracterizados por sua profundidade, porosidade e presença de água salina, que atuam como barreiras naturais para o CO<sub>2</sub>. Metz *et al.* (2005) descrevem os diferentes mecanismos de aprisionamento em aquíferos salinos, incluindo o aprisionamento estrutural e estratigráfico, no qual o CO<sub>2</sub> é aprisionado por camadas impermeáveis de rocha, o aprisionamento residual, onde o CO<sub>2</sub> fica retido nos poros da rocha, e o aprisionamento por solubilidade, no qual o CO<sub>2</sub> se dissolve na água salina.

## 2.4 *Methodi Ordinatio*

A *Methodi Ordinatio*, uma metodologia de revisão sistemática de literatura concebida por Pagani, Kovalski e Resende (2015), tem se destacado como uma técnica de ranqueamento multicritério em estudos bibliométricos. A *Methodi Ordinatio* “se apresenta como uma solução para a questão da ponderação dos indicadores bibliométricos, combinando diferentes critérios em um único valor que expressa a relevância dos documentos” (PAGANI, 2019), sua capacidade de ordenar elementos como autores, instituições ou países, considerando múltiplos indicadores bibliométricos simultaneamente, oferece uma perspectiva mais completa do impacto e da influência desses elementos no campo de estudo em questão.

As vantagens dessa metodologia é que proporciona uma visão abrangente da produção científica, avaliando o impacto e a influência dos elementos sob os critérios selecionados. Sua flexibilidade permite a adaptação a diferentes contextos e áreas de estudo,

possibilitando a escolha dos indicadores mais relevantes para cada caso específico. Além disso, o processo de ordenação é transparente e claro, facilitando a interpretação dos resultados e promovendo a confiabilidade da análise.

Essa metodologia permite a identificação dos autores mais influentes em uma área de pesquisa, considerando não apenas a quantidade de publicações, mas também o impacto de suas pesquisas, medido por citações e data de publicação, dentre outros. Na avaliação de instituições, o método possibilita a comparação do desempenho, levando em conta a produção científica e a colaboração entre pesquisadores. Ademais, a *Methodi Ordinatio* auxilia na análise do desenvolvimento científico de diferentes países em áreas específicas, identificando os países líderes e as tendências de colaboração internacional.

A *Methodi Ordinatio*, que foi usada neste estudo, se divide em nove etapas: definir o problema de pesquisa, selecionar bases de dados relevantes, formular a *string* de busca com palavras-chave precisas, coletar e organizar os dados bibliográficos, estabelecer critérios de inclusão e exclusão de documentos, escolher os indicadores bibliométricos mais adequados, calcular o valor do *InOrdinatio* para cada documento, considerando citações e ano de publicação, ranquear os documentos em ordem decrescente de relevância e, finalmente, analisar e interpretar os resultados com base na pergunta de pesquisa e no contexto do campo de estudo.

O cálculo do *InOrdinatio* é feito da seguinte forma:

$$\text{InOrdinatio} = (\text{IF}/1000) + \alpha \times [10 - (\text{Ano da Pesquisa} - \text{Ano da Publicação})] + (\Sigma \text{Ci})$$

Fonte: Pagani, Kovaleski e Resende (2015).

Onde:

IF: fator de impacto do periódico onde o documento foi publicado;

$\alpha$ : peso variando de 1 a 10 atribuído pelo pesquisador;

Ano da pesquisa: ano em que esta foi desenvolvida;

Ano da publicação: ano em que o periódico foi publicado.

O primeiro termo da equação  $\text{IF}/1000$  é utilizado para normalizar seu valor considerando outros critérios como os anos de pesquisa e publicação. Já  $\Sigma \text{Ci}$  utiliza o número bruto de citações que referênciam os documentos encontrados, tendo um papel de extrema relevância para o valor final do *InOrdinatio*.

Quanto menor o peso atribuído ao alfa, ou seja, mais próximo de 1, menor será a importância que será atribuída ao critério do ano, o maior valor de alfa nos leva que o critério ano, é mais relevante, dado ao maior número de publicações recentes disponível e usualmente consideramos dados acima de 10 anos de pesquisa nesses casos.

### **3 METODOLOGIA**

Estudos bibliométricos são ferramentas poderosas para mapear e analisar a produção científica em uma determinada área do conhecimento. Através da análise quantitativa e qualitativa de dados bibliográficos, como artigos científicos, patentes e livros, é possível identificar tendências, redes de colaboração, autores influentes e lacunas de pesquisa.

Este capítulo define o escopo da pesquisa bibliométrica, estabelecendo os parâmetros e limites que asseguram a validade e a precisão dos resultados. A delimitação precisa do escopo é fundamental para direcionar a investigação e responder ao Problema de Pesquisa de forma competente.

#### **3.1 Visão Geral**

Este estudo bibliométrico abrange o período compreendido entre 1994 e 2024 (inclusive), com o objetivo de traçar um panorama abrangente da evolução das pesquisas em Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) na indústria do petróleo. Essa delimitação temporal permite compreender a trajetória da pesquisa em CCS, identificar tendências e o crescente interesse no tema, evidenciado pelo volume de publicações científicas. A escolha do ano de 2024 como limite temporal visa capturar as pesquisas mais recentes e oferecer uma visão atualizada da evolução tecnológica em CCS.

#### **3.2 Justificativa e Limitações**

A combinação de múltiplas bases de dados, Scopus e Web of Science, visa garantir uma cobertura abrangente da literatura sobre CCS na indústria do petróleo. A seleção criteriosa de palavras-chave, combinando termos gerais e específicos, visa refinar a busca e garantir a relevância dos resultados. A inclusão de periódicos em inglês amplia a abrangência da pesquisa e inclui a produção científica de diferentes países e contextos.

É importante reconhecer que a pesquisa bibliométrica se limita aos trabalhos publicados e indexados nas bases de dados selecionadas. A tradução de palavras-chave pode influenciar os resultados da busca, e alguns trabalhos relevantes podem não ter sido incluídos.

### 3.3 Processo de Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada em duas bases de dados bibliográficas: Scopus, por sua abrangência em publicações científicas, especialmente nas áreas de ciência e tecnologia, e Web of Science, devido à sua longa tradição e indexação de periódicos de alto impacto.

A busca por artigos científicos foi realizada por uma combinação de palavras-chave, em inglês: "*carbon capture*", "*capture carbon storage*", "*CCS*", "*oil and gas industry*", "*Dioxide Carbon*", "*carbon sequestration*", "*CCS in oil*" e "*Enhanced Oil*". A pesquisa considerou somente artigos científicos publicados em inglês, por ser um tema de abrangência global e de grande interesse, incluindo a produção científica mais relevante no período.

Inicialmente, realizou-se uma busca sistemática nas bases de dados Scopus e Web of Science utilizando a combinação de palavras-chave. Essa etapa permitiu identificar um conjunto inicial de artigos científicos relacionados ao tema de CCS na indústria do petróleo, considerando o período e os idiomas delimitados. O número de estudos retornados em cada base de dados está disposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Número de estudos retornados em cada base de dados

<b>Base de Dados</b>	<b>Número de Artigos</b>
Scopus	962
Web of Science	986
<b>Total</b>	<b>1948</b>

Fonte: o autor.

Após análise qualitativa, 166 resultados que não se encaixavam no tema de estudo proposto, “A captura e armazenamento de carbono pela indústria de petróleo”, foram excluídos. Artigos com número 0 de citações foram incluídos, alinhados com o objetivo da pesquisa de traçar um panorama completo da evolução das pesquisas em CCS e sua relevância na indústria do petróleo. Estudos recentes fornecem insights valiosos sobre o desenvolvimento de novas tecnologias e áreas de interesse futuro. Os 1.782 documentos restantes foram incluídos para a aplicação da equação InOrdinatio em uma planilha no Excel.

Essa planilha foi organizada de forma a contemplar informações como título do artigo, autores, data de publicação, fonte da publicação, palavras-chave, resumo e outros dados relevantes para a análise.

A organização e o pré-processamento dos dados coletados constituíram uma importante etapa para a análise bibliométrica. Durante esse processo, foi realizada a remoção

de entradas duplicadas e exclusão de artigos que não se encaixavam nos critérios (como ser da língua inglesa), garantindo assim a consistência e precisão dos dados a serem analisados.

Quadro 1 – Consulta gerada na base de dados do Web of Science

```
(TS=(carbon capture storage in oil and gas industry) OR TS=(Dioxide carbon storage in oil industry) OR TS=(trends in carbon storage and sequestration) AND TS=(dioxide carbon storage) OR TS=(carbon sequestration in oil industry)) AND (LA=("ENGLISH"))
```

Fonte: o autor.

Quadro 2 – Consulta gerada na base de dados do Scopus

```
(TITLE-ABS-KEY ( oil ) AND ( carbon AND capture AND storage ) AND TITLE-ABS-KEY ( trends AND in AND carbon AND storage ) OR TITLE-ABS-KEY ( dioxide AND carbon AND storage ) OR TITLE-ABS-KEY ( carbon AND sequestration ) AND TITLE-ABS-KEY ( petroleum ) AND TITLE-ABS-KEY ( oil AND gas AND industry ) OR TITLE-ABS-KEY ( oil AND gas AND field ) ) AND PUBYEAR > 1993 AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) )
```

Fonte: o autor.

Nesta pesquisa, como afirmado anteriormente, utilizamos o valor de alfa igual a 10. Apesar das pesquisas em CCS não serem recentes, a grande preocupação com as mudanças climáticas e o desenvolvimento tecnológico têm impulsionado um número significativo de pesquisas recentes sobre o tema, conferindo maior relevância a publicações mais atuais.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise bibliométrica realizada neste estudo se divide em duas partes principais: 1) análise de desempenho e 2) estrutura conceitual. A análise de desempenho busca avaliar a contribuição de diferentes atores, como autores, instituições e países, para um determinado campo de pesquisa. Utilizando a análise de desempenho e o mapeamento científico, foram utilizados diversos indicadores para identificar os documentos, autores, periódicos e países mais influentes.

A estrutura conceitual, por sua vez, consiste em uma rede de coocorrências de termos ou palavras dentro de um domínio científico. A frequência de aparição conjunta de palavras indica a força de sua ligação, revelando as relações e tendências conceituais dentro do campo de estudo. Os resultados da análise são apresentados a seguir.

### 4.1 Análise de Desempenho

A Tabela 2 apresenta um resumo da análise bibliométrica realizada utilizando a ferramenta computacional RStudio, com base em dados coletados no período de 1994 a 2024. O estudo abrange um total de 1.782 documentos, provenientes das bases de dados Scopus e Web of Science. A taxa de crescimento anual na produção científica demonstra um crescente interesse no tema CCS, impulsionado pelas preocupações com as emissões de CO<sub>2</sub> e os compromissos ambientais assumidos por diversos países.

A média de idade dos documentos (6,49 anos) e a média de citações por documento (30,35) indicam a relevância e o impacto da pesquisa em CCS. A taxa de coautoria de 16,44%, com uma média de 4,82 autores por documento, sugere a existência de uma forte colaboração entre pesquisadores, o que pode contribuir para a troca de conhecimento, a agilidade no desenvolvimento de pesquisas e a busca por soluções inovadoras para os desafios relacionados às emissões de carbono.

Tabela 2 – Resumo estatístico dos dados utilizados neste estudo.

<b>Descrição</b>	<b>Resultados</b>
Intervalo de tempo	1994-2024
Fontes (periódicos, congressos etc.)	640
Documentos (artigos, revisão etc.)	1782
Taxa de crescimento anual	18,79%
Autores	5804
Autores de documentos de autoria única	106
Coautoria internacional	16,44%

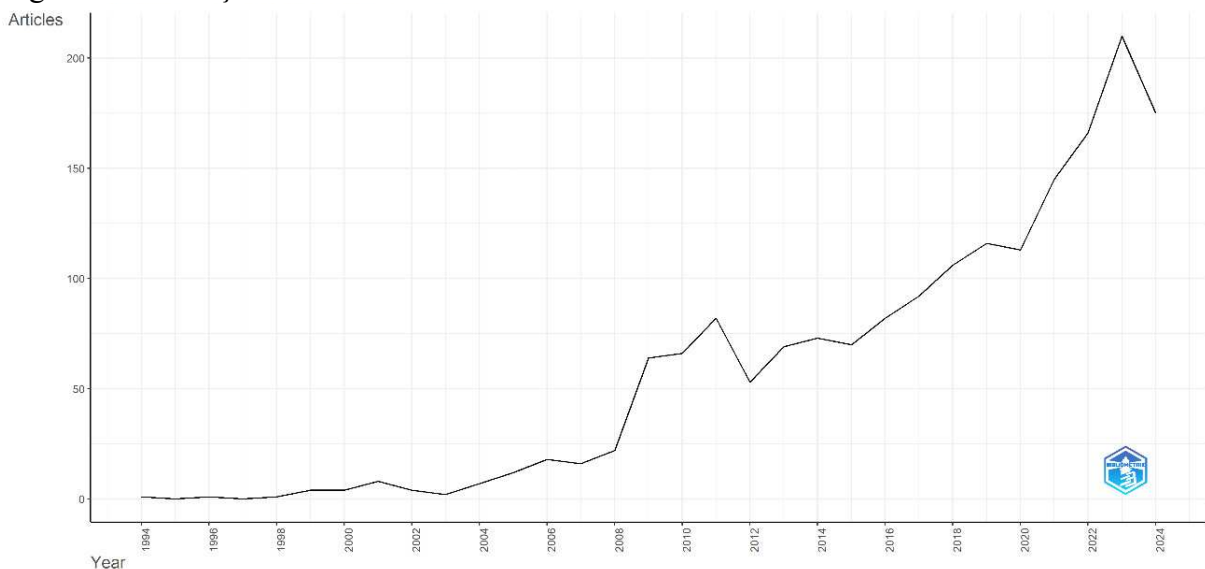
Coautores por documentos	4,82
Palavras-chave do autor (DE)	4261
Idade média do documento	6,49
Citações média por documento	30,35

Fonte: o autor.

A Figura 1 ilustra a produção científica anual em CCS, revelando um crescimento significativo ao longo do tempo. A análise demonstra um aumento considerável no número de documentos publicados, especialmente a partir de 2009, evidenciando uma expansão notável do campo de pesquisa. A idade média relativamente baixa dos documentos e a alta média de citações por documento indicam que a pesquisa em CCS possui impacto considerável e é reconhecida pela comunidade científica. Esse crescente interesse se deve, em grande parte, à intensificação da crise climática e à crescente necessidade de mitigar as emissões de carbono, especialmente no contexto da exploração de reservatórios de petróleo. O aumento de investimentos, tanto privados quanto governamentais, impulsiona a pesquisa nesse campo.

A Tabela 2 apresenta uma relativa alta taxa de coautoria em pesquisas sobre CCS, particularmente em nível internacional. Essa forte cultura de colaboração entre pesquisadores contribui significativamente para o aumento da produção científica no período analisado, impulsionando a troca de conhecimento e a geração de novas ideias e soluções.

Figura 1 – Produção Científica Anual



Fonte: o autor.

O período inicial da pesquisa em CCS, que se estende até 2007, é caracterizado por uma produção científica relativamente baixa e crescimento lento. O número de artigos publicados anualmente permaneceu abaixo de 30 durante a maior parte desse período,

indicando que o tema ainda não havia despertado grande interesse da comunidade científica. Essa fase inicial representou um período de desenvolvimento inicial das tecnologias de CCS.

A partir de 2008, observa-se um aumento gradual na produção científica, com o número de artigos publicados anualmente ultrapassando 50 e chegando a 80 em alguns anos. Esse crescimento moderado pode estar relacionado à crescente compreensão da importância do CCS para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> da indústria do petróleo e ao aumento dos investimentos em pesquisa e desenvolvimento nessa área.

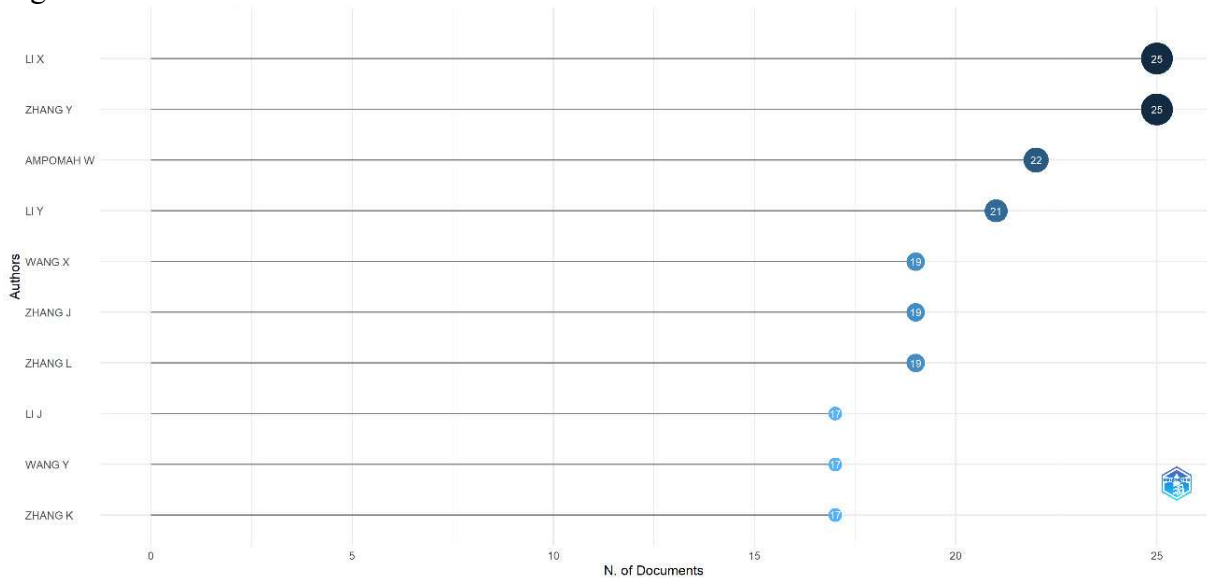
A partir de 2017, a curva de crescimento apresenta uma aceleração significativa. O número de artigos publicados anualmente ultrapassa 100 e atinge um pico de mais de 200 em 2023. Essa expansão acentuada da produção científica pode ser atribuída a diversos fatores. A crescente preocupação com as mudanças climáticas impulsiona a busca por soluções para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, tornando o CCS uma área de pesquisa estratégica. Além disso, o desenvolvimento de novas tecnologias de captura, transporte e armazenamento de CO<sub>2</sub>, como a captura direta do ar (DAC), tem tornado o CCS mais eficiente e economicamente viável, atraindo mais investimentos. Diversos países têm implementado políticas de incentivo à pesquisa e desenvolvimento de CCS, e empresas do setor de petróleo têm aumentado seus investimentos nessa área. O CCS tem ganhado maior destaque na mídia e nas discussões sobre mudanças climáticas, o que contribui para atrair mais pesquisadores para a área.

A produção científica anual demonstra que a pesquisa em CCS na indústria do petróleo tem experimentado um crescimento exponencial nos últimos anos. Essa tendência indica que o CCS está se consolidando como uma área de pesquisa estratégica para a indústria do petróleo e para o combate às mudanças climáticas. É provável que essa tendência de crescimento continue nos próximos anos, à medida que o CCS se torna uma tecnologia cada vez mais importante para a descarbonização da economia global.

#### ***4.1.1 Desempenho dos autores***

A análise da autoria dos documentos científicos é um aspecto crucial para compreender o desenvolvimento e a estrutura de um campo de pesquisa. A Figura 2 mostra os autores mais relevantes em pesquisas sobre CCS na indústria do petróleo.

Figura 2 – Autores Mais Relevantes

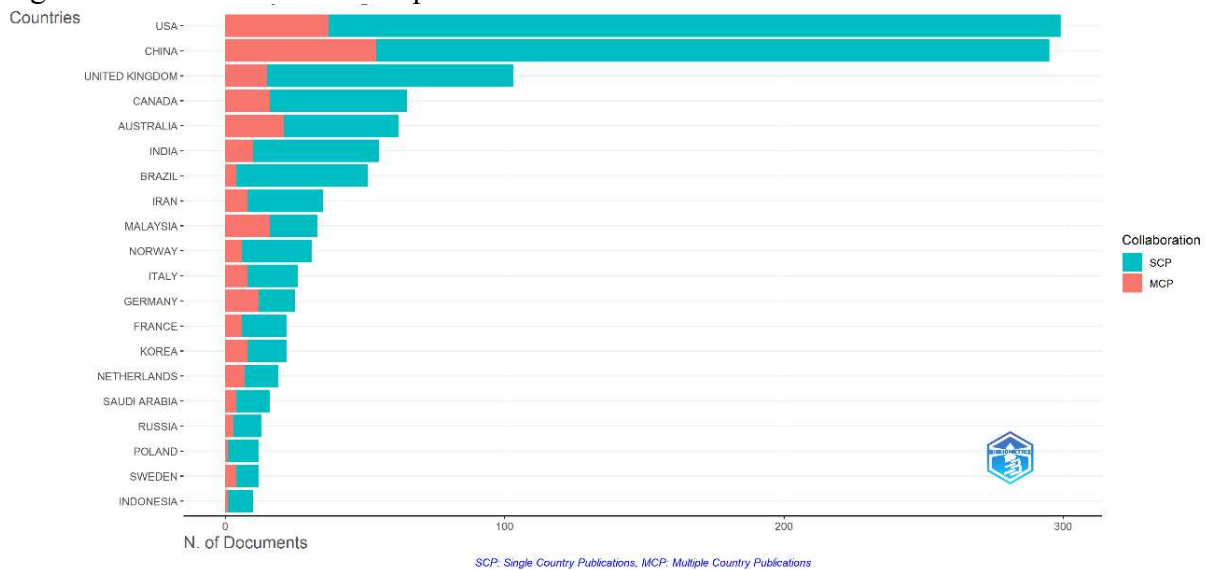


Fonte: o autor.

A análise da produção científica por autor revela a presença marcante de pesquisadores chineses entre os mais prolíficos e influentes na área de CCS. Essa dominância provavelmente reflete o investimento significativo da China em pesquisa e desenvolvimento nesse campo, impulsionado pela necessidade de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes do consumo de combustíveis fósseis, um dos maiores do mundo. O elevado número de emissões de CO<sub>2</sub> e a poluição em diversas cidades deste país têm impulsionado a busca por soluções para capturar e armazenar carbono, resultando em um investimento governamental considerável na área. A China prioriza a pesquisa em CCS como uma estratégia para mitigar os impactos ambientais relacionados ao consumo de combustíveis fósseis.

Além disso, a presença de autores de diferentes países entre os mais relevantes indica que a pesquisa em CCS no petróleo tem se expandido globalmente, com a participação de pesquisadores de diversas partes do mundo. Essa diversidade geográfica contribui para o avanço do conhecimento e para a busca por soluções inovadoras para os desafios do CCS. A colaboração internacional entre pesquisadores de diferentes países permite a troca de experiências, a aplicação de diferentes perspectivas e a criação de soluções mais eficazes.

Figura 3 – País do Autor Correspondente



Fonte: o autor.

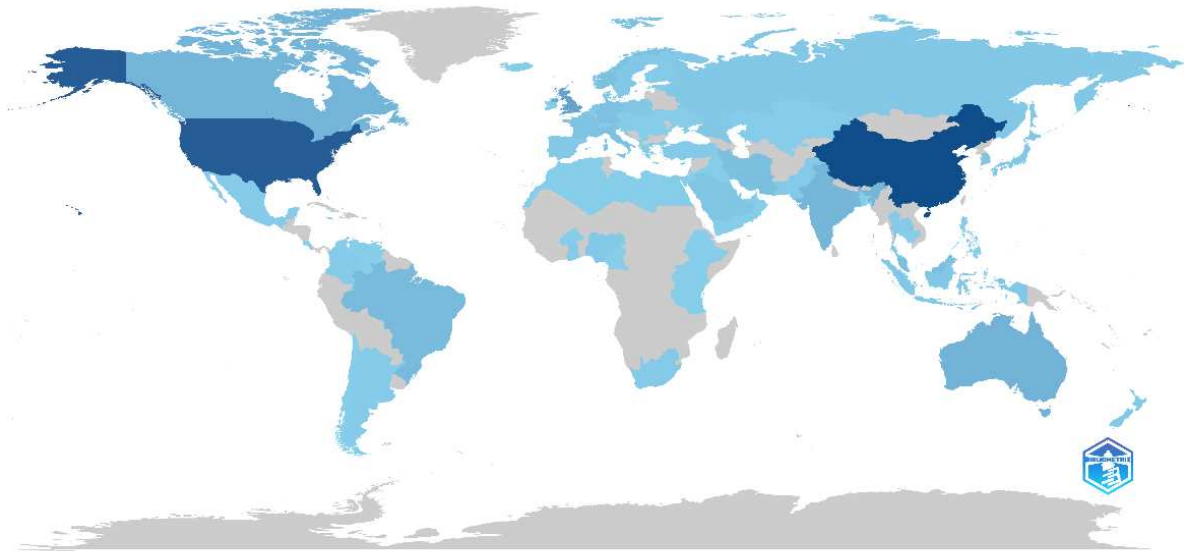
A Figura 3 ilustra a distribuição da produção científica sobre CCS por país, com base na nacionalidade do autor correspondente dos documentos. A análise considera o número de documentos publicados, distinguindo entre publicações de autoria única de um país (SCP – *Single Country Publications*) e publicações com autoria de múltiplos países (MCP – *Multiple Country Publications*).

Essa análise permite identificar os países que lideram a pesquisa em CCS, bem como o grau de colaboração internacional na área. Os Estados Unidos e a China se destacam com o maior número de publicações sobre CCS, com mais de 290 e 280 documentos, respectivamente. Essa liderança demonstra o forte investimento em pesquisa e desenvolvimento nesses países, impulsionado por políticas públicas de incentivo à inovação e pela busca por soluções para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub>. Os Estados Unidos, em particular, se posicionam na vanguarda da pesquisa sobre CCS, sendo pioneiros no desenvolvimento de novas tecnologias e abrigando instituições de renome como o MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) e o NETL (*National Energy Technology Laboratory*), que contribuem significativamente para o avanço da pesquisa científica.

O Reino Unido e o Canadá ocupam o terceiro e quarto lugar no ranking, com cerca de 110 e 80 documentos, respectivamente. Esses países também demonstram uma contribuição significativa para a pesquisa em CCS, refletindo a importância do tema em suas agendas de pesquisa e desenvolvimento. Outros países com participação relevante na produção científica sobre CCS incluem Austrália, Índia, Brasil, Irã, Malásia, Noruega, Itália, Alemanha, França e Coreia do Sul. A diversidade de países representados no gráfico demonstra que a pesquisa em

CCS é um esforço global, com a participação de pesquisadores de diferentes partes do mundo, promovendo a troca de conhecimento e a busca por soluções inovadoras para os desafios relacionados à mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>.

Figura 4 – Produção Científica por País



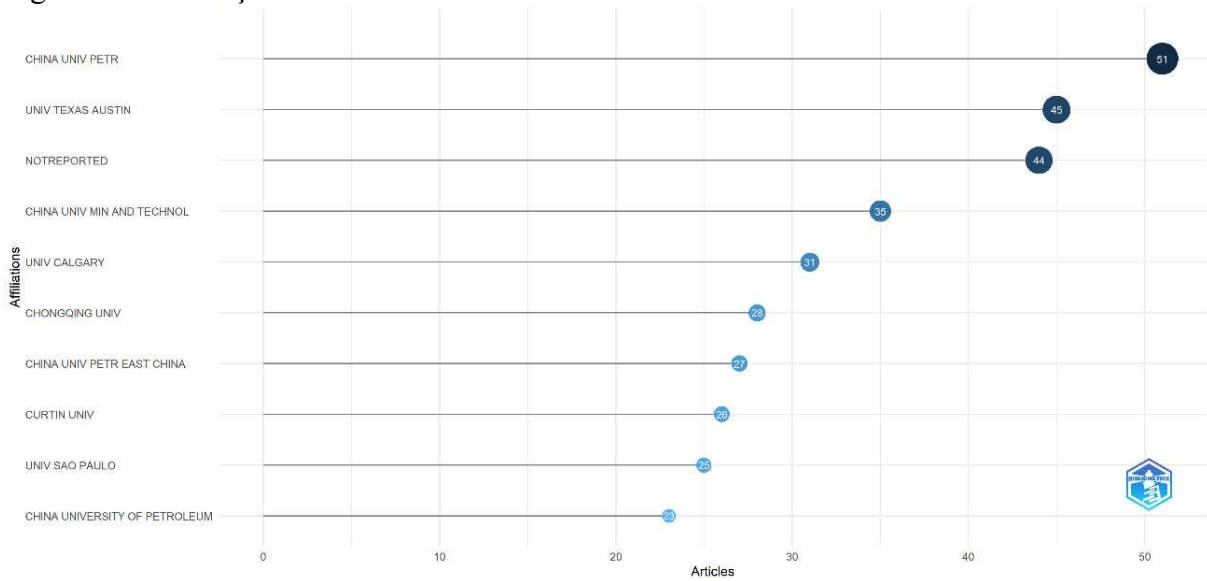
Fonte: o autor.

O mapa, apresentado na Figura 4, demonstra a distribuição geográfica da pesquisa em CCS, com os países que mais contribuem para o campo representados em azul escuro e aqueles com menor, mas ainda relevante, contribuição em azul mais claro. Essa visualização evidencia o caráter global da pesquisa em CCS, reforçando sua importância e relevância para a mitigação das emissões de carbono.

#### ***4.1.2 Desempenho de instituições***

A Figura 5 ilustra as instituições mais proeminentes em pesquisas sobre Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), com base no número de artigos publicados por pesquisadores afiliados a cada instituição. A análise desse gráfico permite identificar os principais centros de pesquisa e desenvolvimento em CCS, bem como inferir sobre a distribuição geográfica da produção científica nesse campo.

Figura 5 – Instituições Mais Relevantes



Fonte: o autor.

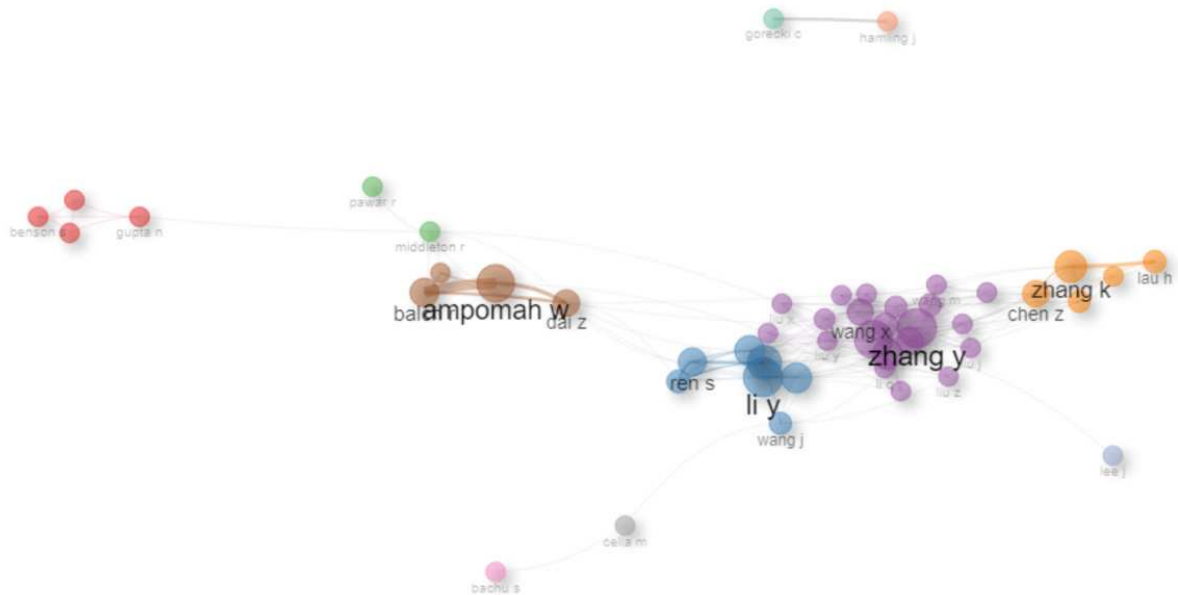
Observa-se uma dominância de instituições chinesas, com a *China University of Petroleum* se destacando como a mais relevante, com 51 artigos publicados. Esse destaque demonstra um forte investimento em pesquisa e desenvolvimento de CCS nessa universidade. Além dela, outras duas universidades chinesas, *China University of Mining and Technology* (35 artigos) e *China University of Petroleum East China* (27 artigos), figuram entre as 10 instituições mais relevantes. Essa forte presença de universidades chinesas em pesquisa e desenvolvimento de CCS reforça a posição da China como um dos principais polos de pesquisa, impulsionada pela necessidade de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> do país e pela busca por segurança energética.

A participação de universidades americanas e canadenses também é significativa, com a *University of Texas at Austin* (45 artigos) e a *University of Calgary* (31 artigos) ocupando o segundo e terceiro lugar no ranking, respectivamente. Essa presença demonstra a importância do tema nas universidades norte-americanas. A presença de instituições de diferentes países entre as mais relevantes indica que a pesquisa em CCS tem se expandido globalmente, com a participação de diversos centros de pesquisa ao redor do mundo.

A Universidade de São Paulo (25 artigos) se destaca como a instituição brasileira com maior contribuição para a pesquisa em CCS. Essa participação é impulsionada pela necessidade de o Brasil cumprir acordos internacionais de governos e investidores para alcançar uma agenda sustentável alinhada ao Acordo de Paris. A preocupação com a competitividade internacional, que demanda baixas emissões de carbono, também impulsiona a pesquisa na área

de CCS. O Brasil, como um grande produtor de petróleo, busca reduzir as emissões diretamente nos campos produtores por meio de tecnologias como o Recuperação Avançada de Petróleo (EOR), representando uma importante contribuição para o desenvolvimento desse campo de estudo.

Figura 6 – Mapa de Colaboração Entre os Autores



Fonte: o autor.

O mapa de colaboração entre autores, disposto na Figura 6, revela a formação de diversos grupos de pesquisa, caracterizados por autores que colaboram entre si com maior frequência. Esses grupos, representados por cores distintas no mapa, demonstram as redes de relacionamento entre os pesquisadores que trabalham no tema de CCS, e como o conhecimento é construído e disseminado através dessas colaborações.

O Grupo 1 (azul), liderado por Li Y, inclui autores como Ren S, Wang J e outros, formando uma rede de colaboração relativamente densa. O Grupo 2 (roxo), com Zhang Y como autor central, inclui Wang X e outros autores, demonstrando uma forte interação entre seus membros. O Grupo 3 (laranja), liderado por Zhang K, inclui Lau H e Chen Z, formando uma rede de colaboração menor, mas com conexões relevantes com outros grupos. O Grupo 4 (marrom), com Baiampomah W como autor central, inclui Dai Z e outros, demonstrando uma colaboração significativa entre seus membros.

A prevalência de grupos liderados por autores chineses contribui fortemente para o domínio da China em número de documentos publicados e a liderança global no desenvolvimento de pesquisas em CCS.



### 4.1.3 Documentos

A seguir foi elaborada uma tabela com os 10 documentos mais citados, para analisar de forma geral sua relevância com o tema de CCS, as datas dos documentos variam de 2000 a 2017, isso nos demonstra que apesar de não serem tão recentes, esses documentos serviram de base para as novas pesquisas, mostrando que exerceram muita influência na comunidade científica.

A Tabela 3 apresenta os 10 documentos mais citados em pesquisas sobre CCS, abrangendo o período de 2000 a 2017. Essa análise, embora baseada em dados não tão recentes, demonstra a influência significativa desses documentos na comunidade científica, servindo como base para novas pesquisas.

Tabela 3 – Os 10 documentos mais citados

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Nº Citações</b>	<b>Ano</b>	<b>InOrdinatio</b>
BLUNT M; BIJELJIC B; DONG H; GHARBI O; IGLAUER S; MOSTAGHIMI P; PALUSZNY A; PENTLAND C LAL R	Pore-scale imaging and modelling	1359	2013	899,68
OLAJIRE A	CO2 capture and separation technologies for end-of-pipe applications - a review	893	2010	845,64
BACHU S; BONIJOLY D; BRADSHAW J; BURRUSS R; HOLLOWAY S; CHRISTENSEN N; MATHIASSEN O NIU Y; TAN H; HUI S	CO2 storage capacity estimation: methodology and gaps	845	2007	781,94
MAC D N; FENNELL P; SHAH N; MAITLAND; GEOFFREY C G BACHU S	Ash-related issues during biomass combustion: alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures	747	2016	791,79
MAC D N; FENNELL P; SHAH N; MAITLAND; GEOFFREY C G BACHU S	The role of CO2 capture and utilization in mitigating climate change	743	2017	741,21
SIX J; OGLE S; BREIDT F; CONANT R; MOSIER A; PAUSTIAN K	Sequestration of CO2 in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change	743	2000	637,56
SIX J; OGLE S; BREIDT F; CONANT R; MOSIER A; PAUSTIAN K	The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term	635	2004	620,85
AMINU M; NABAVI S; ROCHELLE C; MANOVIC V	A review of developments in carbon dioxide storage	605	2017	614,85

MIDDLETON R; CAREY J; CURRIER R; HYMAN J; KANG Q; KARRA S; JIMENEZ- MARTINEZ J; PORTER M; VISWANATHAN H	Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: opportunities and challenges for supercritical	601	2015	584,21
--	--	-----	------	--------

Fonte: o autor.

A análise da Tabela 3 oferece uma visão abrangente das áreas de pesquisa mais relevantes e das tecnologias que impulsionam o avanço do conhecimento nesse campo. Através do exame dos títulos, das fontes de publicação e do número de citações, podemos traçar um panorama das tendências e prioridades que direcionam os esforços da comunidade científica.

Observa-se que as tecnologias de captura e separação de CO<sub>2</sub>, bem como o armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>, ocupam um lugar de destaque entre os temas mais pesquisados. O artigo de OLAJIRE A, publicado em 2010 na revista *Energy*, aborda tecnologias de captura e separação de CO<sub>2</sub> para aplicações em fim de tubulação e, com suas 893 citações, evidencia a importância crucial da pesquisa em tecnologias de captura para viabilizar a implementação do CCS em larga escala.

O armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>, por sua vez, emerge como um tema central em diversos documentos, confirmando sua relevância para a viabilidade do CCS. O artigo de BACHU S e colaboradores, publicado em 2007 na *International Journal of Greenhouse Gas Control*, explora a estimativa da capacidade de armazenamento e aponta lacunas de pesquisa nesse campo. Outros trabalhos, como o de MAC D e colaboradores, publicado na *Nature Climate Change* em 2017, abordam o papel do CCS na mitigação das mudanças climáticas e a utilização do CO<sub>2</sub> capturado. BACHU S, com um artigo publicado em 2000 na *Energy Conversion and Management*, apresenta critérios para a seleção de locais apropriados para o armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>.

Embora não diretamente relacionado ao CCS, o artigo de BLUNT M e colaboradores, publicado na *Advances in Water Resources* em 2013, que apresenta técnicas de imagem e modelagem em escala de poros, recebe destaque por sua relevância para a compreensão do fluxo de fluidos em meios porosos, um aspecto crucial para o sucesso do armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>. Além disso, o artigo de MIDDLETON R e colaboradores, publicado em 2015 na *Applied Energy*, que explora os desafios e oportunidades da utilização de fluidos supercríticos em fraturamento hidráulico em reservatórios de gás de xisto, demonstra a crescente importância da pesquisa em tecnologias para a exploração de recursos não convencionais e seu potencial para o desenvolvimento do CCS.

A análise conjunta desses trabalhos revela que o armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> e a captura de CO<sub>2</sub> são tecnologias-chave para o avanço do CCS, com a mitigação das mudanças climáticas como um objetivo central da pesquisa. A alta frequência de citações desses documentos demonstra sua influência significativa na área e reforça a importância dos temas abordados para a comunidade científica, fornecendo direcionamento para futuras pesquisas e investimentos em CCS.

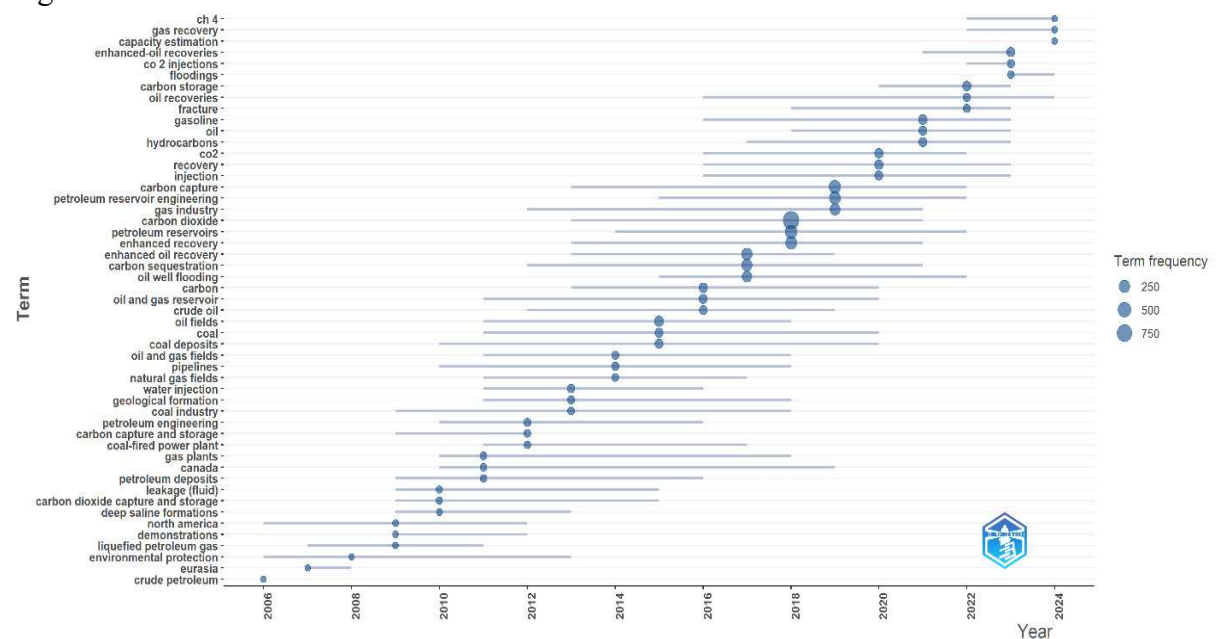
## 4.2 Estrutura Conceitual

### 4.2.1 Tendências de Assunto

O gráfico "Tendências de Assunto", disposto na Figura 7, ilustra a evolução da popularidade de termos ou palavras-chave ao longo do tempo dentro do campo de pesquisa em CCS. A análise desse gráfico permite visualizar o crescimento, declínio e estabilidade de temas relevantes relacionados ao CCS.

Linhas ascendentes com pontos maiores indicam temas em ascensão, com aumento na frequência ao longo dos anos, refletindo maior interesse e pesquisa. Linhas descendentes ou pontos menores sugerem temas com menor popularidade, possivelmente sendo substituídos por novas áreas de foco. Linhas horizontais indicam temas com frequência estável, representando áreas de pesquisa consolidadas e contínuas.

Figura 7 – Tendências de Assunto



Fonte: o autor.

O gráfico também demonstra um crescimento geral na frequência da maioria dos termos ao longo do período analisado, indicando um aumento no volume de pesquisas sobre CCS e refletindo a crescente importância do tema para mitigar as mudanças climáticas.

Alguns temas se destacam ao longo do tempo, como:

- **Enhanced Oil Recovery (EOR):** Aborda a utilização do CO<sub>2</sub> para aumentar a produção de petróleo em campos maduros, um tema que tem se mantido relevante ao longo dos anos, impulsionado pelo interesse da indústria em conciliar a recuperação de petróleo com a redução das emissões.
- **Carbon Capture:** A captura de CO<sub>2</sub> é um tema fundamental em CCS, consistindo na separação e captura do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) dos gases de combustão ou dos fluxos de processo industrial (como usinas e refinarias), impedindo que seja liberado na atmosfera. O crescimento constante ao longo do tempo reflete os avanços tecnológicos e o desenvolvimento de novos métodos de captura.
- **Carbon Storage:** O armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> é outro tema central em CCS, com pesquisas focadas em diferentes tipos de formações geológicas e na segurança e viabilidade em longo prazo do armazenamento.

Outros temas apresentam um crescimento mais recente, indicando áreas de pesquisa emergentes em CCS:

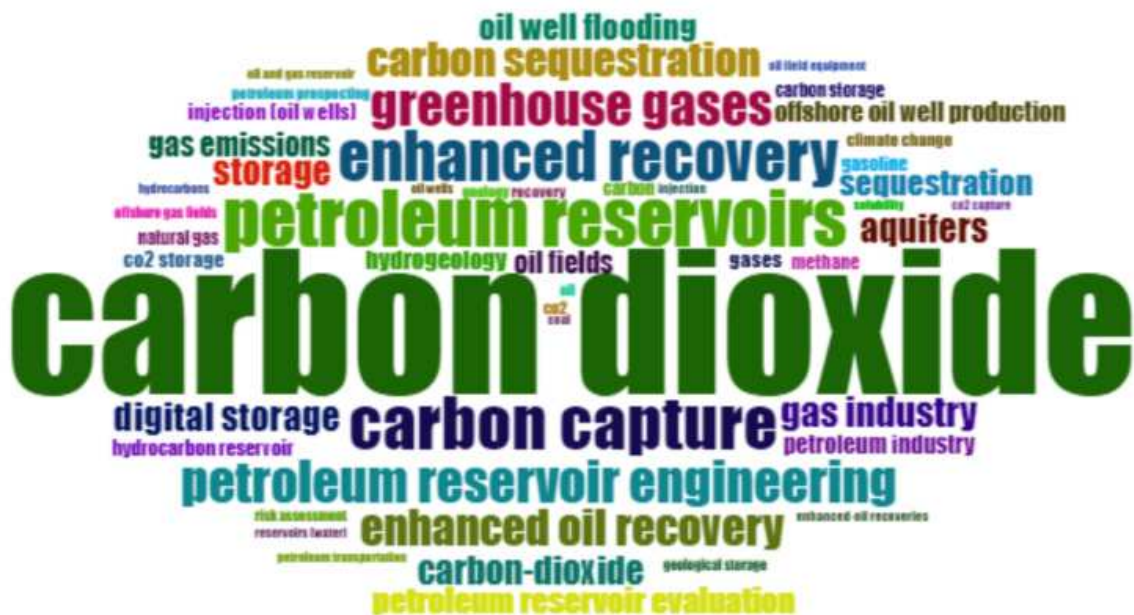
- **Capacity Estimation:** A estimativa da capacidade de armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> é um processo complexo que envolve a integração de dados geológicos, geofísicos, geoquímicos e de engenharia de reservatórios. Essa área tem se tornado cada vez mais importante, à medida que a implantação de projetos de CCS em larga escala se torna mais viável.
- **CO<sub>2</sub> Injection:** A injeção de CO<sub>2</sub> em formações geológicas, seja para armazenamento ou para EOR, tem despertado o interesse de pesquisadores, com estudos focados na otimização do processo de injeção e na segurança das operações.
- **Flooding:** A técnica de injeção de água ou CO<sub>2</sub> para aumentar a produção de petróleo, conhecida como *flooding*, tem sido um tema de pesquisa crescente em CCS, principalmente em relação à sua aplicação em conjunto com o armazenamento de CO<sub>2</sub>.

O monitoramento das tendências de assunto é fundamental para identificar as áreas de pesquisa mais promissoras, orientar investimentos em pesquisa e promover a colaboração entre pesquisadores para acelerar o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de CCS.

#### 4.2.2 Palavras-chave

A nuvem de palavras, como visto na Figura 8, gerada a partir de um conjunto de documentos sobre CCS, oferece uma representação visual das palavras-chave mais frequentes e relevantes na pesquisa sobre Captura e Armazenamento de Carbono. O tamanho e a cor de cada palavra indicam sua frequência nos documentos analisados, proporcionando uma visão abrangente dos temas e conceitos que dominam o campo de estudo.

Figura 8 – Mapa de Palavras



Fonte: o autor.

A expressão "*Carbon Dioxide*", em destaque e com o maior tamanho, reafirma o elemento central da pesquisa em CCS. A expressão "*Petroleum Reservoirs*" também se destaca, indicando que a pesquisa em CCS se concentra fortemente na aplicação dos conceitos de captura e armazenamento nos próprios reservatórios, visando mitigar os impactos da produção de petróleo e reduzir as emissões. Técnicas como EOR, que aumenta a produção e utiliza o CO<sub>2</sub> no processo, exemplificam essa aplicação.

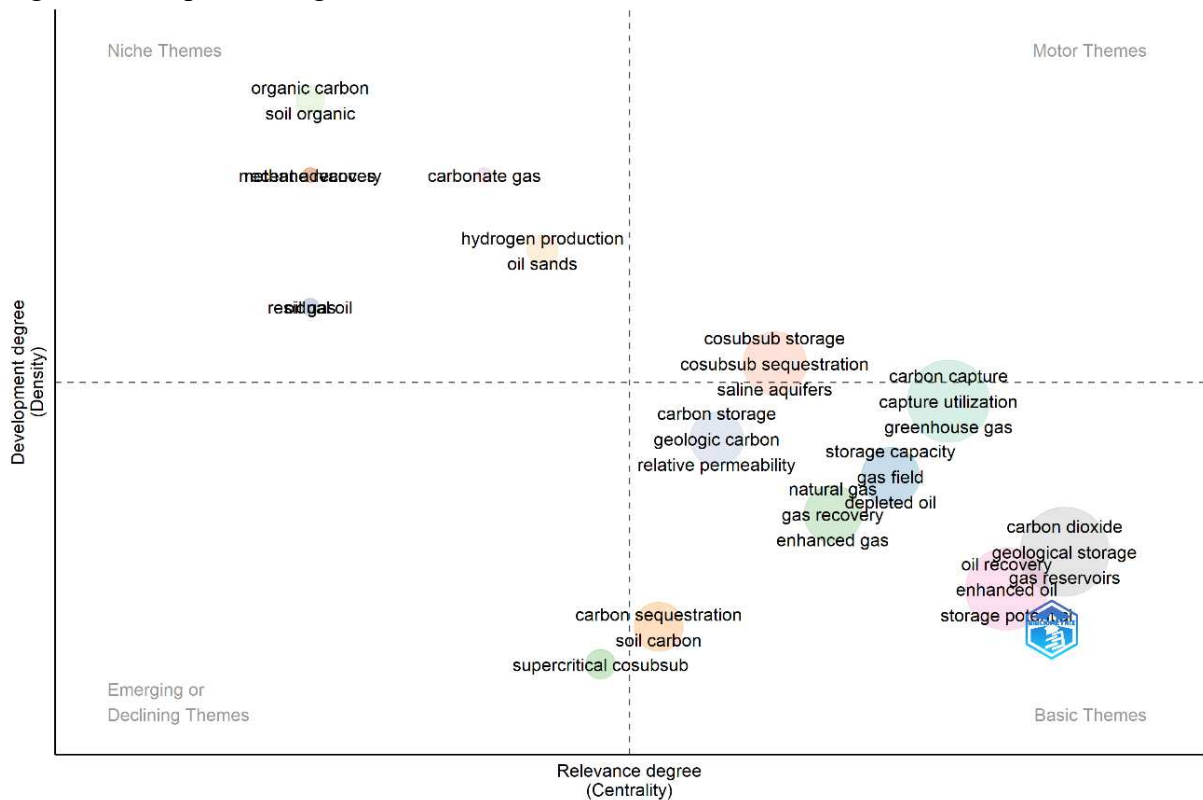
Além dessas expressões, termos como "*Enhanced Recovery*", "*Carbon Capture*", "*Gas Industry*", "*Gas Emissions*" e "*Petroleum Industry*" também se destacam na nuvem de palavras, evidenciando a relevância desses temas para a pesquisa em CCS.

#### 4.2.3 *Diagrama Estratégico*

O Diagrama Estratégico é uma ferramenta útil na análise bibliométrica para visualizar a relação entre a relevância e o grau de desenvolvimento de diferentes temas de pesquisa. Neste gráfico, disposto na Figura 9, os temas são posicionados em quatro quadrantes, classificados como:

- **Temas de Nicho:** Alta densidade (desenvolvimento) e baixa centralidade (relevância). Esses temas são áreas de pesquisa com menor relevância central, como "*Organic Carbon*", "*Soil Organic*" e "*Residual Gasoil*".
- **Temas Motores:** Alta densidade e alta centralidade. Esses temas apresentam um grande volume de publicações e pesquisas em andamento, impulsionam e direcionam futuras pesquisas, sendo os mais relevantes na área.
- **Temas Básicos:** Baixa densidade e alta centralidade. Esses temas representam áreas de pesquisa consolidadas e com alta relevância, mas com menor desenvolvimento recente, como "*Carbon Dioxide*" e "*Geological Storage*".
- **Temas Emergentes ou Declinantes:** Baixa densidade e baixa centralidade. "*Hydrogen Production*", "*Oil Sands*" e "*Supercritical CO<sub>2</sub>*" são exemplos de temas que podem ser áreas emergentes com potencial de crescimento futuro ou áreas de pesquisa em declínio.

Figura 9 – Mapa Estratégico



Fonte: o autor.

Este diagrama destaca os seguintes temas motores na pesquisa de CCS:

- **Carbon Capture:** A captura de carbono é um tema central em CCS, com alta densidade de pesquisas e grande relevância para o desenvolvimento da tecnologia.
- **Capture Utilization:** A utilização do CO<sub>2</sub> capturado, em vez de apenas armazená-lo, tem ganhado atenção como uma forma de agregar valor ao processo de CCS e reduzir custos.
- **Storage Capacity:** A capacidade de armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> é um fator crucial para a viabilidade em larga escala do CCS.
- **Geological Storage:** O armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> em formações subterrâneas, como aquíferos salinos e campos de petróleo e gás esgotados, é a principal tecnologia de armazenamento em CCS.
- **Natural Gas Field, Depleted Oil, Gas Recovery, Enhanced Gas, Enhanced Oil:** Esses temas estão relacionados à aplicação do CCS em campos de petróleo e gás natural, tanto para o armazenamento de CO<sub>2</sub> quanto para o aumento da produção de hidrocarbonetos.

## 5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa bibliométrica, realizada através da análise de um elevado número de publicações sobre Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) no período de 1994 a 2024, revelou a crescente relevância do tema na comunidade científica internacional. A utilização da *Methodi Ordinatio* e a ferramenta RStudio com o pacote *bibliometrix* possibilitou a identificação dos trabalhos de maior impacto e influência na área, desvendando os padrões e tendências que moldaram a pesquisa em CCS ao longo das últimas décadas.

A análise bibliométrica apontou para a crescente importância da modelagem em escala de poros e do sequestro de carbono como temas centrais na investigação científica em CCS, evidenciada pelo expressivo número de citações em trabalhos como "Pore-scale imaging and modelling" (Blunt et al., 2008). A necessidade de aprimorar as metodologias para a estimativa da capacidade de armazenamento geológico também se destaca como um foco crucial, como evidenciado por trabalhos como "CO2 Capture and separation Technologies for end-of-pipe applications – a review" (Olajire, 2010) e "CO2 Storage Capacity Estimation: Methodology and Gaps" (Bachu et al., 2007).

O estudo demonstrou um aumento elevado no número de publicações científicas sobre CCS ao longo do período analisado, indicando o crescente interesse global pela temática. A China e os Estados Unidos se destacam como polos de pesquisa, demonstrando a importância da CCS na redução das emissões de carbono, especialmente durante a produção e exploração de petróleo. A participação significativa de outros países, como Reino Unido, Canadá e Brasil, indica um compromisso global com a descarbonização e a busca por soluções para os desafios climáticos.

O mapeamento das redes de colaboração entre autores revelou a formação de grupos de pesquisa com forte interação interna, impulsionando a inovação e a velocidade da pesquisa científica. A colaboração internacional, especialmente entre pesquisadores da China, Estados Unidos, Reino Unido e Canadá, se destaca como um fator crucial para o avanço acelerado da pesquisa em CCS.

A análise dos temas de pesquisa mais frequentes revelou a centralidade da captura de carbono, armazenamento geológico, recuperação avançada de petróleo (EOR) e mitigação das mudanças climáticas. A identificação de termos emergentes, como *capacity estimation* e *CO2 injection*, indica as áreas que têm ganhado maior atenção nos últimos anos.



Apesar da riqueza de informações obtidas através da análise bibliométrica, este estudo apresenta algumas limitações. A primeira delas reside na dependência de bases de dados específicas, o que pode influenciar os resultados e gerar vieses na análise. A escolha das bases de dados e o período analisado, embora justificados, podem restringir a abrangência da pesquisa e a generalização dos resultados.

Outra limitação se refere à dificuldade em quantificar o impacto social e econômico da pesquisa em CCS. O estudo se concentrou na análise da produção científica, sem aprofundar-se na análise do impacto real das pesquisas no desenvolvimento de tecnologias e políticas relacionadas à CCS.

Este estudo abre portas para diversas pesquisas futuras que podem aprofundar o conhecimento sobre CCS e contribuir para o desenvolvimento de soluções eficazes para a mitigação das mudanças climáticas. Algumas sugestões para pesquisas futuras incluem:

- Investigar a influência de diferentes fontes de financiamento na pesquisa em CCS, seja governamental ou privada, analisando o impacto de cada fonte na orientação e nos resultados das pesquisas.
- Analisar o impacto das políticas públicas no desenvolvimento da tecnologia CCS, avaliando como as políticas influenciam a pesquisa, o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de CCS.
- Mapear as redes de colaboração em CCS entre os países, identificando os principais parceiros internacionais e as áreas de colaboração mais relevantes.
- Explorar o potencial da inteligência artificial e de outras tecnologias emergentes na otimização do CCS, analisando como essas tecnologias podem contribuir para a eficiência e o desenvolvimento de tecnologias de CCS.
- Investigar o papel das regulamentações ambientais na pesquisa e desenvolvimento de CCS, analisando como as regulamentações influenciam a pesquisa, o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de CCS.

As conclusões e sugestões apresentadas neste trabalho fornecem um subsídio importante para o avanço do conhecimento na área de CCS e podem ser utilizados por pesquisadores, formuladores de políticas e empresas do setor de energia para nortear suas ações e investimentos.

## REFERÊNCIAS

- AMINU, M. D.; NABAVI, S.; ROCHELLE, C.; MANOVIC, eV. **A review of developments in carbon dioxide storage**. *Applied Energy*, v.208, p. 1389-1419, 2017.
- ANDREW, M.; BIJELJIC, B.; BLUNT, M. J. **Pore-scale imaging of geological carbon dioxide storage under in situ conditions**. *Geophysical Research Letters*, v. 40, n. 15, p. 3915–3918, 7 ago. 2013.
- BACHU, S. *et al.* **CO<sub>2</sub> storage capacity estimation: Methodology and gaps**. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 1, n. 4, p. 430–443, out 2007.
- BACHU, S. **Sequestration of CO<sub>2</sub> in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change**. *Energy Conversion and Management*, v. 41, p. 953-970, 2000.
- BLUNT, M.; BLUNT, M. **Design of carbon dioxide storage**. *Nature Precedings*, 10 dez. 2008.
- BUI, M. *et al.* **Carbon capture and storage (CCS): the way forward**. *Energy & Environmental Science*, v. 11, n. 5, p. 1062–1176, 2018.
- CHADWICK, A. *et al.* **Best practice for the storage of CO<sub>2</sub> in saline aquifers - observations and guidelines from the SACS and CO<sub>2</sub>STORE projects**. 1 mar. 2008.
- DONTHU, N. *et al.* **How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines**. *Journal of Business Research*, v. 133, p. 285–296, set. 2021.
- GABRIC, A. J. **The Climate Change Crisis: A Review of Its Causes and Possible Responses**. *Atmosphere*, v. 14, n. 7, p. 1081–1081, 27 jun. 2023.
- GIBBINS, J.; CHALMERS, H. **Carbon capture and storage**. *Energy Policy*, v. 36, n. 12, p. 4317–4322, dez. 2008.
- GIBBINS, J. **CCS – From an Oil Crisis to a Climate Crisis Response**. *Energy and Environment Series*. ch. 17, pp. 559-562, 2019.
- KERR, T. **Carbon Dioxide Capture and Storage: Priorities for Development**. *Carbon & Climate Law Review*, v. 2, n. 4, p. 4, 2009.
- LAL, R. **Sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> in global carbon pools**. *Energy & Environmental Science*, v. 1, n. 1, p. 86, 2008.
- LEHMANN, M. **Offshore carbon dioxide capture and storage: an international environmental law perspective**. Frankfurt Am Main: P. Lang, 2013.
- 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, n. 39, p. 426–443, nov. 2014.

METZ, B. *et al.* **Carbon Dioxide Capture and Storage**. IPCC - Special Report, p. 481, 2005.

MAHMOUD, M.; ELKATATNY, S. M. **Dual Benefit of CO<sub>2</sub> Sequestration: Storage and Enhanced Oil Recovery**. Petroleum & Petrochemical Engineering Journal, v. 1, n. 2, 2017.

MIDDLETON, R. S. *et al.* **Shale gas and non-aqueous fracturing fluids: Opportunities and challenges for supercritical CO<sub>2</sub>**. Applied Energy, v. 147, p. 500–509, jun. 2015.

MORAL-MUÑOZ, J. A. *et al.* **Software tools for conducting bibliometric analysis in science: An up-to-date review**. El Profesional de la Información, v. 29, n. 1, 19 jan. 2020.

NIU, Y.; TAN, H.; HUI, S. **Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures**. Progress in Energy and Combustion Science, v. 52, p. 1–61, fev. 2016.

PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. **Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication**. Scientometrics, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, 12 set. 2015.

ROCHELLE, G. Amine, **Scrubbing for CO<sub>2</sub> Capture**, v. 325, p. 1652–1654, 2009.

SIX, J. *et al.* **The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term**. Global Change Biology, v. 10, n. 2, p. 155–160, fev. 2004.