

Bibliometric Analysis of University–Industry Technology Transfer in Carbon Capture and Utilization Technologies: Trends and Perspectives

Walter Manuel Hoyos-Alayo¹

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c23712@utp.edu.pe

Abstract— University–industry technology transfer plays a strategic role in the development of carbon capture and utilization (CCU) technologies, in response to global decarbonization and sustainability challenges. However, significant gaps persist in the articulation between academia and industry, particularly in regions such as Latin America, where collaborative solution development remains incipient. In this context, the present study aimed to analyze trends, key actors, and emerging perspectives in the scientific literature on technology transfer applied to CCU technologies. A bibliometric mapping methodology was employed on a corpus of 132 publications indexed in Scopus between 1996 and 2025, using tools such as Bibliometrix and VOSviewer to analyze co-authorship networks, thematic evolution, and institutional distribution. The results show a sustained growth in the literature since 2010, with a notable peak in 2024, led by authors and institutions from China, the United States, Belgium, and the United Kingdom. The predominant subject areas include energy, engineering, and environmental sciences, while the most frequent keywords are technology transfer, carbon dioxide, and carbon capture. Thematic analysis reveals a transition from technical approaches toward integrative perspectives focused on sustainability, international cooperation, and intellectual property. It is concluded that, although the field has achieved a high level of technical maturity, strengthening collaborative networks and institutional frameworks remains essential to accelerate the adoption of low-carbon technologies at a global scale.

Keywords-- Technology Transfer; Carbon Capture; University–Industry; Bibliometrics; Sustainability.

Análisis bibliométrico de la transferencia tecnológica universidad–industria en tecnologías de captura y utilización de CO₂: tendencias y perspectivas

Walter Manuel Hoyos-Alayo¹

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c23712@utp.edu.pe

Resumen— La transferencia tecnológica entre universidades e industrias desempeña un rol estratégico en el desarrollo de tecnologías de captura y utilización de CO₂ (CCU), en respuesta a los desafíos globales de descarbonización y sostenibilidad. No obstante, persisten brechas significativas en la articulación universidad–industria, especialmente en regiones como América Latina, donde el desarrollo de soluciones colaborativas aún es incipiente. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar las tendencias, actores clave y perspectivas emergentes en la producción científica sobre transferencia tecnológica aplicada a tecnologías CCU. Para ello, se aplicó una metodología de cartografía bibliométrica sobre un corpus de 132 publicaciones indexadas en Scopus entre 1996 y 2025, utilizando herramientas como Bibliometrix y VOSviewer para el análisis de redes de coautoría, evolución temática y distribución institucional. Los resultados evidencian un crecimiento sostenido de la literatura a partir de 2010, con mayor intensidad en 2024, liderado por autores e instituciones de China, Estados Unidos, Bélgica y Reino Unido. Las áreas disciplinares predominantes fueron energía, ingeniería y ciencias ambientales, mientras que los términos clave más frecuentes incluyen technology transfer, carbon dioxide y carbon capture. El análisis temático revela una transición desde enfoques técnicos hacia perspectivas integradoras centradas en sostenibilidad, cooperación internacional y propiedad intelectual. Se concluye que, aunque el campo presenta un alto nivel de madurez técnica, requiere fortalecer las redes colaborativas y los marcos institucionales para acelerar la adopción de tecnologías de bajo carbono a escala global.

Palabras clave— Transferencia Tecnológica; Captura de Carbono; Universidad–Industria; Bibliometría; Sostenibilidad.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la transferencia tecnológica entre universidades e industrias se ha consolidado como un factor estratégico en la generación de soluciones innovadoras frente a desafíos globales como el cambio climático, la sostenibilidad energética y la descarbonización industrial [1], [2], [3]. Esta interacción no solo permite vincular el conocimiento científico con las necesidades del mercado, sino que además potencia el desarrollo de tecnologías avanzadas mediante sinergias entre el ámbito académico y el sector productivo [4], [5]. En este contexto, la captura y utilización de dióxido de carbono (CO₂), conocida como CCU por sus siglas en inglés, representa una de las líneas tecnológicas más prometedoras para mitigar emisiones y promover una economía circular del carbono [6], [7].

Las tecnologías de captura y utilización de dióxido de carbono (CO₂), conocidas como CCU por sus siglas en inglés, comprenden un conjunto diverso de procesos físico-químicos

y biotecnológicos orientados a la separación del CO₂ de corrientes industriales, como gases de combustión en termoeléctricas, procesos cementeros, siderúrgicos o refinerías, y su posterior valorización como materia prima en aplicaciones de alto valor agregado [8], [9], [10]. Estas aplicaciones incluyen la producción de combustibles sintéticos, polímeros, materiales de construcción, fertilizantes e incluso bebidas carbonatadas, enmarcándose dentro del paradigma de la economía circular del carbono [11]. Debido a la alta exigencia técnica y la necesidad de innovación continua, el desarrollo y escalamiento de tecnologías CCU requiere una articulación eficiente entre investigación científica avanzada, capacidad tecnológica instalada y mecanismos institucionalizados de transferencia de conocimientos y tecnologías [12]. En este escenario, la colaboración universidad–industria se convierte en un componente estructural para superar la brecha entre la investigación básica y la aplicación comercial; no obstante, este proceso enfrenta importantes limitaciones, especialmente en América Latina, donde subsisten barreras normativas, fragmentación institucional, baja inversión privada en I+D y una débil cultura de vinculación entre actores académicos y empresariales [13], [14].

La transferencia tecnológica en el ámbito de las tecnologías CCU va mucho más allá de la simple cesión de resultados de investigación o patentes; se configura como un proceso multidimensional que incluye la generación de redes interinstitucionales, la consolidación de plataformas colaborativas de innovación, la co-creación de soluciones tecnológicas mediante proyectos de I+D conjunto, el desarrollo de spin-offs universitarios, y la participación en ecosistemas de innovación abierta [4], [15]. Esta complejidad exige analizar no solo el volumen de producción científica, sino también la configuración de los actores, los patrones de coautoría, los flujos de conocimiento y los temas predominantes en la agenda investigativa; asimismo, entender estas dinámicas resulta clave para identificar los factores que facilitan o restringen la colaboración efectiva entre la academia y el sector productivo en el desarrollo de tecnologías para la descarbonización industrial [11], [16]; sin embargo, pese a su creciente relevancia, no se cuenta aún con un análisis sistemático y estructurado, basado en métodos bibliométricos, que permita mapear el estado actual del conocimiento, los vacíos temáticos, las redes de colaboración y las perspectivas emergentes en el campo de la transferencia tecnológica vinculada a tecnologías de captura y uso de CO₂.

El contexto posterior a la pandemia de COVID-19 ha intensificado la necesidad global de reconfigurar los modelos productivos hacia esquemas resilientes y sostenibles, donde la descarbonización ocupa un lugar prioritario en las agendas públicas y privadas; en este escenario, las tecnologías de CCU han ganado protagonismo como herramientas estratégicas dentro de los planes nacionales de transición energética, los compromisos climáticos multilaterales (como el Acuerdo de París) y los marcos de inversión verde impulsados por organismos multilaterales y fondos de capital ambiental [13], [17]. Este impulso ha estado acompañado por un aumento significativo en la financiación de proyectos de I+D aplicada, la creación de centros tecnológicos especializados y la promoción de consorcios multiactor que integran universidades, centros de investigación, empresas e instancias gubernamentales; en consecuencia, la transferencia tecnológica adquiere un papel determinante no solo para garantizar la viabilidad técnico-económica de las soluciones desarrolladas, sino también para acelerar su adopción en el mercado, generar valor social y cumplir con los compromisos internacionales de mitigación del cambio climático [15], [18], [19].

A nivel mundial, se observan importantes esfuerzos de cooperación en torno a la captura y utilización de CO₂, liderados por países como China, Estados Unidos, Alemania y el Reino Unido; sin embargo, en América Latina el panorama es menos visible, con una menor representación en la literatura científica internacional, menor inversión privada en investigación aplicada y una fragmentación de los esfuerzos institucionales [7], [20], [21]; en ese sentido, identificar estas dinámicas y vacíos regionales permitirá establecer líneas de acción orientadas a fortalecer los ecosistemas de innovación colaborativa y acelerar la adopción de tecnologías de bajo carbono.

Este estudio tiene como objetivo analizar las tendencias y perspectivas de la transferencia tecnológica universidad-industria en el campo de las tecnologías de captura y utilización de CO₂, mediante un análisis bibliométrico de la producción científica publicada entre 1996 hasta la actualidad; para ello, se aplican herramientas de análisis bibliométrico que permiten examinar la evolución temporal, las redes de coautoría, la distribución geográfica, las revistas y autores más influyentes, así como los clústeres temáticos emergentes. El corpus de análisis se obtuvo de la base de datos Scopus a partir de una estrategia de búsqueda estructurada con operadores booleanos y términos clave alineados al objeto de estudio.

Con el propósito de aportar una visión integral del estado del arte y orientar futuras líneas de investigación y política científica, se plantea la siguiente pregunta general: ¿Cuál es el nivel de desarrollo y orientación de la investigación científica sobre la transferencia tecnológica universidad-industria en tecnologías de captura y utilización de CO₂? A partir de esta cuestión central, se formulan las siguientes preguntas específicas: i) ¿Cómo ha evolucionado la producción científica relacionada con la transferencia tecnológica universidad-

industria en tecnologías de captura y utilización de CO₂ durante el periodo 1996-2025?, ii) ¿Cuáles son los autores más influyentes en esta línea de investigación y qué nivel de colaboración académica presentan?, iii) ¿Cuáles son las revistas científicas más relevantes para la difusión de estudios sobre transferencia tecnológica y tecnologías CCU?, iv) ¿Qué instituciones académicas y centros de investigación lideran la producción científica en esta temática?, v) ¿Qué países concentran la mayor cantidad de publicaciones y cómo se configuran sus redes de cooperación internacional?, vi) ¿Cuál ha sido la evolución en el uso de palabras clave vinculadas a la transferencia universidad-industria y a las tecnologías de captura y utilización de CO₂?, vii) ¿Cuáles son las disciplinas científicas predominantes asociadas a esta temática en la literatura indexada?, viii) ¿Qué términos clave coocurren con mayor frecuencia en los estudios sobre este tema y qué clústeres temáticos se derivan de su análisis?, ix) ¿Cuáles son las perspectivas emergentes de investigación en el campo de la transferencia tecnológica universidad-industria aplicada a tecnologías de descarbonización como la CCU?

II. METODOLOGÍA

Para comprender el desarrollo científico asociado a la transferencia tecnológica universidad-industria en tecnologías de captura y utilización de CO₂ (CCU), se empleó la metodología de cartografía bibliométrica. Este enfoque, fundamentado en principios matemáticos y estadísticos, permite analizar de manera estructurada la producción académica, así como las redes de colaboración, coautoría y evolución temática en un campo específico del conocimiento [22]. Su aplicación proporciona una visión integral del estado del arte, facilitando la identificación de dinámicas emergentes, actores clave y vacíos investigativos en la interfaz ciencia-tecnología-industria.

La bibliometría sigue un proceso metódico que comprende la formulación de preguntas de investigación, la selección de bases de datos relevantes, la construcción de una ecuación canónica de búsqueda y el análisis de los metadatos obtenidos; este enfoque cuantitativo es particularmente útil para detectar tendencias, patrones de colaboración y evolución en la producción científica a lo largo del tiempo [23]; asimismo, se adoptó un diseño metodológico de tipo exploratorio, descriptivo y longitudinal no experimental, ya que permite observar la evolución del campo entre 1996 y 2025 sin intervención directa en las variables. Este diseño se ajusta al enfoque cuantitativo al facilitar la identificación de regularidades temporales, correlaciones institucionales y estructuras temáticas asociadas al fenómeno investigado.

A partir de la pregunta de investigación, se construyó una ecuación canónica de búsqueda orientada a identificar estudios que abordaran tanto la transferencia universidad-industria como las tecnologías CCU. La fórmula empleada fue: TITLE-ABS-KEY ("university-industry collaboration" OR "university-industry relations" OR "academic-industry collaboration" OR "industry-academia collaboration" OR

"university-industry innovation" OR "technology transfer" OR "knowledge transfer" OR "joint research" OR "technology co-development") AND TITLE-ABS-KEY ("carbon capture" OR "CO2 capture" OR "carbon utilization" OR "CO2 utilization" OR "carbon capture and utilization" OR "CCU").

Se aplicó la fórmula de búsqueda en la base de datos Scopus, seleccionada por su carácter multidisciplinario, cobertura internacional y rigurosidad en los procesos de indexación. El rango temporal considerado (1996–2025) permitió capturar la evolución reciente del tema en un periodo de creciente preocupación ambiental y aceleración de políticas de descarbonización, obteniéndose un total de 132 publicaciones relevantes.

Los registros fueron exportados en formato CSV para su análisis cuantitativo y posteriormente organizados en Excel, facilitando la codificación y limpieza de metadatos. Se extrajo información sobre autores, instituciones, países, revistas, palabras clave, citas y relaciones de coautoría, lo cual permitió explorar las estructuras de producción científica y cooperación internacional [24], [25]. Para representar visualmente estas relaciones, se generaron mapas científicos de coautoría, coocurrencia y co-citación, mediante herramientas bibliométricas de libre acceso como Bibliometrix y VOSviewer [26], [27].

Bibliometrix, desarrollado en lenguaje R, ofrece funciones estadísticas robustas para el análisis y visualización de datos bibliográficos, y requiere la instalación de R y RStudio, respaldados por la R Foundation for Statistical Computing [23], [28].

VOSviewer, desarrollado por la Universidad de Leiden, permite crear mapas de ciencia basados en co-citación, acoplamiento bibliográfico y coocurrencia, integrando minería de texto para detectar patrones temáticos emergentes en títulos y resúmenes [25], [29].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 1 se muestra que durante estos 29 años, se identificó un crecimiento sostenido de la producción científica, con una tasa de crecimiento anual promedio del 7.43 %, lo cual evidencia un interés creciente por parte de la comunidad investigadora en esta temática estratégica [17]. En total, se analizaron 132 publicaciones científicas distribuidas en 97 fuentes (revistas académicas y actas de congresos), con una media de 30.98 citas por documento, lo que refleja un impacto académico significativo del corpus analizado. Este nivel de citación, combinado con una edad promedio de publicación de 8.46 años, sugiere que la literatura en este campo no solo es reciente, sino también altamente referenciada, lo cual puede estar vinculado con la creciente atención que reciben las tecnologías de descarbonización en el contexto del cambio climático y la transición energética [1].

En términos de participación autoral, los documentos involucraron a 535 autores, lo que representa una media de 4.21 autores por documento, indicador que revela un alto

grado de colaboración científica. La coautoría internacional alcanza el 29.55 %, lo cual indica una importante pero aún limitada interacción entre instituciones de diferentes países, posiblemente condicionada por barreras geopolíticas, asimetrías en capacidades de I+D o escasez de plataformas internacionales de cooperación tecnológica en CCU [4]; no obstante, se destaca que 20 publicaciones fueron elaboradas por autores únicos, lo cual podría estar vinculado con revisiones teóricas o propuestas metodológicas individuales.

A su vez, se registraron 450 palabras clave definidas por los autores (DE) y un total de 5,003 referencias citadas, lo que indica una diversidad conceptual considerable y un nivel elevado de fundamentación teórica y técnica; este volumen de referencias permite, además, identificar las fuentes más influyentes, los marcos conceptuales predominantes y las líneas temáticas más consolidadas del campo [30].

El conjunto de indicadores presentados permite concluir que el estudio de la transferencia tecnológica universidad–industria en el ámbito de las tecnologías CCU constituye un campo de investigación dinámico, colaborativo y de creciente relevancia científica; donde, la alta tasa de crecimiento anual, junto con la notable media de citaciones por documento, reflejan tanto el interés reciente como la madurez intelectual alcanzada por algunos segmentos de la literatura; asimismo, la participación internacional, si bien significativa, aún representa una oportunidad de mejora, especialmente para fomentar redes de cooperación global más robustas, integrando a países emergentes y promoviendo la circulación del conocimiento hacia regiones con menor desarrollo tecnológico [6], [11], [31].

La diversidad de palabras clave y referencias sugiere un campo interdisciplinario en el que convergen conocimientos provenientes de la ingeniería química, la ciencia de materiales, la economía circular y la gestión de la innovación; este hallazgo respalda la pertinencia de aplicar enfoques de análisis bibliométrico para mapear las interacciones complejas entre producción científica, cooperación institucional y evolución tecnológica en sectores estratégicos como la mitigación de emisiones de CO₂ [32], [33], [34].



Fig. 1 Información principal.

La Fig. 2 muestra el registro de artículos distribuidos de manera heterogénea a lo largo de tres décadas, con una clara tendencia ascendente a partir de 2006. Entre 1996 y 2005, el volumen de publicaciones fue escaso o nulo, lo que sugiere un bajo nivel de consolidación temática en ese periodo. A partir de 2006, se evidencia un punto de inflexión con el surgimiento de publicaciones regulares. Este crecimiento es

particularmente notable en años como 2010 (10 artículos), 2016 (11) y 2024, que marca el pico máximo con 17 documentos publicados, representando el 12.88 % del total.

Este patrón de crecimiento es coherente con el auge global de tecnologías para la mitigación del cambio climático, el impulso de políticas de descarbonización industrial y la adopción de modelos de innovación abierta universidad–industria. El incremento sostenido en años recientes refleja un interés científico consolidado, posiblemente motivado por compromisos como el Acuerdo de París, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el aumento de fondos destinados a proyectos de captura y reutilización de CO₂ [4], [33]. La evolución del campo muestra una transición desde una fase incipiente hacia una etapa de mayor consolidación internacional, evidenciada por un repunte notable en 2023–2024, lo que sugiere una convergencia entre la agenda investigativa y los desafíos actuales de sostenibilidad y transición energética. La concentración reciente de publicaciones podría vincularse a la expansión de consorcios de I+D, programas de cooperación tecnológica y fondos climáticos orientados a soluciones basadas en carbono reutilizable [20], [35].

A diferencia de otros campos donde la pandemia de COVID-19 redujo la productividad científica, en este caso no se observa un impacto negativo durante 2020–2021. Por el contrario, la producción se mantuvo estable, posiblemente impulsada por el protagonismo que adquirieron la sostenibilidad, la economía verde y la innovación tecnológica durante la crisis sanitaria. El escenario postpandémico, además, fortaleció los llamados internacionales a acelerar la transición hacia economías resilientes y bajas en carbono [1], [7], [36].

En conjunto, los hallazgos indican que el campo se encuentra en plena expansión y con perspectivas favorables, aunque consolidar esta tendencia requerirá fortalecer las redes internacionales, la inversión en I+D y políticas que impulsen la vinculación universidad–industria en sectores estratégicos [12], [16], [37].

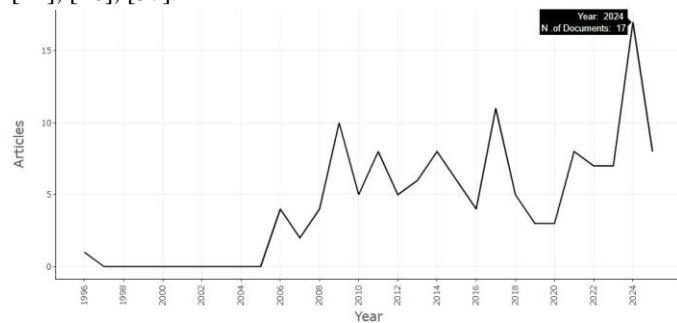


Fig. 2 Producción científica anual.

La Fig. 3 muestra los autores con mayor número de publicaciones; donde destacan claramente dos autores principales, Liu, X. y Yu, X., ambos afiliados a la Huazhong University of Science and Technology (Wuhan, China), con tres publicaciones cada uno; a continuación, aparecen ocho

investigadores, cada uno con dos publicaciones, provenientes de instituciones académicas y tecnológicas prestigiosas a nivel internacional: Breugelmans, T. (Universiteit Antwerpen, Bélgica), Bulut, M. (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, Bélgica), Chen, J. (East Carolina University, EE. UU.), Crookshank, S.L. (American Petroleum Institute, EE. UU.), De Mot, B. (Universiteit Antwerpen, Bélgica), Engeda, A. (College of Engineering, East Lansing, EE. UU.), Gutiérrez-Sánchez, O. (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek, Bélgica) y Liao, H. (Beijing Laboratory for System Engineering of Carbon Neutrality, China).

El panorama evidencia una dispersión temática y geográfica de la producción científica, sin un grupo autoral claramente dominante, lo que confirma el carácter emergente del campo y la etapa de consolidación en que aún se encuentra la investigación en tecnologías CCU y su transferencia tecnológica [6], [11]. La diversidad de afiliaciones, que incluye universidades y centros tecnológicos, revela una interacción creciente entre academia e industria. Destaca la participación de instituciones chinas como Huazhong University of Science and Technology y el Beijing Laboratory for System Engineering of Carbon Neutrality, en línea con el liderazgo global de China en tecnologías climáticas y su sostenida inversión estatal [7], [10], [38]. De igual modo, la presencia de autores belgas vinculados a la Universiteit Antwerpen y al Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek reafirma el rol de Bélgica como nodo europeo clave en investigación aplicada sobre sostenibilidad y economía circular [21], [39]. Por su parte, las instituciones estadounidenses como East Carolina University, American Petroleum Institute y College of Engineering (East Lansing) consolidan la trayectoria de EE. UU. como referente histórico en innovación ambiental, particularmente en sectores energéticos y petroquímicos [34], [40].

En conjunto, esta configuración institucional sugiere oportunidades estratégicas para expandir redes internacionales de colaboración, especialmente entre economías líderes (China, EE. UU., Bélgica) y países en desarrollo, promoviendo una transferencia de conocimiento más equitativa y acelerando la transición hacia sistemas productivos bajos en carbono [41], [42].

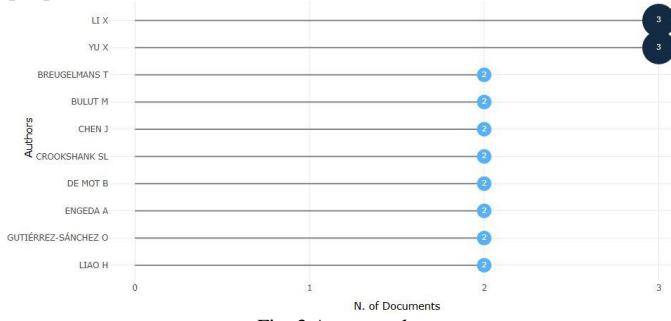


Fig. 3 Autores relevantes.

La Fig. 4 muestra las principales revistas científicas donde destaca como fuente más prolífica la revista Energy

Procedia (Reino Unido), con 12 documentos publicados, lo que representa el 9.09 % del total del corpus analizado. Le siguen la International Journal of Greenhouse Gas Control (Países Bajos) con 7 publicaciones, y Energy Policy (Reino Unido) con 6 publicaciones. Otras revistas destacadas incluyen Climate Policy, Journal of Cleaner Production (ambas del Reino Unido), con 3 artículos cada una.

En un segundo nivel se encuentran revistas y conferencias que han publicado dos documentos cada una, como el 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference (Abu Dabi), la 31st Annual International Pittsburgh Coal Conference (EE. UU.), la Carbon Management Technology Conference 2015 (Texas, EE. UU.), Chemical Engineering Transactions (Italia) y Energy and Fuels (EE. UU.).

El análisis de las fuentes de publicación permite identificar las principales plataformas académicas para la difusión de estudios en CCU con énfasis en transferencia tecnológica. Destacan revistas británicas y europeas como Energy Procedia, Energy Policy, Climate Policy y Journal of Cleaner Production, lo que sugiere un rol central del entorno académico europeo en la discusión científica sobre tecnologías de mitigación climática e innovación industrial. Este protagonismo se alinea con los compromisos ambientales de la región, su infraestructura universitaria y los programas de I+D en sostenibilidad [4], [16], [37]. Asimismo, la relevancia de la International Journal of Greenhouse Gas Control, editada en los Países Bajos y asociada al programa de la Agencia Internacional de Energía, evidencia la importancia de enfoques técnico-científicos especializados en captura y almacenamiento/utilización de carbono (CCUS) [20], [43]. Por otra parte, la presencia de conferencias como Pittsburgh o Texas refleja el papel de eventos industriales en EE. UU. como nodos de transferencia aplicada, donde convergen patentes, desarrollos tecnológicos y estrategias de escalamiento. La inclusión de revistas como Energy and Fuels y Chemical Engineering Transactions refuerza la interdisciplinariedad del campo, que integra ingeniería química, políticas energéticas y economía ambiental [21], [33].

Finalmente, la variedad geográfica de fuentes, Reino Unido, Países Bajos, EE. UU., Italia, Emiratos Árabes Unidos, confirma la dimensión global y estratégica de este campo, donde confluyen marcos regulatorios, intereses industriales y agendas climáticas diferenciadas [3], [10], [44].

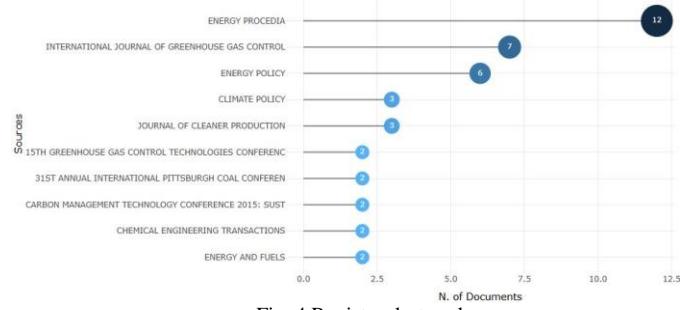


Fig. 4 Revistas destacadas.

La Fig. 5 muestra un caso particular con la categoría “Not reported”, que agrupa 16 documentos sin información

explícita de afiliación institucional, lo que representa una limitación frecuente en bases bibliográficas y que podría deberse a omisiones en el registro o a publicaciones colectivas sin atribución individual clara. Entre las instituciones claramente identificadas, lideran con 11 publicaciones cada una la National University of Singapore (Singapur) y la University of Edinburgh (Reino Unido); le sigue la Universidade de São Paulo (USP, Brasil) con 10 publicaciones, consolidándose como el centro de investigación más activo de América Latina en esta temática; además, otras instituciones destacadas incluyen el Institute of Process Engineering (China) con 8 publicaciones, y con 7 publicaciones cada una: la China University of Mining and Technology (China), el National Energy Technology Laboratory (EE. UU.), la University of Antwerp (Bélgica) y la University of Regina (Canadá). Cierra el grupo de las diez principales la Michigan State University (EE. UU.), con 6 documentos.

Los datos analizados confirman la naturaleza global e interdisciplinaria de la investigación en tecnologías CCU y su articulación con la transferencia tecnológica. Destaca el liderazgo de la National University of Singapore, en línea con las políticas de innovación y descarbonización de ese país, así como la presencia de la University of Edinburgh, que consolida el rol del Reino Unido en investigación climática y formulación de políticas ambientales [1], [20], [45]. Particularmente significativa es la participación de la Universidade de São Paulo, única institución latinoamericana en el top 10, lo que refleja el creciente protagonismo de Brasil frente al cambio climático, pese a limitaciones estructurales en inversión en I+D [21], [46]. China, con el Institute of Process Engineering y la China University of Mining and Technology, reafirma su posicionamiento como potencia científica emergente en tecnologías CCU [38]. En América del Norte, la presencia del National Energy Technology Laboratory, junto con las universidades de Michigan State y Regina, subraya el papel activo de Estados Unidos y Canadá en el desarrollo de tecnologías energéticas limpias, muchas veces enmarcadas en alianzas público-privada [34], [40].

Finalmente, la participación de la University of Antwerp confirma a Bélgica como un nodo clave en sostenibilidad e innovación colaborativa. Esta diversidad institucional evidencia una creciente internacionalización del campo, en consonancia con las agendas globales de mitigación climática y transición energética [39].

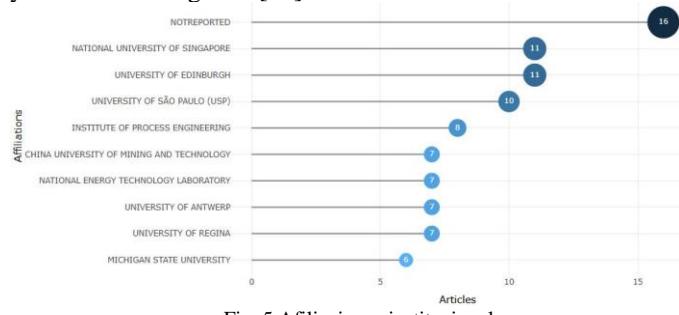


Fig. 5 Afiliaciones institucionales.

La Fig. 6 presenta los diez países con mayor número de publicaciones sobre transferencia tecnológica universidad–industria; encabeza el ranking Estados Unidos, con 35 documentos, lo que representa aproximadamente el 26.5 % del total del corpus analizado (n=132), le siguen China (17 documentos) y el Reino Unido (16 documentos), ambos con una participación destacada y cercana al 13 % cada uno; a continuación, se encuentran Alemania (10), Países Bajos (9), Italia (8), Japón (8), Corea del Sur (8), Australia (7) y Francia (7), países que mantienen una producción estable y continua en esta temática, con niveles de contribución que oscilan entre el 5 y el 8 %.

Los resultados muestran una clara concentración de la producción científica en países altamente industrializados, con capacidades consolidadas en I+D y políticas climáticas. El liderazgo de Estados Unidos se explica por su inversión sostenida en tecnologías de captura de carbono, apoyada por agencias federales como el DOE y el NETL, además de una sólida cultura de vinculación universidad–empresa que potencia la transferencia de conocimiento [40], [47], [48]. En segundo lugar, China ha emergido como potencia científica en tecnologías de transición energética, con una estrategia alineada a su meta de neutralidad de carbono hacia 2060. Su producción en CCU ha sido impulsada por universidades técnicas y centros de investigación especializados [34], [49]. El Reino Unido, con 16 documentos, mantiene una posición destacada gracias a sus políticas climáticas, impulso a la innovación y redes activas de colaboración, con instituciones como la University of Edinburgh como referentes [45].

En un segundo nivel, destacan países europeos (Alemania, Países Bajos, Italia, Francia) y asiáticos (Japón, Corea del Sur), junto con Australia, cuya participación responde a la necesidad de adaptar su matriz energética intensiva a regulaciones de carbono más exigentes [19], [20], [41].

Este patrón confirma que la investigación en CCU es una prioridad compartida, aunque aún concentrada en el hemisferio norte. La ausencia de países latinoamericanos y africanos en el top 10 evidencia una brecha de participación y acceso a plataformas de transferencia tecnológica [13], [50]. Se requiere promover mayor internacionalización y cooperación interregional que permita democratizar el conocimiento y facilitar la adopción de tecnologías CCU en contextos emergentes [19], [51].

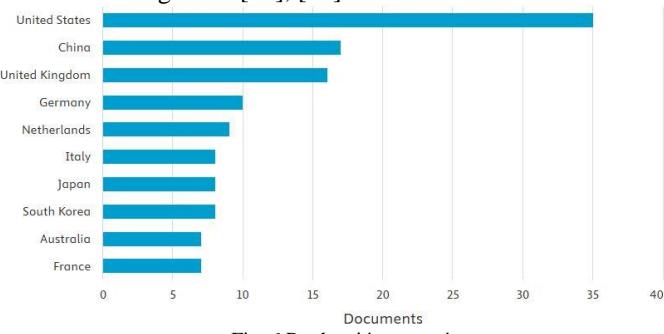


Fig. 6 Producción por países.

En la Fig. 7 se observa que el término más frecuentemente citado es “Technology Transfer” (85 ocurrencias en 2025), seguido de “Carbon Dioxide” (75) y “Carbon Capture” (50). Palabras como “Greenhouse Gases”, “Carbon Sequestration” y “Climate Change” mantienen un crecimiento sostenido, aunque a menor ritmo; otros términos, como “Sustainable Development”, “Emission Control” y “Digital Storage”, muestran un uso más moderado, mientras que “Fossil Fuels” refleja una presencia más estable en el tiempo.

La prominencia del término “Technology Transfer” refleja el creciente interés académico por la dimensión estratégica de la colaboración universidad–industria en el desarrollo y escalamiento de tecnologías ambientales. Este énfasis sugiere que la innovación tecnológica y la gestión del conocimiento son factores clave para viabilizar soluciones de mitigación climática como la CCU, especialmente en escenarios pospandémicos donde las políticas públicas favorecen tecnologías limpias y sostenibles [10], [31]. En segundo lugar, “Carbon Dioxide” reafirma el foco de la literatura en la reducción de gases de efecto invernadero, mientras que “Carbon Capture” destaca por su orientación técnico-procesual. En contraste, la baja aparición de “Digital Storage” indica que la integración entre tecnologías CCU y herramientas digitales sigue en fase incipiente [3], [17], [52]. El ascenso de “Sustainable Development” como término clave sugiere una visión más holística del campo, en la que la eficiencia técnica debe acompañarse de criterios de equidad, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental. Este enfoque converge con las agendas internacionales que promueven una economía baja en carbono con componentes de justicia climática y social [21], [35], [53].

Finalmente, la baja frecuencia de ciertos términos en la década de 2000 y su aceleración post-2010 puede atribuirse al incremento de inversiones en I+D climática, el Acuerdo de París y una creciente sensibilidad científica y pública ante la urgencia del cambio climático [17], [36].

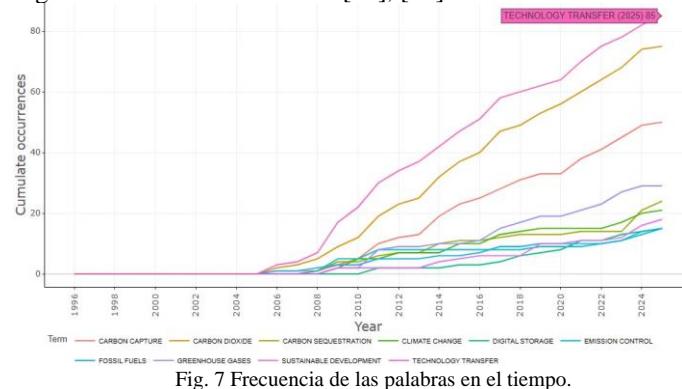


Fig. 7 Frecuencia de las palabras en el tiempo.

La Fig. 8 muestra que el campo más dominante es Energy con el 28.2 % del total (72 documentos), seguido de Engineering con 16.1 % (41 documentos) y Environmental Science con 15.3 % (39 documentos). Le siguen Earth and Planetary Sciences con 9.0 %, Chemical Engineering con 5.9 % y Business, Management and Accounting con 4.3 %. En

menor proporción se encuentran Social Sciences (3.5 %), Materials Science (3.1 %), Chemistry (2.7 %) y Computer Science (2.7 %).

La predominancia del área de Energy resulta coherente con la finalidad principal de las tecnologías CCU: mitigar emisiones de GEI en sectores intensivos en energía. Esta participación resalta la importancia estratégica de integrar estas soluciones en matrices energéticas más limpias y sostenibles [11], [36]. En segundo lugar, destacan Engineering y Chemical Engineering, campos que sostienen el desarrollo técnico-científico de procesos de captura, separación y conversión de CO₂, esenciales para su escalamiento a nivel piloto e industrial [12], [54]. La significativa presencia de Environmental Science revela un interés por evaluar los impactos ambientales de estas tecnologías, abarcando tanto sus beneficios como los riesgos potenciales de implementación [1], [37]. La contribución de Earth and Planetary Sciences responde al interés en soluciones geológicas de almacenamiento, como el secuestro mineral o la inyección en formaciones salinas, que requieren enfoques interdisciplinarios desde la geología y la geoquímicaa [47], [55]. Aunque limitada, la participación de Social Sciences y Business, Management and Accounting es creciente, lo cual evidencia una preocupación emergente por factores económicos, regulatorios y sociales que condicionan la adopción de tecnologías CCU. El rol de las políticas públicas, modelos de negocio colaborativos y marcos normativos gana espacio en la literatura reciente [56], [57]. Finalmente, áreas como Computer Science, Materials Science y Chemistry actúan como dominios complementarios, aportando al desarrollo de materiales adsorbentes, modelado computacional y simulación de procesos, con alto potencial para futuras investigaciones interdisciplinarias [58], [59].

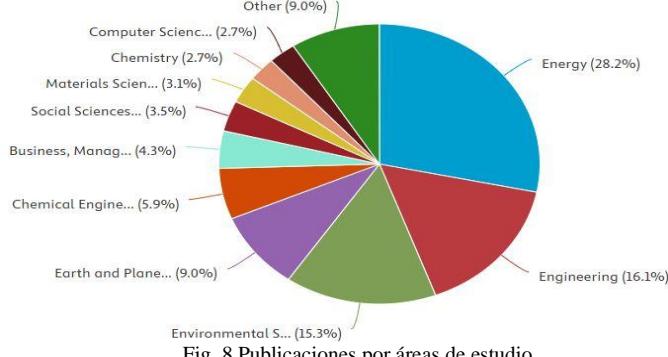


Fig. 8 Publicaciones por áreas de estudio.

En la Fig. 9 cada nodo representa una palabra clave, y su tamaño está relacionado con la frecuencia de aparición; las conexiones (aristas) indican coocurrencias entre términos en los mismos documentos, mientras que el color de cada nodo representa el año promedio de aparición, siguiendo un gradiente temporal de violeta (más antiguo) a amarillo (más reciente).

El término “carbon capture and storage” (CCS) aparece como nodo central en la red de coocurrencia, fuertemente

vinculado a carbon dioxide, technology transfer, monitoring, storage e intellectual property, lo que evidencia una alta integración entre aspectos técnicos y de gestión del conocimiento. La posición destacada de technology transfer refuerza su rol articulador en los estudios de innovación y aplicación de tecnologías CCUS [35], [60]. Se observa también que términos como capacity building, decision support systems, international cooperation y climate change mitigation tienden a aparecer en publicaciones recientes (tonos verdes/amarillos), lo que indica un desplazamiento hacia enfoques más holísticos e institucionales en la agenda científica. En contraste, términos asociados a procesos físico-químicos como gasification, ammonia o carbon storage se sitúan en zonas de menor densidad y antigüedad (2014–2017), lo que sugiere una evolución desde enfoques técnicos hacia visiones más transdisciplinarias [4], [7]. Destaca también la proximidad del nodo China al de CCUS, junto a términos como monitoring y storage, lo que podría reflejar un incremento reciente en la investigación aplicada liderada por ese país. A su vez, la conexión entre machine learning y carbon capture evidencia una emergente incorporación de inteligencia artificial en el diseño y optimización de procesos [38], [61].

En conjunto, este análisis revela que el campo ha pasado de una etapa dominada por tecnologías duras a una fase de maduración, donde la transferencia tecnológica, los marcos normativos y la cooperación internacional adquieren creciente protagonismo [50], [57], [62].

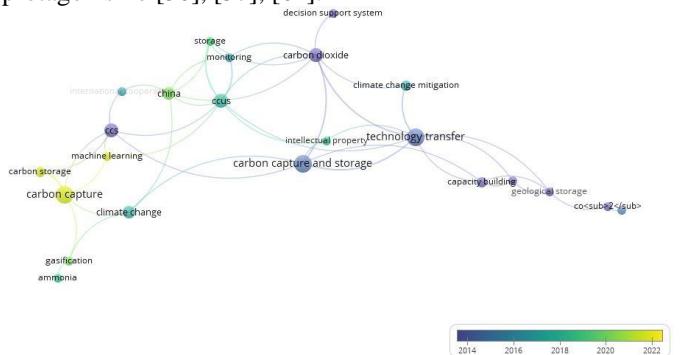


Fig. 9 Coocurrencia de palabras clave.

En la Fig. 10 el mapa se estructura en cuatro cuadrantes que reflejan la densidad interna del clúster (grado de desarrollo del tema) y su centralidad (relevancia dentro del campo global), permitiendo identificar temas motores, básicos, emergentes o especializados [63].

En el cuadrante superior derecho (temas motores), se posiciona el clúster conformado por los términos “carbon sequestration”, “climate change” y “sustainable development”. Este grupo destaca por su alta densidad y elevada centralidad, lo que sugiere que constituye un núcleo temático robusto, interdisciplinario y transversalmente conectado; la fuerte presencia de “sustainable development” evidencia la integración de metas ambientales con objetivos económicos y sociales, en línea con los ODS de Naciones Unidas; además, la

prominencia de “climate change” como eje discursivo reafirma que los estudios sobre CCU están fuertemente vinculados al cumplimiento de compromisos internacionales de mitigación [4], [6], [33]. En el cuadrante inferior derecho (temas básicos), se ubican los conceptos “technology transfer”, “carbon capture” y “carbon dioxide”, los cuales presentan una alta centralidad pero menor densidad; esto implica que, aunque son fundamentales para la estructuración del campo, todavía requieren mayor desarrollo interno o especialización; asimismo, su ubicación es coherente con la naturaleza transversal de estos conceptos, al ser ampliamente utilizados en distintos contextos y disciplinas, pero con espacios de maduración conceptual en torno a sus aplicaciones tecnológicas y modelos colaborativos universidad–industria [64], [65]. El cuadrante inferior izquierdo (temas emergentes o en declive) contiene el grupo “carbon”, “patents and inventions” y “industrial management”, términos que presentan baja centralidad y escasa densidad; este patrón puede indicar dos posibilidades: o bien se trata de líneas incipientes de investigación en proceso de consolidación, como lo sugiere el enfoque en patentes e innovación industrial, o bien corresponden a temáticas que han perdido protagonismo en el corpus reciente; en ese sentido, su reactivación dependerá de la conexión futura con clústeres más centrales del campo, especialmente en estudios de propiedad intelectual y modelos de gestión de la innovación [40], [53]. El cuadrante superior izquierdo (temas especializados o nicho) se agrupan términos como “bibliometrics analysis”, “clean energy technology” y “compressors”, los cuales muestran un desarrollo temático denso pero con baja centralidad; este patrón suele estar asociado a áreas altamente técnicas o metodológicas que, si bien presentan especialización, no se conectan directamente con el cuerpo principal de la investigación; por lo cual, la presencia de “bibliometrics analysis” en este cuadrante puede explicarse por su reciente incorporación como metodología analítica más que como eje sustantivo [31], [42].

Este mapa permite visualizar con claridad la madurez, evolución y relaciones temáticas del campo estudiado; en conjunto, los resultados indican que el tema de “transferencia tecnológica” en el contexto de “captura y utilización de CO₂” ha alcanzado un alto nivel de relevancia, pero aún requiere de mayores desarrollos analíticos y aplicaciones sectoriales específicas para consolidarse como línea de investigación autónoma y multidimensional [6], [7].

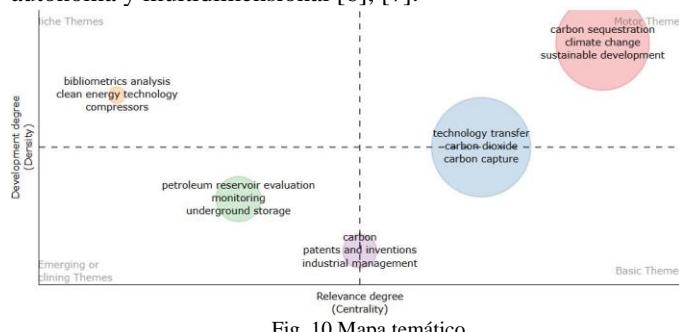


Fig. 10 Mapa temático.

IV. CONCLUSIONES

Este estudio bibliométrico ha trazado un panorama integral sobre la evolución, estructura y perspectivas de la investigación científica en torno a la transferencia tecnológica universidad–industria en tecnologías de captura y utilización de CO₂ (CCU). La literatura revisada entre 1996 y 2025 revela un crecimiento sostenido, una creciente internacionalización y una clara tendencia hacia la multidisciplinariedad, integrando aportes desde la ingeniería energética, las ciencias ambientales, la economía circular y la gestión de la innovación.

Desde una perspectiva temporal, se observa una expansión significativa a partir de 2010, con un pico de producción en 2024, en consonancia con los compromisos internacionales en descarbonización. Los autores más influyentes se concentran en Asia, Europa Occidental y Norteamérica, reflejando una polarización geográfica en torno a centros con alta capacidad científico-tecnológica.

Las fuentes de publicación más activas son revistas de alto impacto en energía, política ambiental e ingeniería, principalmente editadas en Europa y Estados Unidos. A nivel institucional, destacan universidades y centros de investigación de China, Reino Unido, Brasil, Bélgica, Canadá y EE. UU., configurando nodos estratégicos en redes globales de colaboración.

El análisis de palabras clave muestra una evolución desde enfoques técnico-procesuales hacia perspectivas integradoras que abordan gobernanza, sostenibilidad y cooperación institucional. Clústeres consolidados como carbon sequestration, climate change y sustainable development coexisten con áreas emergentes como machine learning y digital storage aplicadas a CCU.

En conjunto, se concluye que el campo ha alcanzado una madurez técnica considerable, aunque persisten desafíos vinculados a la gobernanza tecnológica, la implementación industrial y la equidad en la transferencia; a su vez, se recomienda fortalecer las redes de colaboración internacional, ampliar la participación de países del sur global y consolidar marcos institucionales que aceleren la adopción de tecnologías CCU, en sintonía con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la transición hacia economías bajas en carbono.

REFERENCES

- [1] Y. Effendi y B. P. Resosudarmo, «Socio-economic and environmental impacts of intended decarbonisation policies in the East Asia region», *Reg. Sci. Policy Pract.*, vol. 17, n.º 7, 2025, doi: 10.1016/j.rspp.2025.100191.
- [2] V. Shatokha, «Chasing shadows: Technology and socioeconomic barriers versus climate targets for iron and steel industry», *Arch. Mater. Sci. Eng.*, vol. 92, n.º 1, pp. 33-40, 2018, doi: 10.5604/01.3001.0012.5510.
- [3] C. Zou, Y. Huang, Z. Ye, y X. Qian, «Analysis of low-carbon technology transfer strategies based on a quadrilateral evolutionary game», *Energy Econ.*, vol. 138, 2024, doi: 10.1016/j.eneco.2024.107825.
- [4] N. Amin, A. Sharif, M. S. Shabbir, y Y. Pan, «Evaluating the impact of natural resource rents, R&D expenditures, green finance and energy efficiency on carbon emissions in BRICS economies: Greening the path to carbon neutrality in the post-COP 27 era», *Technol. Soc.*, vol. 81, 2025, doi: 10.1016/j.techsoc.2025.102826.

[5] R. Cathcart, H. Chalmers, C. Snape, E. Vandermeer, y J. Gibbins, «Developing national CCS capacity and advanced skills: Examples from the UK», en *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2013, pp. 7281-7290. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.666.

[6] G. Akay, «Green Ammonia, Nitric Acid, Advanced Fertilizer and Electricity Production with In Situ CO₂ Capture and Utilization by Integrated Intensified Nonthermal Plasma Catalytic Processes: A Technology Transfer Review for Distributed Biorefineries», *Catalysts*, vol. 15, n.º 2, 2025, doi: 10.3390/catal15020105.

[7] D. Bazzana, N. Comincioli, C. Guspert, D. Legrenzi, M. C. P. Rizzati, y S. Vergalli, «Gotta Catch 'Em All: CCUS With endogenous technical change», *Resour. Energy Econ.*, vol. 83, 2025, doi: 10.1016/j.reseneeco.2025.101499.

[8] L. O. B. Cardoso *et al.*, «Overview of CO₂ Bioconversion into Third-Generation (3G) Bioethanol—a Patent-Based Scenario», *Bioenergy Res.*, vol. 16, n.º 3, pp. 1229-1245, 2023, doi: 10.1007/s12155-022-10535-w.

[9] O. Gutiérrez-Sánchez *et al.*, «Electrochemical Conversion of CO₂from Direct Air Capture Solutions», *Energy Fuels*, vol. 36, n.º 21, pp. 13115-13123, 2022, doi: 10.1021/acs.energyfuels.2c02623.

[10] A. K. Patidar, R. K. Singh, y T. Choudhury, «The prominence of carbon capture, utilization and storage technique, a special consideration on India», *Gas. Sci. Eng.*, vol. 115, 2023, doi: 10.1016/j.jgsce.2023.204999.

[11] D. Yang, J. Gong, y B. Zhou, «Perspective of integrating green power with digital technology to drive the high-quality development of the automobile industry under the dual-carbon strategy», *Chin. Sc. Bull.*, vol. 70, n.º 18, pp. 2924-2932, 2025, doi: 10.1360/TB-2024-0745.

[12] M. Dombrowski, E. Kanz, y K. Wolgast, «ABC LCA-booklet: Life cycle assessment of structures using an example», *Bautechnik*, vol. 102, n.º 2, pp. 131-139, 2025, doi: 10.1002/bate.202400086.

[13] E. Burton, N. Mateer, J. Mota, y G. Ascanio, «CCUS capacity building and Technology adoption in Mexico», en *Adv. Mater. - TechConnect Briefs*, Romanowicz B., Case F., Laudon M., y Case F., Eds., TechConnect, 2017, pp. 285-288. [En línea]. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029421860&partnerID=40&md5=597da63c09294c6479e1a71eba793c09>

[14] V. Sahu, A. Mathur, T. S. Chundawat, J. A. J. Vargas, y D. E. G. Ruiz, «Advancements and challenges in carbon capture and storage technologies: Review for smart city infrastructure», en *Smart Cities and Sustainable Manufacturing: Innovations for a Greener Future*, Elsevier, 2024, pp. 295-306. doi: 10.1016/B978-0-443-26474-0.00009-9.

[15] X. Yu, D. Zhang, y D. He, «Reducing carbon emission - Foresight of CCS technology developing, IP management and global technology transfer», en *IAMOT - Int. Assoc. Manag. Technol. Conf. Proc.: Technol. - Futur. Think.*, Pretorius L., Thopil G.A., y Hosni Y., Eds., International Association for Management of Technology Conference (IAMOT) and the Graduate School of Technology Management, University of Pretoria, 2016, pp. 1297-1307. [En línea]. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84988422026&partnerID=40&md5=5fbb4539524a6ffe81b4bf77643e039>

[16] R. Mysyk *et al.*, «The Value Chain of Sustainable Dual Carbon Sodium Ion Capacitors», *Batteries and Supercaps*, 2025, doi: 10.1002/batt.202400807.

[17] A.-A. Bouramdane, «Crafting an optimal portfolio for sustainable hydrogen production choices in Morocco», *Fuel*, vol. 358, 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2023.130292.

[18] S. Bocchini *et al.*, «The virtuous CO₂ circle or the three cs: Capture, cache, and convert», *J. Nanomater.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/6594151.

[19] C. Schmidt-Hattenberger, «The CO₂ pilot site in Ketzin - Europe's first onshore CO₂ storage project», *Swiss Bull. for Appl. Geol.*, vol. 28, n.º 1-2, pp. 19-29, 2023.

[20] S. Cha, S. Park, J. Kim, y I. S. Park, «Feasibility Study of Conversion of Old Production Facility in Depleted Gas Field to CCS Facility Through International Joint Research with the Netherlands - Case Study», en *APOGCE - SPE Asia Pac. Oil Gas Conf. Exhib.*, Society of Petroleum Engineers, 2024. doi: 10.2118/221312-MS.

[21] J. Portugal-Pereira, A. C. Soterroni, A. Mazzzone, y J. S. T. Pedersen, «Considering the Cross-Boundary Environmental and Social Implications of the EU's Carbon Dioxide Removal Strategy in Brazil», en *Strengthening European Climate Policy: Governance Recommendations from Innovative Interdisciplinary Collaborations*, Springer Nature, 2024, pp. 9-20. doi: 10.1007/978-3-031-72055-0_2.

[22] M. Aria y C. Cuccurullo, «bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis», *J. Inf.*, vol. 11, n.º 4, pp. 959-975, 2017, doi: 10.1016/j.joi.2017.08.007.

[23] O. Bellido-Valdiviezo *et al.*, «Digital Citizenship: A bibliographic Review of the Publications in Scopus from 2017 to 2022», presentado en Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology, 2023.

[24] O. O. Osemwogie *et al.*, «PRELIMINARY BIBLIOMETRICS OF PLANT-DERIVED HEALTH FOODS OVER THE LAST DECADE IN THE SCOPUS DATABASE», *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, vol. 23, n.º 8, pp. 24363-24382, 2023, doi: 10.18697/ajfand.123.22765.

[25] M. M. Sulphey, N. S. AlKahtani, N. A. M. Senan, y A. H. E. Adow, «A bibliometric study on organization citizenship behavior for the environment», *Global Journal of Environmental Science and Management*, vol. 10, n.º 2, pp. 891-906, 2024, doi: 10.22035/gjesm.2024.02.29.

[26] B. K. Prahani, I. A. Rizki, N. Suprapto, I. Irwanto, y M. A. Kurtuluş, «Mapping research on scientific creativity: A bibliometric review of the literature in the last 20 years», *Thinking Skills and Creativity*, vol. 52, 2024, doi: 10.1016/j.tsc.2024.101495.

[27] S. Shaw, A. Chattopadhyay, y L. T. Bhutia, «Trends in environmental risk and child health research: A bibliometric study, 1990–2022», *Clinical Epidemiology and Global Health*, vol. 28, 2024, doi: 10.1016/j.cegh.2024.101651.

[28] M. Aria y C. Cuccurullo, *Bibliometrix: Comprehensive Science Mapping Analysis*. (24 de mayo de 2024). Accedido: 8 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/bibliometrix/index.html>

[29] N. J. Van Eck y L. Waltman, *VOSviewer - Visualizing scientific landscapes*. (2024). Centre for Science and Technology Studies (CWTS). Accedido: 8 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.vosviewer.com/>

[30] H. C. Lau, S. Ramakrishna, K. Zhang, y A. V. Radhamani, «The role of carbon capture and storage in the energy transition», *Energy Fuels*, vol. 35, n.º 9, pp. 7364-7386, 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.1c00032.

[31] J. S. Chiriví-Salomón, S. García-Huérano, y I. A. Giraldo, «Bioprospecting Microalgae: A Systematic Review of Current Trends», *Phycology*, vol. 4, n.º 3, pp. 508-532, 2024, doi: 10.3390/phycology4030028.

[32] T. Boonpanya y T. Masui, «Assessment of Thailand socio-economic impact towards greenhouse gas mitigation actions in 2030 using a computable general equilibrium model», *Chem. Eng. Trans.*, vol. 78, pp. 289-294, 2020, doi: 10.3303/CET2078049.

[33] G. Mangano y D. Laganà, «A New Workflow for Achieving Climate Neutrality in Circular Energy Clusters. Simulations of Regenerative Design Combining Nature Based Solutions and Solar Energy Technologies in Urban Environment», en *Lect. Notes Networks Syst.*, Calabro F., Morabito F.C., Madureira L., y Piñeira Mantiñán M.J., Eds., Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2024, pp. 49-63. doi: 10.1007/978-3-031-74723-6_5.

[34] Y.-M. Wei *et al.*, «A proposed global layout of carbon capture and storage in line with a 2 °C climate target», *Nat. Clim. Change*, vol. 11, n.º 2, pp. 112-118, 2021, doi: 10.1038/s41558-020-00960-0.

[35] C. Taylor y W. Hawkins, «Holistic regenerative design: the Common House by Common Practice», *Struct. Eng.*, vol. 102, n.º 9, pp. 22-28, 2024, doi: 10.56330/CJMX6520.

[36] J. Boualavong, C. A. Gorski, y Y. Liu, «Translatable reporting of energy demand and rates in electrochemical carbon capture», *iScience*, vol. 28, n.º 2, 2025, doi: 10.1016/j.isci.2025.111781.

[37] S. A. Jamatutu, K. Abbass, S. Gawusu, K. E. Yeboah, I. A.-M. Jamatutu, y H. Song, «Quantifying future carbon emissions uncertainties under stochastic modeling and Monte Carlo simulation: Insights for environmental policy consideration for the Belt and Road Initiative Region», *J. Environ. Manage.*, vol. 370, 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122463.

[38] Z. Zhang, Z. Mao, y J. Wang, «Harnessing the potential: exploring development opportunities and charting strategic pathways for China's enhanced engagement in international blue carbon cooperation», *Environ. Res. Lett.*, vol. 19, n.º 9, 2024, doi: 10.1088/1748-9326/ad5e9b.

[39] J. Isles, «Europe clean coal power priorities are on carbon capture and storage», *Gas Turbine World*, vol. 37, n.º 5, pp. 20-24, 2007.

[40] M. Rimmer, «Carbon capture and storage: Intellectual property, innovation policy, and climate change», en *Carbon Capture and Storage in International Energy Policy and Law*, Elsevier, 2021, pp. 181-203. doi: 10.1016/B978-0-323-85250-0.00012-8.

[41] A. Plaisant, A. Maiu, E. Maggio, y A. Pettinai, «Pilot-scale CO2 Sequestration Test Site in the Sulcis Basin (SW Sardinia): Preliminary Site Characterization and Research Program», en *Energy Procedia*, Dixon T., Lalou L., y Twinning S., Eds., Elsevier Ltd, 2017, pp. 4508-4517. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.1612.

[42] Y.-M. Wei, J.-W. Wang, T. Chen, B.-Y. Yu, y H. Liao, «Frontiers of low-carbon technologies: Results from bibliographic coupling with sliding window», *J. Clean. Prod.*, vol. 190, pp. 422-431, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.170.

[43] R. Berenblyum *et al.*, «Laying a foundation for CO2 business cases in South Eastern Europe», en *GHGT - Int. Conf. Greenh. Gas Control Technol.*, International Energy Agency Greenhouse Gas, IEAGHG, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85181582100&partnerID=40&md5=7037ada250eb5a31725b6385b8908946>

[44] S. Eggen, «Keynote speech - Can we get CCS back on track?», en *EAGE Geol. Storage Workshop: Demonstr. Storage Integrity Build. Confid. CCS*, European Association of Geoscientists and Engineers, EAGE, 2014, pp. 196-197. doi: 10.3997/2214-4609.20140108.

[45] F. Morton, J. Anthony, J. Carroll, M. Corser, T. Wu, y R. A. Yongue, «Status of Technology Development at the National Carbon Capture Center», en *GHGT - Int. Conf. Greenh. Gas Control Technol.*, International Energy Agency Greenhouse Gas, IEAGHG, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85181584225&partnerID=40&md5=244b1ac821d469311438dda1361d1c8f>

[46] R. M. A. Abraham y C. C. G. Tassinari, «Carbon dioxide storage efficiency involving the complex reservoir units associated with Irati and Rio Bonito Formations, Parana Basin, Brazil», *AAPG Bull.*, vol. 107, n.º 3, pp. 357-386, 2023, doi: 10.1306/EG08232121005.

[47] R. Balch, B. McPherson, M. Cather, y R. Esser, «The Carbon Utilization and Storage Partnership of the Western United States», en *Greenh. Gas Control Technol. Conf.*, GHGT, International Energy Agency Greenhouse Gas, IEAGHG, 2021. doi: 10.2139/ssrn.3821160.

[48] L. B. Hill, X. Li, y N. Wei, «CO2-EOR in China: A comparative review», *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 103, 2020, doi: 10.1016/j.ijgge.2020.103173.

[49] K. M. Ellett *et al.*, «Development of a science gateway software platform for CCS decision support and stakeholder engagement», en *Greenh. Gas Control Technol. Conf.*, GHGT, International Energy Agency Greenhouse Gas, IEAGHG, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85160921192&partnerID=40&md5=e2ca2b73474a6c66e5ab1cbff555fa04>

[50] C. Bataille, S. Stiebert, O. Hebeda, H. Trollip, B. McCall, y S. S. Vishwanathan, «Towards net-zero emissions concrete and steel in India, Brazil and South Africa», *Clim. Policy*, 2023, doi: 10.1080/14693062.2023.2187750.

[51] S.-H. Jung, S.-T. Yun, H. Y. Jo, M. Lee, S.-H. Lee, y E. Jeong, «Technological environment and commercialization of Carbon Mineralization Flagship in Korea: production and utilization of complex carbonates using coal ash», *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 24, n.º 6, pp. 1621-1637, 2022, doi: 10.1007/s10098-022-02294-1.

[52] D. Wojakowski, Ł. Klimkowski, y M. Stopa, «Communicating CC(U)S and UGS technologies: The case of deliberative group interviews in North-Western Poland», *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 134, 2024, doi: 10.1016/j.ijgge.2024.104111.

[53] W. Lipka y C. Szwed, «Multi-attribute rating method for selecting a clean coal energy generation technology», *Energies*, vol. 14, n.º 21, 2021, doi: 10.3390/en14217228.

[54] O. Gutiérrez-Sánchez, B. De Mot, M. Bulut, D. Pant, y T. Breugelmans, «Engineering Aspects for the Design of a Bicarbonate Zero-Gap Flow Electrolyzer for the Conversion of CO2 to Formate», *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 14, n.º 27, pp. 30760-30771, 2022, doi: 10.1021/acsami.2c05457.

[55] P. L. Younger, «Hydrogeological challenges in a low-carbon economy», *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, vol. 47, n.º 1, pp. 7-28, 2014, doi: 10.1144/qjegh2013-063.

[56] N. Gupta *et al.*, «Monitoring and modeling CO2 behavior in multiple oil bearing carbonate reefs for a large scale demonstration in northern Lower Michigan», en *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2013, pp. 6800-6807. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.613.

[57] K. Martinez, A. Blanco, A. Tamondong, C. Candido, y K. Nadaoka, «Advancing Blue Carbon Knowledge: Leveraging Geomatics for Capacity Building through the BlueCARES Project», en *Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, Perez G.J., Comiso J., Tamondong A.M., Bolkas D., Detchev I., Parisi E.I., O'Banion M., D'Urso M.G., Guo X., Angelats E., Gibin M., Dabove P., Rawal D., Gonzalez R., Belcore E., Aggarwal S.P., Lagutov V., Kundu S.S., Wicaksono P., Van Manh N., Vach K., Seredovich V.A., Shultz R., Svaty Z., Vyas A., Mohamed-Ghouse Z.S., Amaduzzi S., Shekhar S., Ramos R., y Blanco A.C., Eds., International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2024, pp. 55-60. doi: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-5-2024-55-2024.

[58] P. Lott y O. Deutschmann, «Heterogeneous chemical reactions—A cornerstone in emission reduction of local pollutants and greenhouse gases», *Proc. Combust. Inst.*, vol. 39, n.º 3, pp. 3183-3215, 2023, doi: 10.1016/j.proci.2022.06.001.

[59] A. Maia da Costa *et al.*, «Experimental salt cavern in offshore ultra-deep water and well design evaluation for CO2 abatement», *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 29, n.º 5, pp. 641-656, 2019, doi: 10.1016/j.ijmst.2019.05.002.

[60] J. Lee, C. Jang, K. N. Shin, y J. W. Ahn, «Strategy of developing innovative technology for sustainable cities: The case of the national strategic project on carbon mineralization in the Republic of Korea», *Sustainability*, vol. 11, n.º 13, 2019, doi: 10.3390/su11133613.

[61] J. Zhang, Q. Zhang, N. Zhou, M. Li, P. Huang, y B. Li, «Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology», *Meitan Xuebao*, vol. 47, n.º 12, pp. 4167-4181, 2022, doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.1053.

[62] H. de Coninck, J. C. Stephens, y B. Metz, «Global learning on carbon capture and storage: A call for strong international cooperation on CCS demonstration», *Energy Policy*, vol. 37, n.º 6, pp. 2161-2165, 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2009.01.020.

[63] Q. Liang *et al.*, «A bibliometric analysis of research trends and hotspots of pilocytic astrocytoma from 2004 to 2023», *Neurosurg. Rev.*, vol. 48, n.º 1, 2025, doi: 10.1007/s10143-024-03139-9.

[64] C. Caccamo, C. Calefato, y X. Claro, «Turning knowledge in gold nuggets: The alchemy of applying UX to Open Science digital tools.», en *ACM Int. Conf. Proc. Ser.*, Association for Computing Machinery, 2024. doi: 10.1145/3656650.3656726.

[65] S. Peña Murillo, C. Forero, F. Velasco-Sarria, y E. Arango, «Evaluation of the Mineral Manganese OXMN009 and OXMN009P in the Chemical Looping Combustion (CLC) Process Using Thermogravimetry», *Appl. Sci.*, vol. 14, n.º 15, 2024, doi: 10.3390/app14156823.