

PANORAMA DE LOS USOS
ALTERNATIVOS DEL *carbón*
EN COLOMBIA EN UN CONTEXTO
DE **DESCARBONIZACIÓN**

22/12/2025. Versión 1
Cadenas productivas

Lina Beatriz Franco Idárraga
Presidenta

Editores:

Carlos Augusto Ortega Galvis
Vicepresidente de Promoción y Fomento

Esteban Felipe Castillo Jiménez
Gerente de Promoción

Autores, Grupo de Promoción:

Andrés Betancur Rodríguez
Carlos Javier Leguizamo Jurado
Carlos Javier Tovar Prieto
Clara Liliana Guatame Aponte
Daniel Felipe Morales Rivera
Isabel Cristina Peña Martelo
Karol Lizeth Roa Bohórquez
Nelson Orlando Flórez Aza

Diseño:
Sofía Rodríguez

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. CONTEXTO MUNDIAL DEL CARBÓN	18
1.1. Oferta de carbón a nivel mundial	18
1.2. Demanda de carbón a nivel mundial.....	21
1.2.1. Demanda global y perspectivas del carbón para uso térmico	22
1.2.2. Demanda global y perspectivas del carbón metalúrgico y coque	27
1.3. Comportamiento de los precios	30
1.4. Perspectivas globales del carbón.....	31
1.5. Usos no convencionales del carbón.	32
1.5.1. Usos no energéticos de los combustibles fósiles.....	35
1.5.2. Principales usos no convencionales.....	38
2 EL CARBÓN EN COLOMBIA	42
2.1. Geología de los yacimientos carboníferos.....	43
2.2. Potencial carbonífero: recursos y reservas.....	47
2.3. Mercado del carbón	49
2.3.1. Oferta nacional de carbón	49
2.3.2. Exportación de carbón	50
2.3.3. Demanda nacional de carbón.	54
2.3.4. Comportamiento de los precios	56
2.4. Investigaciones e iniciativas relacionadas con usos no convencionales del carbón.....	57
3. USOS NO CONVENCIONALES DEL CARBÓN	59
3.1. Metodología para priorizar los usos no convencionales del carbón en Colombia	59
3.1.1. Nivel de Madurez de una Tecnología.....	61
3.1.2. Impacto ambiental.....	62
3.1.3. Comercio exterior colombiano del producto.....	63
3.1.4. Aplicación de la metodología de priorización de usos no convencionales del carbón en Colombia	63
3.2. Uso no convencional del carbón: sustancias húmicas.....	64
3.2.1. Información comercio exterior Colombia	65
3.2.2. Materia prima	67

3.2.3. Análisis de la cadena de valor	68
3.2.4. Tecnologías	69
3.2.5. Marco regulatorio	72
3.2.6. Mapeo de actores	75
3.3. Uso no convencional del carbón: carbón activado	76
3.3.1. Información comercio exterior Colombia	79
3.3.2. Materia prima	81
3.3.3. Análisis de la cadena de valor	82
3.3.4. Tecnologías	84
3.3.5. Marco regulatorio	86
3.3.8. Mapeo de actores	88
3.4. Uso no convencional del carbón: hidrógeno	89
3.4.1. Información comercio exterior de Colombia	91
3.4.2. Materia prima	93
3.4.3. Análisis de la cadena de valor	94
3.4.4. Usos y aplicaciones del hidrógeno:	97
3.4.5. Producción de hidrógeno en Colombia.	97
3.4.6. Tecnologías	101
3.4.7. Marco regulatorio	105
3.4.8. Mapeo de actores	109
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	112
• Recomendaciones	114
BIBLIOGRAFÍA	115
ANEXOS	138
Anexo 1. Criterios de selección de producción de los grupos de investigación MinCTI.....	138
Anexo 2. Producción científica a partir de la seleccionada conforme al anexo 1.	139
Anexo 3. Niveles de Madurez Tecnológico.....	149
Anexo 4. Metodología de priorización para seleccionar los productos asociados a los usos no convencionales del carbón.....	151
Anexo 5. Información de soporte para la calificación de los criterios de priorización de los usos no convencionales del carbón.....	153

Anexo 6. Relación de procesos y actores asociados a la cadena productiva de producción de hidrógeno a partir del carbón.....	164
---	------------

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Explotación mundial de carbón (Mt). 1981-2024.....	18
Gráfico 2. Principales países explotadores de carbón (Mt)- 2024.	19
Gráfico 3. Análisis de puntos de cambio de la explotación de carbón (Mt) en la región Asia - pacífico, Europa y América del Norte. (1981 y 2024).....	20
Gráfico 4. Análisis de puntos de cambio de la explotación de carbón (Mt) en la región de África, Oriente Medio, Sur y Centro América (1981 y 2024).	20
Gráfico 5. Consumo global de carbón (Mt), 2000 – 2027.	21
Gráfico 6. Cambios en el consumo global de carbón (MT), 2023–2027.	22
Gráfico 7. Mapa de calor Consumo de carbón y lignito de uso térmico (Mt).	23
Gráfico 8. Mapa de calor explotación de carbón y lignito de uso térmico (Mt).	24
Gráfico 9. Mapa de calor importación de carbón y lignito de uso térmico (Mt).	24
Gráfico 10. Mapa de calor exportación de carbón y lignito de uso térmico (Mt).	25
Gráfico 11. Componentes de la demanda de carbón térmico por región (2027).	26
Gráfico 12. Mercado potencial de carbón térmico.....	26
Gráfico 13. Consumo de carbón térmico y lignito para fines no energéticos.	27
Gráfico 14. Mapa de calor consumo de carbón metalúrgico (Mt).	28
Gráfico 15. Mapa de calor explotación de carbón metalúrgico (Mt).	28
Gráfico 16. Mapa de calor importación de carbón metalúrgico (Mt).	29
Gráfico 17. Mapa de calor exportación de carbón metalúrgico (Mt).....	29
Gráfico 18. Mercado potencial de carbón metalúrgico.	30
Gráfico 19. Uso no energético de combustibles fósiles en el mundo.....	36
Gráfico 20. Usos del carbón 2023.	37
Gráfico 21. Perspectiva científica sobre la utilización del carbón.....	38
Gráfico 22. Zonas carboníferas de Colombia.	43
Gráfico 23. Clasificación por rango de los carbones en las doce zonas carboníferas de Colombia45	45
Gráfico 24. Recursos y reservas de carbón en Colombia.	48
Gráfico 25. Departamentos con explotación de carbón en Colombia.....	49
Gráfico 26. Exportaciones de carbón térmico (Mt) en Colombia.2020- 2024.....	52
Gráfico 27. Exportaciones de carbón de uso metalúrgico (Mt) desde Colombia.2020- 2024.....	53
Gráfico 28. Exportaciones de coque (Mt) desde Colombia. 2020- 2024.	54
Gráfico 29. Consumo de carbón de uso metalúrgico (Mt) en Colombia. 2015- 2022. p: provisional.	55
Gráfico 30. Consumo de carbón de uso térmico (Mt) en Colombia. 2015- 2022. p: provisional.	55
Gráfico 31. Precio promedio anual del carbón y coque colombiano (USD FOB/Tonelada).	56
Gráfico 32. Proyección de precios FOB del carbón térmico colombiano (USD FOB / Tonelada).	56
Gráfico 33. Tipologías de producción de investigación.	57
Gráfico 34. Carbón a productos considerando la tecnología-Mercado en Estados Unidos.	60
Gráfico 35. Nivel de madurez tecnológica.....	61
Gráfico 36. Relación entre los TRL y las etapas del I + d + i.....	62

Gráfico 37. Comercio exterior colombiano de la subpartida arancelaria que incluye las sustancias húmicas, 2020 – 2024.	65
Gráfico 38. Destino de las exportaciones de la subpartida arancelaria que incluye las sustancias húmicas, 2024.	66
Gráfico 39. Origen de las importaciones de la subpartida arancelaria que incluye las sustancias húmicas, 2024.	66
Gráfico 40. Esquema del proceso de extracción alcalina de ácido húmico a partir de lignito.	70
Gráfico 41. Diagrama del proceso hidrotermal para la obtención de ácido húmico a partir de lignito.	71
Gráfico 42. Proceso de extracción y fraccionamiento de sustancias húmicas a partir de turba o lignito.	72
Gráfico 43. Diagrama de actores en la producción de sustancias húmicas.	76
Gráfico 44. Contribución estimada de materias primas para la producción de carbón activado (2012-2025).	78
Gráfico 45. Comercio exterior colombiano de carbón activado, 2020 – 2024.	79
Gráfico 46. Destino de las exportaciones de carbón activado, 2024.	79
Gráfico 47. Origen de las importaciones de carbón activado, 2024.	80
Gráfico 48. Producción de carbón activado por activación física- térmica.	83
Gráfico 49. Producción de carbón activado por activación Química.	83
Gráfico 50. Esquema de horno rotatorio para el proceso de carbonización y activación de carbón activado a partir del carbón.	84
Gráfico 51. Esquema de funcionamiento de quemador ciclónico.	85
Gráfico 52. Quemador ciclónico y a la derecha un horno rotatorio industrial para producción de carbón activado.	85
Gráfico 53. Morfología microscópica SEM. a) Carbón crudo; b) Pretratamiento ácido; c) Carbonización; d) Carbón activado.	86
Gráfico 54. Diagrama Mapeo de actores cadena productiva del carbón activado.	89
Gráfico 55. Huella de carbono de producción de hidrógeno a partir de carbón.	90
Gráfico 56. Comercio exterior colombiano de hidrógeno, 2020- 2024.	91
Gráfico 57. Destino de las exportaciones de Hidrógeno, 2024.	92
Gráfico 58. Origen de las importaciones de Hidrógeno, 2024.	92
Gráfico 59. Eficiencia del proceso de gasificación.	94
Gráfico 60. Proceso de producción de hidrógeno con captura y almacenamiento de CO ₂	96
Gráfico 61. Distribución de producción de hidrógeno en Colombia por tecnología.	98
Gráfico 62. Potencial de producción de hidrógeno en Colombia a partir de carbón térmico en el año 2024.	98
Gráfico 63. Potencial de producción de hidrógeno en Colombia a partir de carbón térmico en el año 2024.	99
Gráfico 64. Diagrama Sankey (Norte de Santander).	100
Gráfico 65. Producción de hidrógeno por municipio en Norte de Santander.	100
Gráfico 66. Esquema de las principales tecnologías de gasificadores.	101
Gráfico 67. Gasificador Lurgi Dry-ash/ Gasificador de escoria de British Gas/Lurgi (BGL).	102

Gráfico 68. Procesos y actores de la cadena de producción de hidrógeno partir del carbón.	110
Gráfico 69. Materias primas más estudiadas para la producción de carbón activado.	142

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Programas e iniciativas para promover usos no convencionales del carbón.	32
Tabla 2. Usos convencionales y no convencionales del carbón.	39
Tabla 3. Sistemas deposicionales sedimentarios de las zonas carboníferas de Colombia.	46
Tabla 4. Potencial de carbón por zona carbonífera en Colombia.	48
Tabla 5. Exportaciones de carbón y coque colombiano, 2024.	51
Tabla 6. Matriz de priorización.	64
Tabla 7. Precio promedio de exportación e importación de los productos asociados a la subpartida arancelaria que incluye las sustancias húmicas en USD FOB por tonelada, 2020 – 2024.	67
Tabla 8. Usos y tipos de carbón activado.	76
Tabla 9. Producción global de carbón activado a partir de carbón y otros materiales.	77
Tabla 10. Precio promedio exportaciones e importaciones de carbón activado, 2020 – 2024.	80
Tabla 11. Huella de carbono a partir de la producción de hidrógeno con y sin captura de CO2 China. ..	90
Tabla 12. Precio promedio exportaciones e importaciones de hidrógeno, 2020 – 2024.	93
Tabla 13. Análisis comparativo de las diferentes tecnologías de gasificación de carbón.	103
Tabla 14. Tecnología de gasificación recomendada basado en las propiedades del carbón.	104
Tabla 15. Propiedades del Slurry o lodo de carbón para tecnología de flujo arrastrado.	104
Tabla 16 - Marco normativo vinculado al hidrógeno.	106
Tabla 17. Actores en la cadena productiva de hidrógeno.	111
Tabla 18. Producción científica asociada a gas de síntesis.	139
Tabla 19. relación de estudios en los que se utilizó carbón como materia para producir gas de síntesis.	139
Tabla 20. Producción científica asociada a gasificación.	140
Tabla 21. Relación Producción científica asociada a gasificación.	140
Tabla 22. Producción científica asociada a gas.	141
Tabla 23. Producción científica asociada a licuefacción.	141
Tabla 24. Relación Producción científica asociada a licuefacción.	141
Tabla 25. Producción científica asociada a amoníaco.	141
Tabla 26. Materias primas utilizadas en los estudios de producción de carbón activado.	142
Tabla 27. Relación de estudios en los que se utilizó carbón como materia para producir carbón activado.	142
Tabla 28. Producción científica asociada a usos y estudios del carbón activado.	143
Tabla 29. Producción científica asociada a sustancias húmicas.	143
Tabla 30. relación de estudios asociados a la producción de sustancias húmicas a partir de carbón.	144
Tabla 31. Producción científica asociada a nanomateriales.	144
Tabla 32. Producción científica asociada a estudios y aplicaciones de nanomateriales.	145
Tabla 33. Uso de los subproductos de la coquización.	145
Tabla 34. Empresas con usos no convencionales del carbón con operaciones consolidadas.	146
Tabla 35. Iniciativas de usos no convencionales del carbón en fase piloto.	148
Tabla 36. TRL con su correspondiente descripción.	149

Tabla 37. Estructura de los criterios para la priorización de los productos asociados a usos no convencionales del carbón	151
Tabla 38. Rangos de CO ₂ e para la asignación de valores al criterio de impacto ambiental	152
Tabla 39. Soporte calificación de TRL para la producción de hidrógeno a partir de carbón - mundial ..	153
Tabla 40. Soporte calificación de TRL para la producción de hidrógeno a partir de carbón - Colombia.	153
Tabla 41. Soporte calificación de TRL para la producción de carbón activado a partir de carbón - Mundial.	154
Tabla 42. Soporte calificación de TRL para la producción de carbón activado a partir de carbón - Colombia.....	155
Tabla 43. Soporte calificación de TRL para la producción de tierras raras a partir de carbón - Mundial.	156
Tabla 44. Soporte calificación de TRL para la producción de tierras raras a partir de carbón - Colombia.	156
Tabla 45. Soporte calificación de TRL para la producción de fibras de carbono a partir de carbón - Mundial.	157
Tabla 46. Soporte calificación de TRL para la producción de fibras de carbono a partir de carbón - Colombia.....	158
Tabla 47. Soporte calificación de TRL para la producción de sustancias húmicas a partir de carbón - Mundial.	158
Tabla 48. Soporte calificación de TRL para la producción de sustancias húmicas a partir de carbón - Colombia.....	159
Tabla 49. Soporte calificación de TRL para la producción de grafeno a partir de carbón - Mundial.	159
Tabla 50. Soporte calificación de TRL para la producción de grafeno a partir de carbón - Colombia. ..	160
Tabla 51. Balanza comercial de los productos asociados a usos no convencionales del carbón objeto de priorización.	161
Tabla 52. Emisiones de CO ₂ e para los productos objeto de priorización - de la cuna a la puerta.	162
Tabla 53. eslabones y actores de la cadena productiva de producción de hidrógeno.	164

ACRÓNIMOS Y ABREVIACIONES

AEM: Áreas de Reserva Estratégica Minera

AF: ácido fúlvico

AH: ácido húmico

ANLA: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales

ANM: Agencia Nacional de Minería

ASEAN: sigla en inglés de *Association of Southeast Asian Nations* – Asociación de Naciones del Sudeste Asiático

ASTM: sigla en inglés de *American Society for Testing and Materials* – Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales

AWWA: sigla del inglés de *American Water Works Association*

BF: sigla en inglés de *Blast Furnace* – Alto Horno

BOF: sigla en inglés de *Basic Oxygen Furnance* – Horno de Oxígeno Básico

BF-BOF: tecnología que integra Alto Horno (*Blast Furnace, BF*) y Horno de Oxígeno Básico (*Basic Oxygen Furnace, BOF*), combinando ambos procesos para la producción de acero.

BGL: sigla en inglés de *British Gas/Lurgi*

CAG: carbón activado granular

CAP: carbón activado en polvo

CAR: Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible

COG: sigla en inglés de *Coke Oven Gas* - Gas de horno de coquización

CTA: sigla en inglés de *Coal-to- aromatics* – Carbón a aromáticos

CTG: sigla en inglés de *Coal-to-gas* – Carbón a gas

CTO: sigla en inglés de *Coal-to-olefins* – Carbón a olefinas

CTL: sigla en inglés de *Coal-to-liquids* – Carbón a líquidos

CtEG: sigla en inglés de *Coal-to-ethylene glycol* – Carbón a etilenglicol

CCRR¹: Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR)

CCS: sigla en inglés de *Carbon Capture and Storage* – Captura de Carbono y Almacenamiento

CCUS: sigla en inglés de *Carbon Capture Utilization and Storage* – Captura de Carbono Uso y Almacenamiento

DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística

DIAN: Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales

DNP: Departamento Nacional de Planeación

DR: sigla en inglés de *Direct Reduction* – Reducción Directa

DRI: sigla en inglés de *Direct Reduction Iron* – Hierro de Reducción Directa

EAAU: extracción alcalina asistida por ultrasonido

EAF: sigla en inglés de *Electric Arc Furnace* – Horno de Arco Eléctrico

ECRR: Estándar Colombiano para el Reporte de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales

ECP: Carbón activado extruido (peletizado)

FCA: fibra de carbón activado

FCCT: sigla en inglés de *Fine Coal Chemical Technology* – Tecnología Química Fina del Carbón

GEM: sigla en inglés de *Global Energy Monitor* – Monitor de Energía Global

GEI: Gases de Efecto Invernadero

¹Adoptado oficialmente mediante la Resolución 299 de 2018 de la ANM, para alinear las prácticas mineras colombianas con los estándares internacionales del CRIRSCO https://www.anm.gov.co/sites/default/files/resolucion_299_de_junio_13_de_2018.pdf. Actualizado en su última versión 2025 <https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/wp-content/uploads/2025/01/ECRR-Espanol-2025.pdf>

IEA: sigla del inglés de *International Energy Agency* – Agencia Internacional de Energía

IES: Instituciones de Educación Superior

IHSS: sigla del inglés de *International Humic Substances Society*

IPCC: sigla en inglés de *Intergovernmental Panel on Climate Change* – Panel Intergubernamental del Cambio Climático

ISO: sigla en inglés de *International Organization for Standardization*

MCC: sigla en inglés de *Molecular Coal Chemistry* – Química molecular del carbón

MADS: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

NASA: siglas en inglés de *National Aeronautics and Space Administration*

NDC: sigla en inglés de *Nationally Determined Contributions*

NTC: Norma Técnica Colombiana

PND: Plan Nacional de Desarrollo

PSA: sigla en inglés de *Pressure Swing Adsorption* - Adsorción por Variación de Presión

ROM: sigla en inglés de *Run Of Mine*, se refiere al material extraído directamente de la mina

SEM: sigla en inglés de *Scanning Electron Microscope*

SCWG: sigla en inglés de *Supercritical Water Gasification*

SGC: Servicio Geológico Colombiano

Syngas: sigla en inglés de *synthesis gas*

STEPS: sigla en inglés de *Stated Policies Scenario* – Escenario de Políticas Declaradas

TEJ: Transición Energética Justa

USDA: sigla en inglés de *The United States Department of Agriculture*

WGS: sigla en inglés de *Water-Gas Shift* - Desplazamiento de Gas de Agua

UNIDADES

BTU: sigla en inglés de *British Thermal Unit*, Unidad Térmica Británica

BTU/lb: sigla en inglés de *British Thermal Unit / libra*, Unidad Térmica Británica por libra

cal/g: calorías/gramo

kW: Kilovatio, unidad de potencia

kWh: Kilovatio-hora

MJ: Megajulio, unidad de energía en el Sistema Internacional (SI)

MJ/kg: Megajulio por kilogramo

MW: Megavatio, unidad de energía

MWh: Megavatio-hora, unidad de energía

t: Tonelada métrica, unidad de masa en el Sistema Internacional (SI)

MPa: Megapascal

Mt: Millones de toneladas, unidad de masa en el Sistema Internacional (SI)

Mtce: Millones de toneladas equivalentes de carbón

°C: Grados Celcius

TW: Teravatios

TWh: Teravatios-hora

INTRODUCCIÓN

El carbón ha sido un pilar fundamental en la estructura energética y económica de Colombia desde finales del siglo XIX, consolidándose como recurso clave para la generación de energía y como materia prima en la industria siderúrgica. A nivel mundial, sigue siendo una de las fuentes energéticas más abundantes y económicas, clave en la generación eléctrica y la industria siderúrgica.

Entre 2020 y 2024, la explotación global de carbón creció impulsada por China, India y los países de la Asociación de Naciones de Asia Sudoriental – ASEAN (países del sudeste asiático- Brunéi, Camboya, Filipinas, Indonesia, Laos, Malasia, Birmania, Singapur, Tailandia, Vietnam y Timor oriental), quienes consumen las tres cuartas partes de la demanda total del energético, siendo China consumidor de una tercera parte de todo el carbón que se quema en centrales eléctricas (IEA, 2024). Por su parte, en la Unión Europea y los Estados Unidos en los mismos años, se registró una disminución del 12 % y 5 % respectivamente, reflejando avance en su transición hacia fuentes renovables y alcanzando su nivel más bajo de consumo en 2024. En economías emergentes, el carbón sigue siendo esencial por su bajo costo y disponibilidad local, reduciendo la dependencia energética externa y favoreciendo la industrialización y el crecimiento económico.

Según el reporte *Coal 2024* de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), el consumo global de carbón registró un nuevo máximo histórico de 8.771 Mt en 2024, con un incremento del 1 % respecto al año anterior, impulsado principalmente por la demanda del sector eléctrico, que representó el 67 % de la demanda total con una generación de 10.700 Teravatios - hora (TWh), considerando que en 2023 la demanda mundial del recurso también aumentó, registrando lo que fue la cifra récord de 8.687 millones de toneladas (Mt), lo que representó un incremento interanual del 2,5 %, impulsado principalmente por países altamente dependientes del energético como China e India (IEA, 2024). En 2024 China presentó un consumo cercano a las 4.900 Mt (56 % del total global), siendo el mayor consumidor, seguida por India, con un incremento en su demanda del 6 % hasta 1.300 Mt.

Particularmente, en Colombia durante el 2024 la explotación del carbón representó el 79,7 % del total de explotación minera, ubicando al país como el sexto exportador mundial de carbón (BP, 2025) y, como el cuarto en coque (TradeMap, 2025), manteniendo su relevancia en el mercado internacional.

Durante el año 2024, según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE, el carbón térmico ocupó el segundo lugar de exportación en Colombia, lo que representa cerca del 12 % del valor total de las exportaciones del país y más de 67.700 empleos directos, lo que evidencia su relevancia en la balanza comercial y regional, especialmente en los departamentos del Cesar, La Guajira y Córdoba, donde la contribución al PIB departamental de la actividad de explotación de minas y canteras fue del 24,61 %, 25,83 % y 1,94 %, respectivamente (DANE, 2025).

Sin embargo, el contexto global de descarbonización, impulsado por compromisos como el Acuerdo de París que destaca la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, donde el carbón se identifica como el mayor emisor de CO₂ entre los combustibles fósiles (IPCC, 2018), presenta desafíos para la industria carbonífera. La transición energética hacia economías bajas en carbono está alterando la demanda global, presionando a países productores como Colombia a mejorar su competitividad y diversificar el uso del carbón. Además, la oferta global supera la demanda, manteniendo los precios en niveles históricamente bajos.

A pesar de la importancia del carbón en la generación eléctrica mundial (de más de un tercio), y en la producción de acero y cemento, se espera la disminución en el consumo del energético ante el desarrollo gradual de las energías limpias, considerando que la capacidad instalada global se acercó a los 4.250 GW en 2024 (IEA, 2024), la cual se proyecta que se triplique al 2030, según el Escenario de Políticas Declaradas – STEPS de la IEA. Este panorama global, genera presión sobre las exportaciones de los países productores del energético, ubicados en zonas distantes a los grandes consumidores ubicados en el sudeste asiático, como es el caso de Colombia.

Es importante destacar que estos compromisos para la reducción de emisiones son graduales debido a la infraestructura existente, las variables geopolíticas que moldean el panorama energético mundial y la velocidad de incorporación de energías limpias. En regiones industrializadas persiste el uso del carbón con tendencia creciente, generando incumplimiento de los compromisos de descarbonización globales. A esto anterior, se suma que los compromisos de la transición se han visto afectados por factores de mercado, como la volatilidad en los precios del gas natural y del petróleo.

Este contexto mundial, constituye un reto para Colombia toda vez que requiere mejorar sus niveles de competitividad frente a otros países con mejores condiciones logísticas para abastecer mercados internacionales como el asiático. Lo anterior, hace necesario que se identifiquen y promuevan otros usos del carbón que aporten al desarrollo económico del país y las regiones. De allí consolidando la estrategia de Minería con propósito, la cual integra la necesidad de identificar diferentes procesos de transformación del carbón, mediante los cuales se produzcan materiales con valor agregado, en un mercado con potencial de crecimiento, teniendo en cuenta que las cifras muestran que su uso no convencional alcanzó el 3,6 % del consumo del recurso en el mundo durante el 2023.

En respuesta a este reto, Colombia ha alineado sus políticas con el Plan Nacional de Desarrollo del Plan Nacional de Desarrollo “Colombia, Potencia Mundial de la Vida 2022-2026” (Ley 2294 de 2023), que estableció cinco grandes transformaciones para el país, siendo una de ellas, la economía productiva para la vida y lucha contra el cambio climático, que busca reducir la dependencia del país de los recursos generados por las actividades extractivas, promoviendo una economía productiva y sostenible. Así mismo, la Hoja de Ruta para la Transición Energética Justa en Colombia, plantea un marco para transformar el uso de los recursos del país, hacia un modelo sostenible que priorice la justicia ambiental, la reindustrialización y la diversificación productiva (MME, 2023). Es relevante considerar que esta Hoja de Ruta subraya la necesidad de identificar oportunidades de diversificación productiva en los territorios, así como los usos alternativos que generen valor agregado y reduzcan la vulnerabilidad económica de las regiones carboníferas.

Es así, como en el Plan Nacional de Desarrollo 2022 - 2026 propone un enfoque de reindustrialización que diversifique los usos del carbón, integrándolo en procesos de mayor valor agregado alineado con las metas de crecimiento verde (DNP, 2023). Con la Hoja de Ruta para la Transición Energética Justa se complementa esta visión al enfatizar la reconversión económica, proponiendo un marco en el cual el uso del carbón se oriente hacia aplicaciones innovadoras que reduzcan su huella ambiental y fortalezcan la competitividad industrial, a partir del potencial del carbón colombiano para que trascienda de su rol tradicional, con una nueva visión del uso del recurso que aproveche sus propiedades químicas y estructurales (MME, 2023).

En concordancia con lo anterior, la Agencia Nacional de Minería actualizó la lista de minerales estratégicos para Colombia (Resolución N°1006 del 2023), identificando al carbón de uso metalúrgico

como un recurso clave dentro de este grupo, lo que no solo refuerza la importancia de este energético en la balanza comercial y el desarrollo regional, sino que también sienta las bases para diversificar el uso del carbón, alineándose con las metas de reindustrialización y sostenibilidad del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 (DNP, 2023).

Así las cosas, la importancia de formular y analizar cadenas productivas que diversifiquen el uso del carbón más allá de su función tradicional —ya sea como fuente de generación de energía o como insumo para la industria siderúrgica— radica en su potencial para mitigar los impactos socioeconómicos derivados de la transición energética y de las fluctuaciones en los mercados internacionales, especialmente en territorios cuya economía depende de su extracción.

Fundamentado en la abundancia del recurso carbonífero en el país y en el contexto actual, en el que el carbón destinado a la generación eléctrica y a la industria siderúrgica enfrenta desafíos derivados del avance de las energías renovables y de la necesidad de descarbonización, el presente documento ofrece un panorama de los usos alternativos del carbón. Para ello, desarrolla una valoración sobre aquellos usos no convencionales con mayor potencial de desarrollo en Colombia. En este sentido, el objetivo general se orienta a elaborar un diagnóstico que identifique dichas alternativas, en coherencia con los lineamientos del Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026 y la Hoja de Ruta para la Transición Energética Justa del Ministerio de Minas y Energía (2023), los cuales promueven la reconversión del uso del carbón más allá de su función tradicional como combustible.

La diversificación del uso del carbón responde a un imperativo global de adaptación en un escenario de transición hacia sistemas energéticos bajos en carbono, donde la búsqueda de soluciones innovadoras que armonicen desarrollo económico y sostenibilidad ambiental se vuelve indispensable (MME, 2023). En consecuencia, este documento también se propone identificar posibles aplicaciones industriales del carbón y sus cadenas productivas asociadas, distintas a su uso energético, considerando los avances investigativos, las oportunidades emergentes y los retos propios del contexto colombiano. Para dar respuesta a lo anterior, se tuvo como consideraciones fundamentales:

i). El contexto global de descarbonización ante los compromisos internacionales suscritos en el Acuerdo de París.

ii). En el proceso de transformación enunciado en el Plan Nacional de Desarrollo “Colombia, Potencia Mundial de la Vida 2022-2026” (Ley 2294 de 2023): Economía productiva para la vida y lucha contra el cambio climático”, el cual busca reducir la dependencia de actividades extractivas y promover una economía productiva y sostenible.

iii). En lo planteado en la Hoja de Ruta para la Transición Energética Justa en Colombia, acerca de la transformación del uso de los recursos del país, hacia un modelo sostenible que priorice la justicia ambiental, la reindustrialización y la diversificación productiva (MME, 2023).

iv). Colombia cuenta con recursos y reservas reportados bajo el Estándar Colombiano para el Reporte de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales - ECRR por 6.629 millones de toneladas (Mt) de carbón (ANM, 2025). El promedio anual explotado durante el período 2020-2024 alcanza 63,5 Mt, con tendencia decreciente para el 2025.

v). En que el recurso ocupa un renglón importante en la economía del país:

- En 2024 el carbón térmico ocupó el segundo renglón de exportación colombiano, mientras que el coque ocupó el sexto lugar y el carbón metalúrgico el diecisiete, de tal forma que los productos relacionados con el carbón alcanzaron un valor FOB de USD 7.106,6 millones con 64,6 Mt.
- En 2024 aportó el 80,8% en las regalías mineras, representado en COP 3,3 billones de pesos y más de 67.700 empleos directos, así se evidencia su relevancia en la balanza comercial nacional y regional, especialmente en los departamentos del Cesar, La Guajira y Córdoba.

Así mismo, el presente documento consideró la información disponible sobre los desarrollos tecnológicos e industriales en los países que han avanzado en procesos innovadores en esta temática, así como las investigaciones adelantadas en Colombia por entidades gubernamentales, comunidades, empresas mineras, gremios e industria.

Para considerar todo lo anterior, se aplicó una metodología de identificación de los usos alternativos del carbón que consideró, entre otras variables: el uso final del energético, la madurez tecnológica de los procesos de transformación, el comercio exterior en el mundo y en Colombia y el impacto ambiental en términos de emisiones de CO₂. Esta metodología tiene una amplia explicación en el numeral 3.1 del documento.

A partir de los resultados de la metodología de priorización, se identificaron dos grupos fuertemente influenciadas por el nivel de madurez tecnológica (TRL) en Colombia y por la huella ambiental medida en CO₂e. Cabe señalar que, en el caso del hidrógeno, la evaluación de la huella ambiental incluye la consideración del proceso de captura y almacenamiento de carbono (CCS).

El documento desarrolla la cadena productiva preliminar de los tres primeros productos (sustancias húmicas, carbón activado e hidrógeno), como parte del diagnóstico, considerando la información de comercio exterior en Colombia, materia prima, cadena de valor, tecnología, marco regulatorio y mapeo de actores en cada uno de ellos.

El análisis realizado permitió evidenciar que el consumo del carbón para usos no energéticos en el mundo tiende a crecer en el marco de una política generalizada de transición energética; al respecto, Colombia cuenta con recursos y reservas significativas de carbón de todos los rangos y calidades, materia prima disponible para la diversificación productiva, que impulse una economía más competitiva y sostenible, mediante la obtención de productos de mayor valor agregado, alineados con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, priorizando la justicia ambiental, la reindustrialización y la diversificación productiva.

A partir del presente documento, se recomienda profundizar en el análisis de todos los usos no convencionales del carbón, que si bien, no fueron contemplados en el análisis realizado, son una oportunidad para la diversificación de cadenas productivas que contribuyan a la creación de empleo, la transferencia tecnológica y la integración en cadenas de valor globales, aspectos fundamentales para el crecimiento verde con justicia social en concordancia con los planteamientos del Plan Nacional de Desarrollo 2022 – 2026 (DNP, 2023) y consolidando así una Minería con propósito al servicio de las regiones y la transición energética justa-TEJ.



1. CONTEXTO

MUNDIAL DEL CARBÓN

1. CONTEXTO MUNDIAL DEL CARBÓN

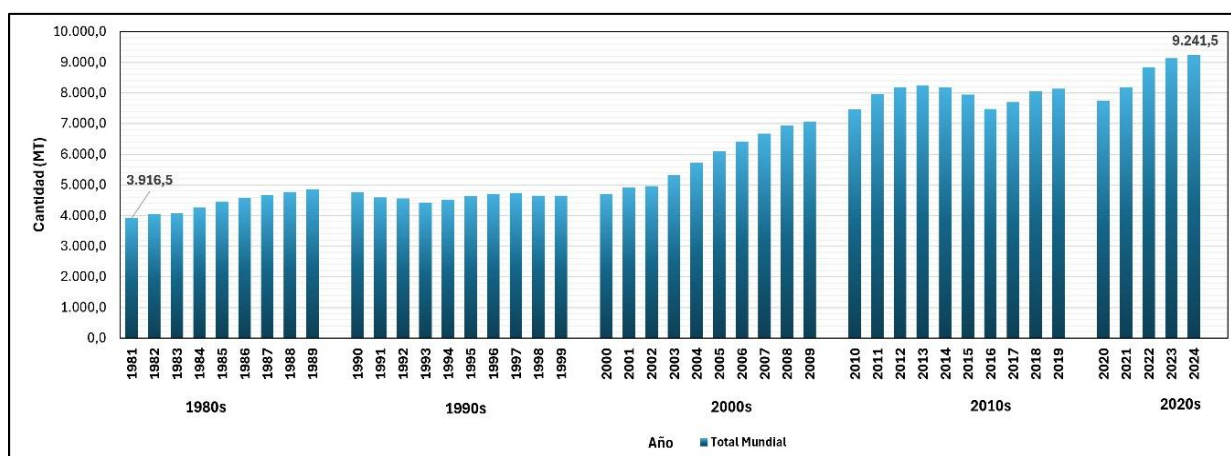
Es indispensable desarrollar un análisis del contexto mundial del carbón que incorpore, como se indica a continuación, una caracterización del mercado global tanto en sus aplicaciones térmicas y metalúrgicas, así como un análisis de precios y perspectivas. Este análisis, considera el desafío de avanzar hacia una transición energética compatible a una economía baja en carbono, razón por la cual es necesario incluir los usos no convencionales, dado que las políticas de descarbonización han venido reduciendo el consumo del carbón para la generación eléctrica, principalmente en Europa, incrementando el interés de desarrollar derivados de alto valor, y por ende de tecnologías de captura de carbono, en atención a nichos de mercado industriales diferenciados, dinámicas de suministro y tendencias de consumo (IEA, 2024).

1.1. Oferta de carbón a nivel mundial

La oferta mundial del energético considera su extracción para uso directo, y aquel destinado a usos industriales específicos que requieren calidades y especificaciones técnicas diferenciadas en los diferentes rangos, desde lignitos hasta antracitas. Datos publicados por el *Energy Institute* en el *Statistical Review of World Energy (2025)*, muestran una tendencia general de crecimiento a lo largo de las últimas cuatro décadas. La extracción global de carbón pasó de 3.916,5 Mt en 1981 a 9.241,5 Mt en 2024, indicando que el carbón ha mantenido su importancia como fuente de energía primaria a nivel mundial, en medio de una tendencia hacia la descarbonización. En el reporte, se identifican períodos de rápido crecimiento, especialmente entre los años del 2000-2013 y, 2021-2024; impulsados en gran medida por la demanda energética asociada a usos industriales.

Sin embargo, se observan fluctuaciones y desaceleraciones temporales que reflejan un mercado global complejo, moldeado por factores geopolíticos, económicos y ambientales, donde se destacan las crisis económicas globales, la pandemia del COVID-19, las variaciones en los precios de las materias primas energéticas, y la creciente presión internacional por los desafíos de la transición energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero - GEI; este último presenta un crecimiento atribuido a la demanda industrial y energética en los últimos cinco años (IEA, 2024). En el siguiente gráfico se muestra la explotación mundial del carbón del período 1981 a 2024:

Gráfico 1. Explotación mundial de carbón (Mt). 1981-2024.

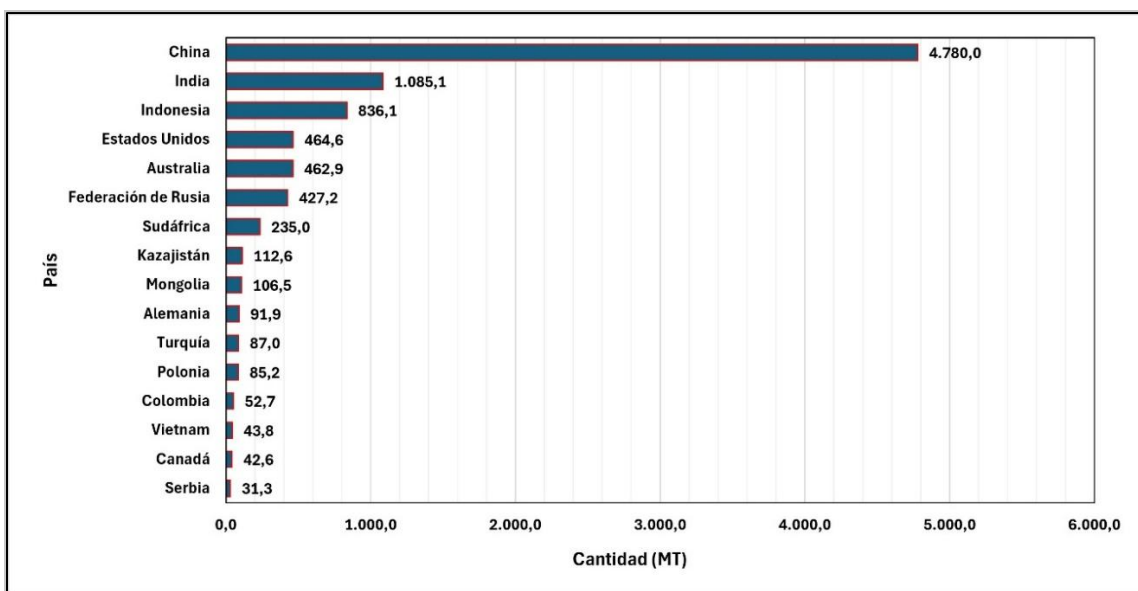


Fuente: elaboración propia a partir de datos en el *Statistical Review of World Energy*, 2025.

China, se ha posicionado como el principal explotador mundial de carbón con 4.780 Mt en 2024, lo que representó más del 50 % de la explotación global, seguido de India con 1.085,1 Mt, relacionado con la alta demanda de carbón para la generación eléctrica para soportar su crecimiento industrial, la cual es complementada con importaciones del recurso para abastecer sus consumos internos.

Indonesia ocupa la tercera posición como explotador mundial de carbón con 836,1 Mt, seguido por los Estados Unidos con 464,6 Mt y Australia con 462,9 Mt. Así, China, India, Indonesia, EE. UU. y Australia, representan el 82,5 % de la explotación total, influyendo en los precios y el comercio internacional del energético, de tal forma que sus políticas internas de energía y desarrollo impactan directamente la disponibilidad de este recurso a nivel global.

Gráfico 2. Principales países explotadores de carbón (Mt)- 2024.



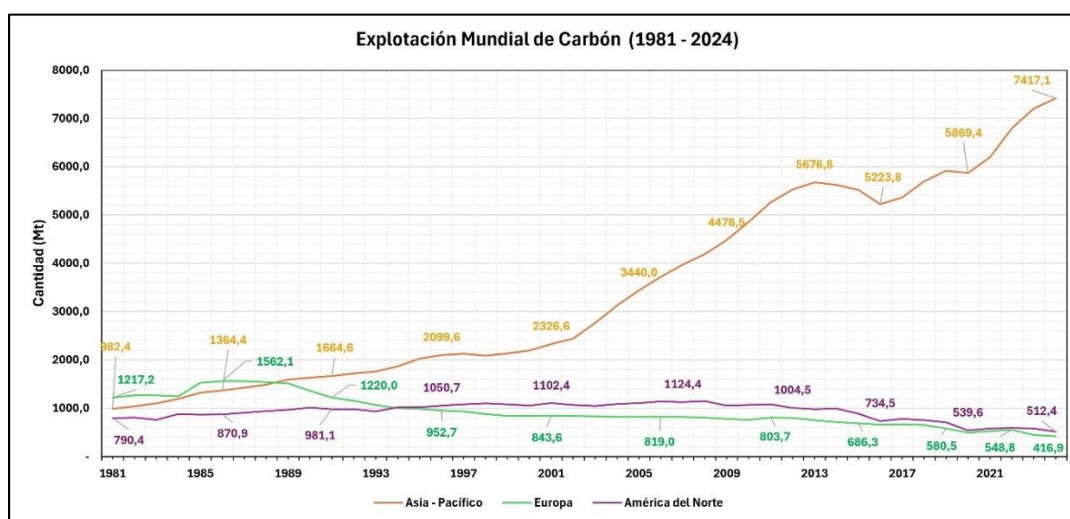
Fuente: elaboración propia a partir de datos del Energy Institute en el Statistical Review of World Energy, 2025.

El análisis de puntos de cambio regional permite obtener una perspectiva más detallada de la variación en la explotación del recurso, de tal forma que durante el período 1981-2024 se evidencian las tendencias en las diferentes regiones del mundo. Es así, que en la región Asia - Pacífico se observa una tendencia creciente, pasando de 982,4 Mt en 1981 a 7.417,1 Mt en 2024, con lo cual, la región participa con el 80,2 % del carbón extraído en el mundo.

La explotación de carbón en Europa comenzó a descender después de 1986, pasando de 1.562,1 Mt a 416,9 Mt en 2024, acorde con las políticas de descarbonización y el avance en las fuentes de energía más limpias en el continente, mientras que en Oriente Medio la explotación se mantuvo en niveles que no superaron las 2,4 Mt durante el período 1981-2021, incrementando a 11,0 Mt en 2024.

Por su parte, América del Norte, presentó su máximo de explotación en el periodo 2006-2008, superando las 1.100 Mt, seguido por una tendencia decreciente hasta llegar a las 512,4 Mt en 2024. Esta tendencia sugiere un cambio estructural en el consumo de carbón en la región, impulsado por factores como el aumento de la generación de energía renovable, el aumento del gas natural como energético y las políticas ambientales adoptadas en esta región, entre otros.

Gráfico 3. Análisis de puntos de cambio de la explotación de carbón (Mt) en la región Asia - pacífico, Europa y América del Norte. (1981 y 2024).

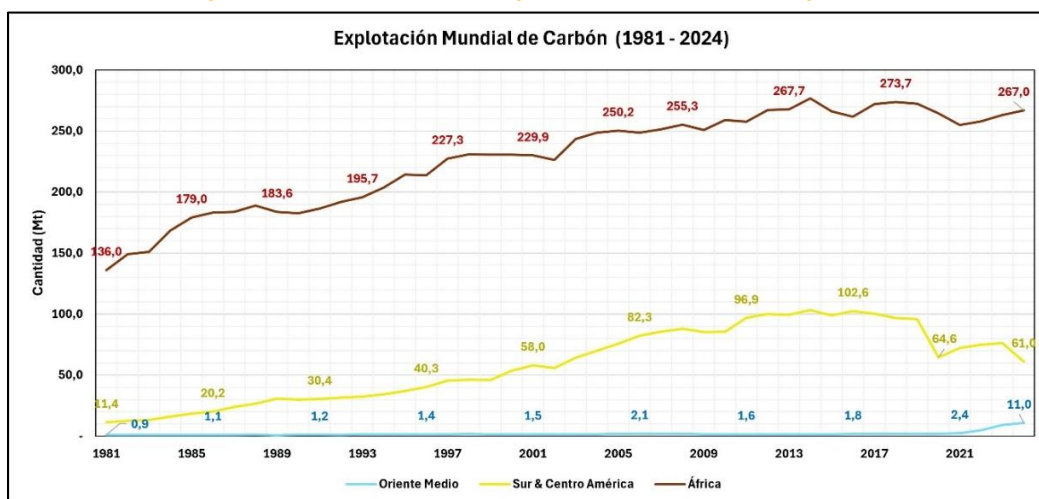


Fuente: elaboración propia a partir del Energy Institute en el Statistical Review of World Energy, 2025.

En la región de África, la tendencia en la explotación es ascendente, sin ser considerable, alcanzando las 267 Mt en 2024, con más del 90% de la producción total minada en Sudáfrica.

En la zona Sur y Central de América, se identifica una tendencia creciente desde 11,4 Mt en 1981 hasta un máximo de 104 Mt en el 2014, descendiendo hasta 61,0 Mt en 2024, donde Colombia aportó el 86,4 %; es importante tener en cuenta que cerca del 85 % del carbón explotado en el país se destina a exportación, por lo anterior Colombia se ha consolidado como el mayor productor y exportador de carbón en la región, abasteciendo principalmente mercados de Europa y Asia.

Gráfico 4. Análisis de puntos de cambio de la explotación de carbón (Mt) en la región de África, Oriente Medio, Sur y Centro América (1981 y 2024).

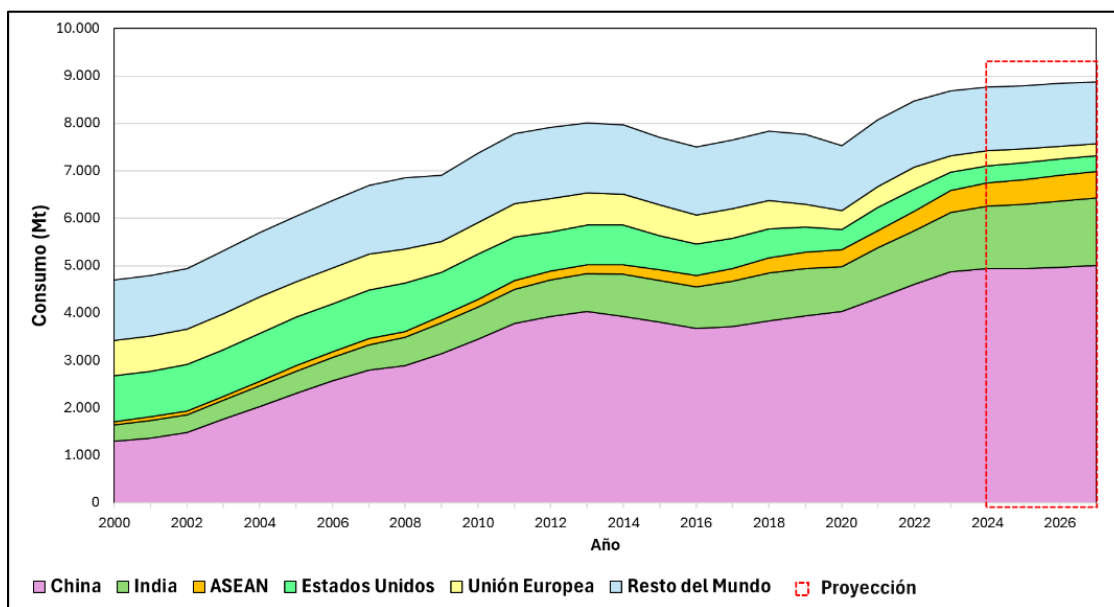


Fuente: elaboración propia a partir del Energy Institute en el Statistical Review of World Energy, 2025.

1.2. Demanda de carbón a nivel mundial

La demanda del carbón ha presentado variaciones asociadas principalmente a temas geopolíticos y situaciones eventuales como la pandemia del Covid-19, entre otros. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente y a pesar de que el carbón sigue siendo la principal fuente de generación eléctrica mundial, donde sus consumos en los últimos 24 años han venido aumentando y se espera su estabilización para el año 2026 (ver gráfica 9) su participación en la matriz energética mundial ha disminuido al 35 %, la más baja desde 1974. La siguiente gráfica muestra el consumo global de carbón y su proyección al corto plazo.

Gráfico 5. Consumo global de carbón (Mt), 2000 – 2027.



Fuente: Editado y traducido de (IEA, 2024).

Respecto al carbón metalúrgico, la demanda en 2024 disminuyó un 0,5 % debido a la reducción en la producción mundial de acero, aunque el consumo para usos no eléctricos, como la producción de níquel en Indonesia y químicos en China, mostró un ligero crecimiento (IEA, 2025).

En 2024, la generación termoeléctrica experimentó un incremento según información reportada por la IEA, reflejado en un aumento en la demanda global de carbón. Este aumento está asociado principalmente al consumo de Asia y sus niveles de desarrollo industrial, continente que concentró casi cuatro quintos de la demanda global de carbón, con China representando el 58 % del consumo mundial, consumiendo un 40 % más que el resto del mundo combinado.

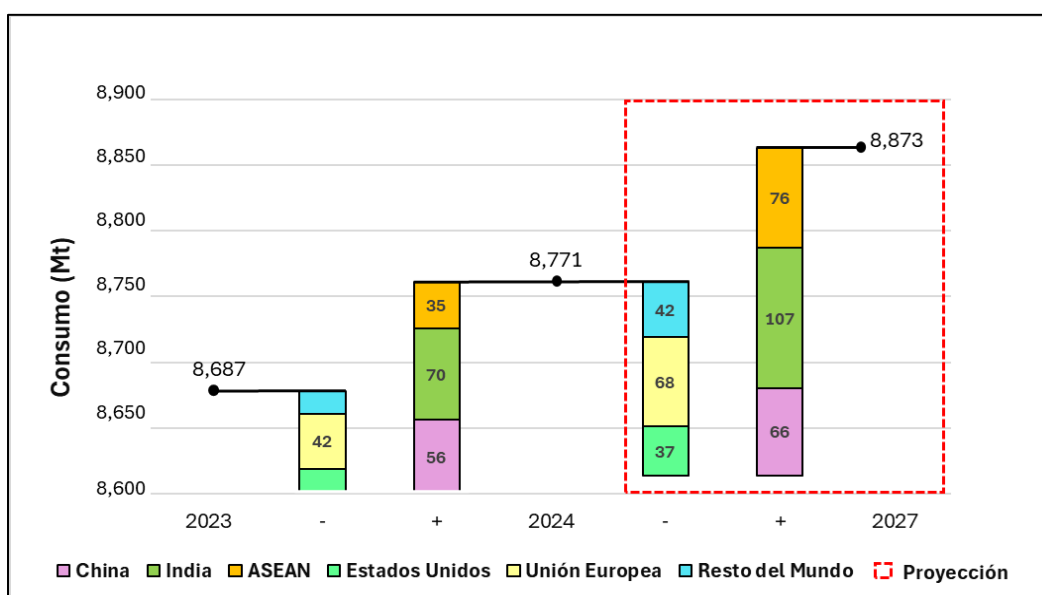
Particularmente en China, la demanda creció un 1,2 %, impulsada por un aumento en la demanda eléctrica que no pudo ser completamente cubierto por fuentes renovables, hidráulica, nuclear o gas, dejando al carbón como solución para cerrar la brecha.

En India, el segundo mayor consumidor, la demanda aumentó un 5,5 %, reflejando un crecimiento económico que elevó el consumo en el sector eléctrico y en la industria, con un incremento del 6,3 % en la producción de acero.

En los países de la ASEAN, el consumo creció un 8 %, liderado por la generación eléctrica en Filipinas y Vietnam, y por su uso en la industria metalúrgica, especialmente en la producción de níquel en Indonesia. En contraste, se encuentra una disminución sostenida en la Unión Europea, en donde el consumo disminuyó un 10 %, y en Estados Unidos donde la reducción fue del 4 %, tendencia reforzada por el cierre de plantas de carbón (IEA, 2025).

Según proyecciones de la IEA, la demanda global de carbón puede estabilizarse o crecer marginalmente hasta 2027, dependiendo de factores económicos, geopolíticos y energéticos, mientras que el crecimiento de las fuentes renovables alcanzó los 770 TWh en 2024, mitigando un mayor incremento en la demanda de carbón (IEA, 2025).

Gráfico 6. Cambios en el consumo global de carbón (MT), 2023–2027.



Fuente: editado y traducido de (IEA, 2024).

1.2.1. Demanda global y perspectivas del carbón para uso térmico

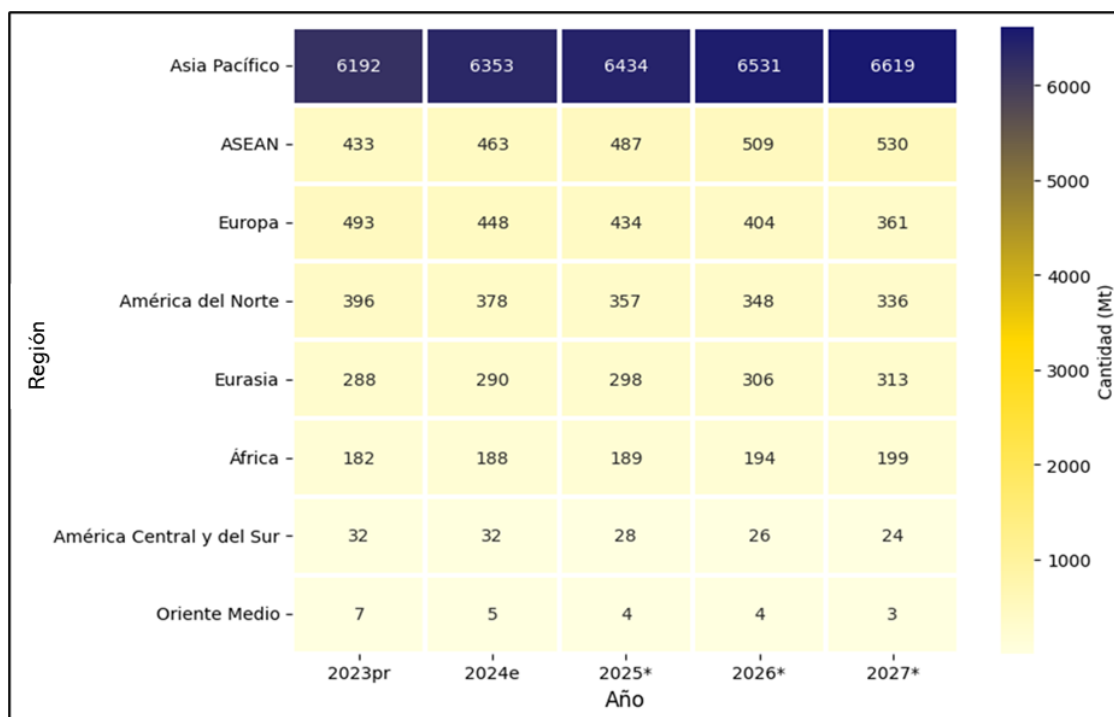
La proyección realizada por la IEA respecto a la evolución de la demanda global de carbón para uso térmico considera factores como el consumo directo y el consumo aparente (explotación interna, importaciones y exportaciones), metodología mediante la cual se identifican con mayor precisión el consumo de carbón como fuente energética en diferentes regiones del mundo, ya sea por su capacidad para explotar el energético o por su interacción con los mercados internacionales.

Así, las cifras de consumo, explotación y flujos comerciales no se presentan de forma aislada, sino como componentes interrelacionados que explican las dinámicas de la demanda real. En este sentido, se observa que el consumo de carbón a 2027 se incrementará principalmente en India, los países ASEAN y China, manteniendo la tendencia presentada durante 2024.

En la proyección, la región de Asia Pacífico lidera el consumo global de carbón, pasando de 6.192 Mt en 2023 a 6.619 Mt en 2027, lo que representará un aumento del consumo del 6,9 %, correspondiente a 427 Mt.

Por otra parte, la región ASEAN también muestra un crecimiento notable del consumo, pasando de 433 Mt a 530 Mt en el mismo período, representando un incremento del 22,4 %, así mismo, la región de Eurasia y África también muestran incrementos del 8,7 % y 9,3 %, respectivamente.

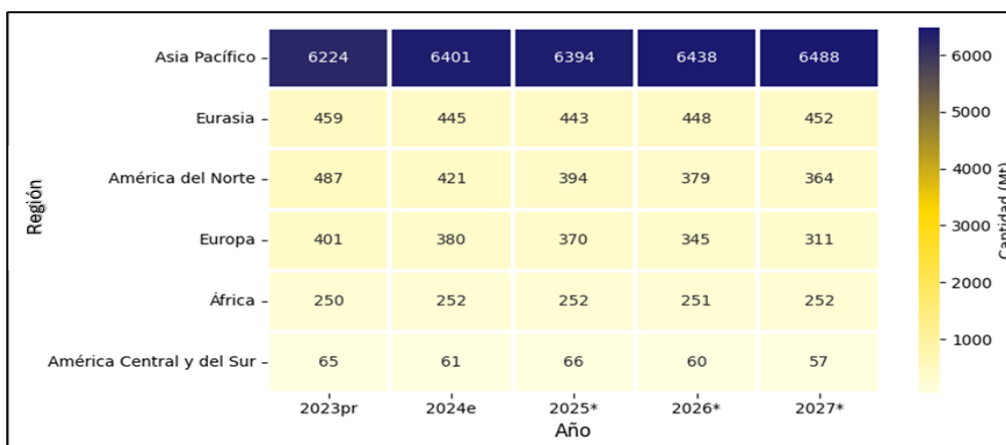
Gráfico 7. Mapa de calor Consumo de carbón y lignito de uso térmico (Mt).



Fuente: elaboración propia a partir de datos de (IEA, 2024). Pr: preliminar, e: estimado, *: proyectado

Ahora bien, en cuanto a las cantidades explotadas del energético en las diferentes regiones entre 2023 y 2027, se identifica una tendencia creciente para las regiones Asia Pacífico y África, mientras que se presenta una tendencia decreciente para las regiones Eurasia, América del Norte, Europa y América Central y del Sur, lo cual muestra que, a diferencia de las demás regiones, la región Asia Pacífico mantendrá su posición como el mayor explotador y consumidor de carbón a nivel mundial con tendencia ascendente.

Gráfico 8. Mapa de calor explotación de carbón y lignito de uso térmico (Mt).



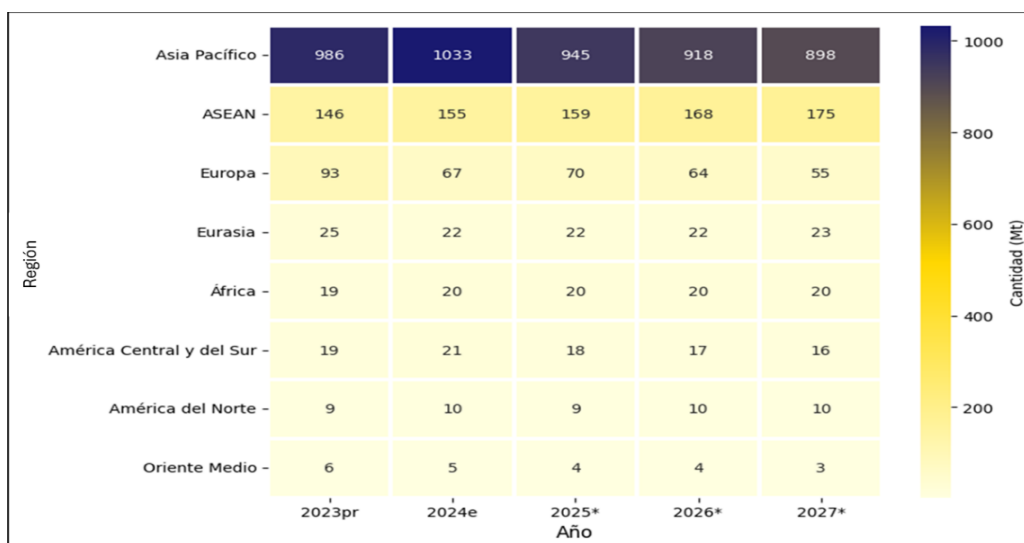
Fuente: elaboración propia a partir de datos de (IEA, 2024). Pr: preliminar, e: estimado, *: proyectado.

Respecto a las importaciones del energético, la región Asia Pacífico se mantiene como el principal importador de carbón térmico, pesar de la reducción proyectada del 8,9 % al 2027.

El descenso en la región se puede atribuir al incremento en la explotación del recurso por parte de los países que la conforman, especialmente en China e India, procurando así la autosuficiencia. Sin embargo, dentro de Asia, para la región ASEAN se espera un comportamiento opuesto, con un incremento del 19,9 % en las importaciones (de 146 Mt a 175 Mt), lo que evidencia la creciente demanda energética.

Se destaca que en Europa se espera una disminución en los volúmenes de carbón importado, pasando de 93 Mt en 2023 a 55 Mt en 2027, lo cual representa una reducción del 40,9 %, lo anterior, acorde con su política energética de descarbonización y diversificación.

Gráfico 9. Mapa de calor importación de carbón y lignito de uso térmico (Mt).



Fuente: elaboración propia a partir de datos de (IEA, 2024). Pr: preliminar, e: estimado, *: proyectado.

En términos generales, se espera que las exportaciones del energético se reduzcan al 2027, en la región ASEAN se destaca la participación de Indonesia, la cual se espera sea superior al 96 % en 2027, sin embargo, dicha participación incluye una reducción del 13 % en las cantidades exportadas del 2023 al 2027, como se observa en el siguiente gráfico:

Gráfico 10. Mapa de calor exportación de carbón y lignito de uso térmico (Mt).

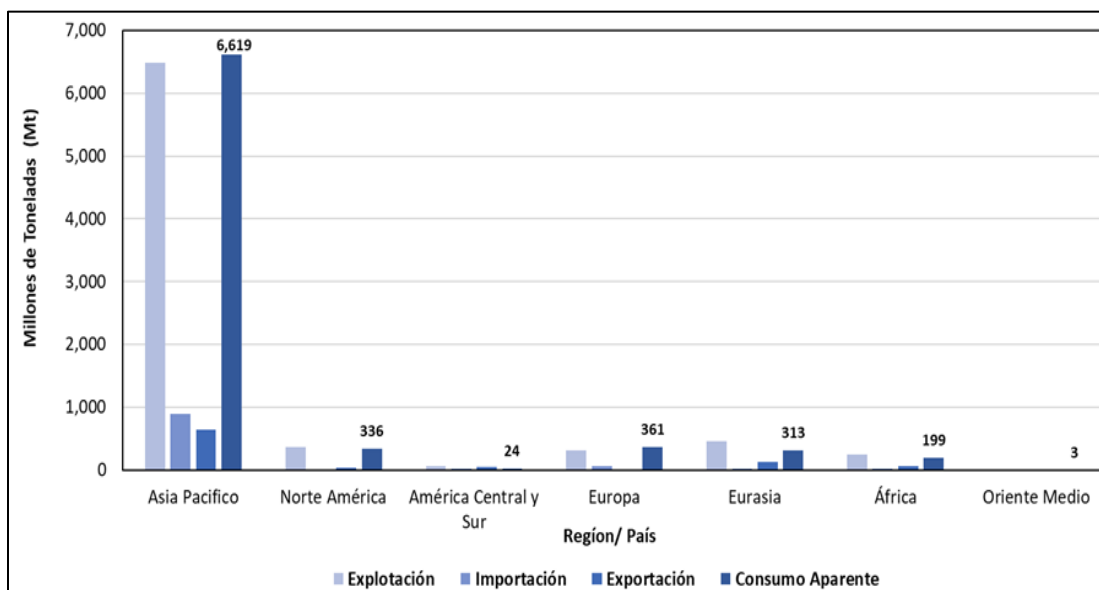


Fuente: elaboración propia a partir de datos de (IEA, 2024). Pr: preliminar, e: estimado, *: proyectado

A partir de la información y proyecciones al 2027 sobre consumo, explotación, importaciones y exportaciones de carbón térmico, se espera que la región Asia Pacífico se mantenga como el eje dominante del mercado global, tanto en términos de consumo aparente como de cantidades explotadas, con una demanda aparente superior a las 6.600 Mt en 2027.

Además, se espera que, en regiones como Europa y América del Norte, de mantenerse las políticas de descarbonización en el marco de la transición energética, se presente reducción tanto en la explotación del recurso como en su consumo aparente al 2027; mientras en regiones como África y Eurasia se espera que las cantidades explotadas permitan el autoabastecimiento, generando excedentes del recurso para su exportación; entre tanto, en la región de América Central y Sur, se espera que el consumo sea inferior a los volúmenes explotados, dedicando gran parte de estos a su exportación, como sucede en Colombia.

Gráfico 11. Componentes de la demanda de carbón térmico por región (2027).



Fuente: elaboración propia a partir de (IEA, 2025).

Según información sobre centrales térmicas a partir de carbón en el Global Energy Monitor, en el 2025 se encuentran en construcción 466 centrales térmicas, y se espera que en los próximos años se construyan 748 plantas adicionales, de las cuales el 90,9 % estarán ubicadas en el continente asiático, principalmente en China e India, lo que evidencia la concentración del mercado del carbón térmico en esta región y el crecimiento de la demanda del energético como materia prima para la generación eléctrica, impulsada por su continua expansión industrial y sus crecientes requerimientos energéticos.

Gráfico 12. Mercado potencial de carbón térmico.



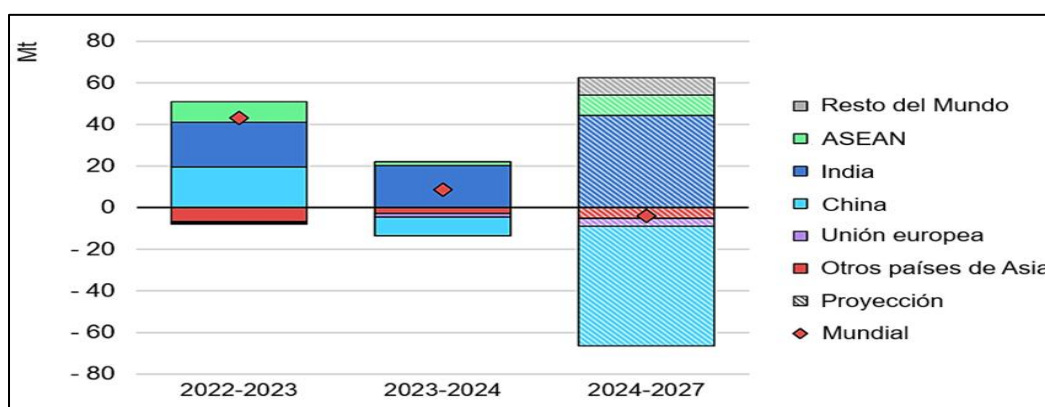
Fuente: editado y traducido a partir de Global Energy Monitor. (agosto, 2025).

Ahora bien, según la información de la IEA, en 2023 el consumo global de carbón térmico y lignito para usos no energéticos representó el 23 % del consumo total del energético con 1.736 Mt, de los cuales China consumió el 63 % con 1.094 Mt, con un crecimiento continuo en el sector de conversión del carbón,

relacionado con la búsqueda de alternativas para disminuir la dependencia de las importaciones de petróleo y gas; sin embargo, se espera un descenso de 58 Mt en la demanda del carbón no destinado a la generación eléctrica en el país asiático para el 2027(IEA, 2024).

Al 2027, se espera que India mantenga el incremento en el uso del carbón con propósito no registrado desde 2022, gracias al crecimiento de la actividad industrial que se estima tenga un crecimiento del 6 % anual para el periodo 2024 – 2027, de tal forma que el incremento esperado en la cantidad demandada para 2027 será de 44 Mt. Acorde con lo anterior, se proyecta que el consumo mundial del carbón para fines no energéticos mantendrá una relativa estabilidad, con un pequeño descenso del 0,2 % representado en 4 Mt en 2027, como se observa en la siguiente gráfica.

Gráfico 13. Consumo de carbón térmico y lignito para fines no energéticos.

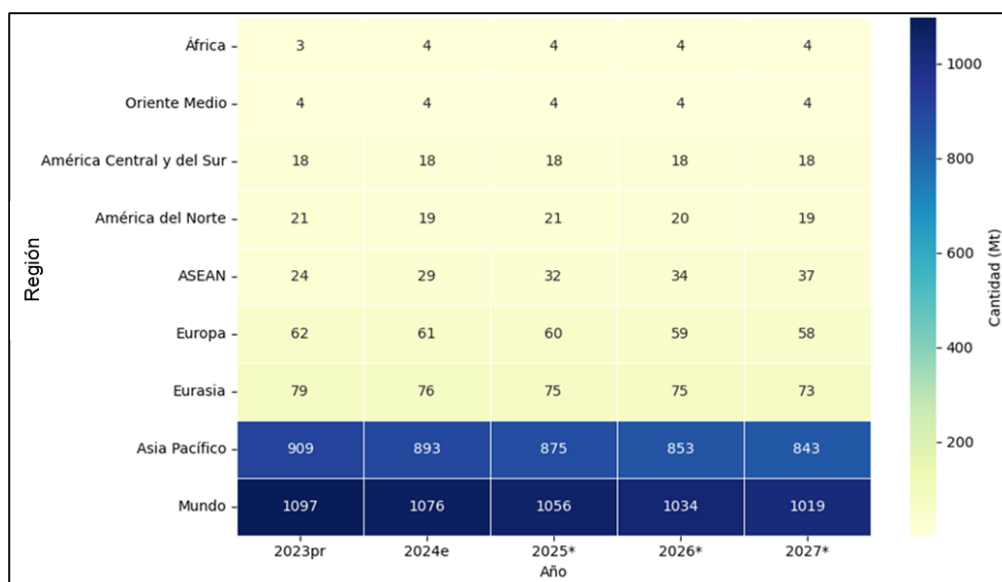


Fuente: editado y traducido de (IEA, 2024).

1.2.2. Demanda global y perspectivas del carbón metalúrgico y coque

El consumo de carbón metalúrgico en el mundo es liderado por la región Asia Pacífico, el cual representa el 83 % del consumo global. La actividad industrial en China ha sido determinante en su variación, tal como sucedió en el 2024 en donde se registró reducción en el consumo relacionada con una menor actividad industrial. Para 2027, a pesar del incremento proyectado en el consumo de países como India e Indonesia, se espera una disminución en el consumo total de carbón metalúrgico cercana al 7 % durante el periodo 2023 – 2027, impulsada por el descenso del consumo esperado principalmente en China.

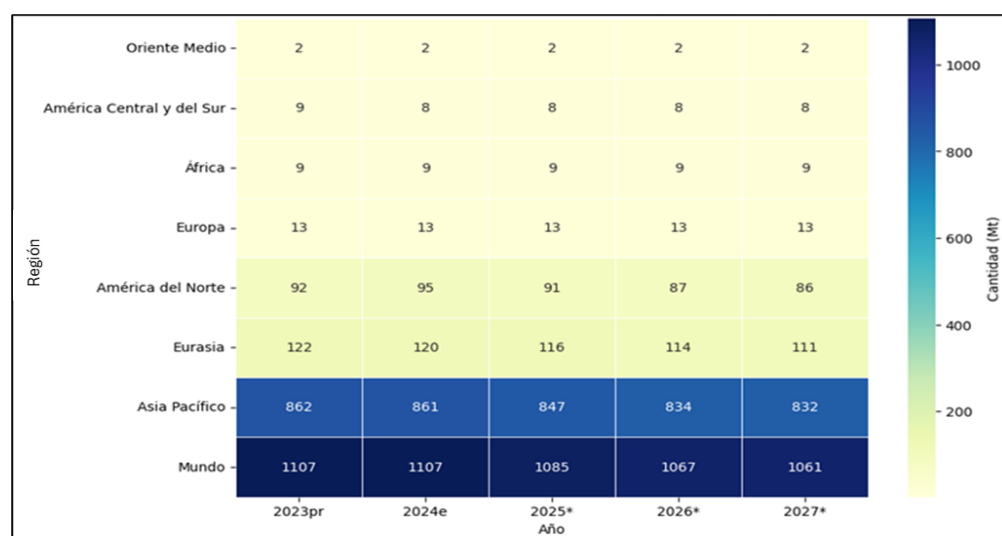
Gráfico 14. Mapa de calor consumo de carbón metalúrgico (Mt).



Fuente: elaboración propia a partir de datos de (IEA, 2024). Pr: preliminar, e: estimado, *: proyectado.

Similar a la explotación de carbón térmico, la extracción de carbón metalúrgico se concentra en la región Asia Pacífico, la cual se espera que para el 2027 aporte más del 78 % del total, estando acorde con los datos relacionados con el consumo por región.

Gráfico 15. Mapa de calor explotación de carbón metalúrgico (Mt).

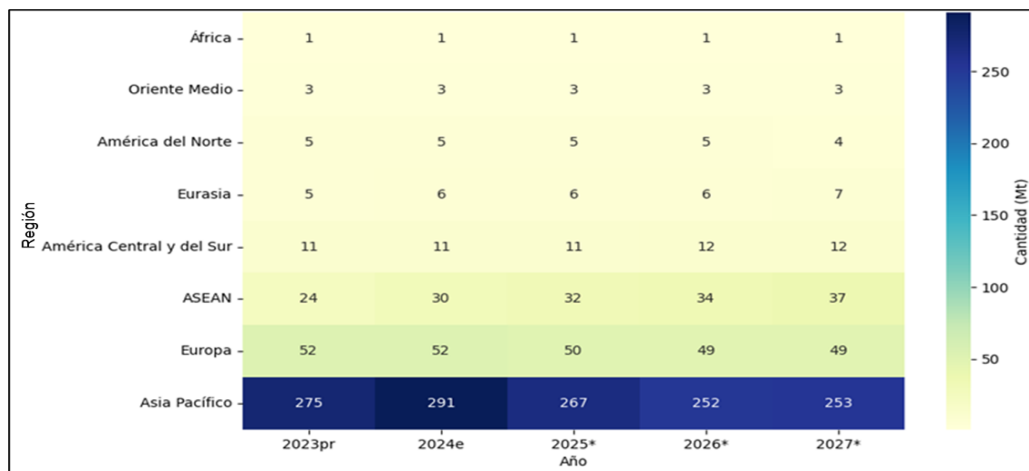


Fuente: elaboración propia a partir de datos de (IEA, 2024). Pr: preliminar, e: estimado, *: proyectado.

Como se observa en la siguiente gráfica la región Asia Pacífico se destaca como el mayor importador de carbón metalúrgico, situación que se mantiene hasta el 2027, sin embargo, acorde con las tendencias de

consumo del 2023 al 2027 se espera que las cantidades a importar también se reduzcan durante este período.

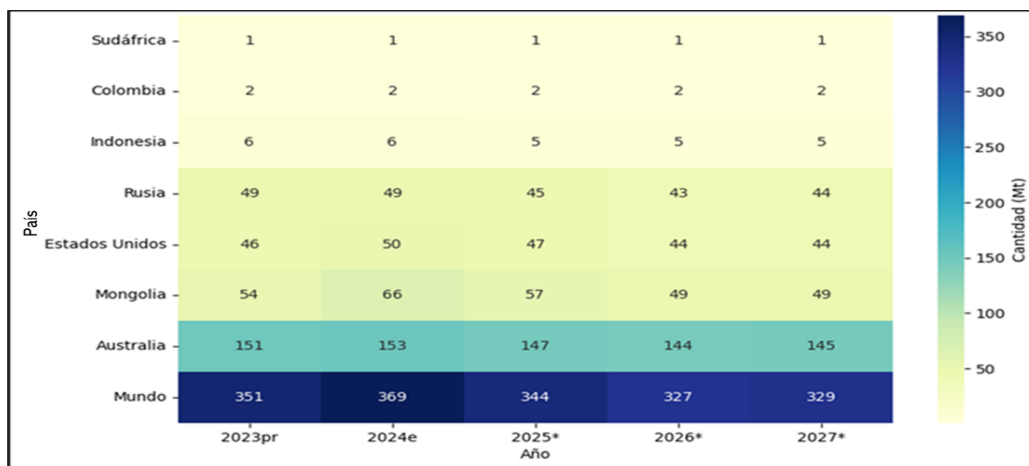
Gráfico 16. Mapa de calor importación de carbón metalúrgico (Mt).



Fuente: elaboración propia a partir de datos de (IEA, 2024). Pr: preliminar, e: estimado, *: proyectado.

Con el 86 % de participación de las exportaciones mundiales de carbón metalúrgico, se espera que para 2027, Australia, Mongolia, Estados Unidos y Rusia se mantengan como los principales oferentes en el mercado mundial, la variación del 2023 al 2027 se muestra en la siguiente gráfica:

Gráfico 17. Mapa de calor exportación de carbón metalúrgico (Mt).



Fuente: elaboración propia a partir de datos de (IEA, 2024). Pr: preliminar, e: estimado, *: proyectado.

Según información consultada en el Global Energy Monitor, en el 2025 se encuentran 408 plantas siderúrgicas de alto horno en operación, de las cuales el 82 % se encuentran ubicadas en Asia (principalmente en China), el 10 % en Europa, el 7 % en América y el 1 % en África y Oceanía. Lo anterior, ratifica la concentración del mercado del carbón en la región Asia Pacífico.

Gráfico 18. Mercado potencial de carbón metalúrgico.



Fuente: editado y traducido a partir de Global Energy Monitor. (agosto, 2025).

1.3. Comportamiento de los precios

El mercado del carbón metalúrgico, térmico y coque ha experimentado una marcada volatilidad en la última década, influenciada por las dinámicas de oferta y demanda, transición energética y eventos macroeconómicos a nivel global. Los precios alcanzaron máximos históricos en el año 2022, con el carbón metalúrgico promediando USD 228,57, el carbón térmico USD 184,43 y el coque USD 407,99 por tonelada.

Este repunte se atribuye a las disrupciones en la oferta global, particularmente tras el conflicto Rusia-Ucrania, que redujo la disponibilidad de carbón ruso en los mercados internacionales, un factor relevante considerando que Rusia representa una porción significativa de las exportaciones globales (IEA, 2024). Además, la recuperación económica postpandemia impulsó la demanda de energía y productos como el acero, elevando los precios del carbón térmico y metalúrgico.

Desde 2023, los precios del carbón han mostrado una tendencia a la baja, reflejando una estabilización de las cadenas de suministro tras años de volatilidad, en gran medida la disminución en los precios se relaciona con el incremento de la oferta del energético, en los principales países consumidores y algunos exportadores como Australia e Indonesia, que de acuerdo con la IEA incrementaron su explotación en un 6 % (459 Mt) y 13 % (775 Mt), respectivamente, favorecidos por condiciones climáticas y una demanda internacional robusta (IEA, 2024).

Sin embargo, en 2024 la explotación australiana se mantuvo estancada en 458 Mt debido a interrupciones climáticas mientras que Indonesia experimentó un crecimiento más lento de aproximadamente 3,9 % con un volumen de 805 Mt, ante un mercado saturado de carbón de baja y media calidad (IEA, 2024), durante el año los precios promedio por tonelada alcanzaron USD 174,60 para el carbón metalúrgico, USD 96,88 para el carbón térmico y USD 276,35 para el coque, según datos del mercado. Además, la transición hacia energías renovables en economías desarrolladas ha reducido la demanda de carbón térmico, contribuyendo a la caída de precios (BP, 2025).

Aunque los precios del coque cayeron desde su máximo en 2022, la demanda de acero en economías emergentes y la limitada sustitución de carbón metalúrgico en hornos de arco eléctrico sostienen su valor relativo (WSA, 2024). Sin embargo, innovaciones como el hidrógeno verde podrían reducir esta dependencia a largo plazo, lo que podría representar un escenario a la baja para los precios en el futuro (IEA, 2024).

Las proyecciones en el largo plazo indican un mercado más predecible, pero sujeto a incertidumbres derivadas de políticas climáticas, arancelarias y de mercado, así como los avances tecnológicos que podrían redefinir la relevancia del carbón en el futuro.

1.4. Perspectivas globales del carbón

En un escenario de demanda creciente (2023-2024), impulsada por los requerimientos energéticos enfocados en la industria de los países de la región Asia Pacífico, en el cual la oferta del carbón de uso térmico crece a un mayor ritmo que el de la demanda. El panorama global del carbón enfrenta nuevos retos especialmente para los países explotadores distantes de los principales países consumidores, relacionados esencialmente con los costos logísticos para poner a disposición el recurso en el continente asiático, y los bajos precios del mercado por los incrementos en la oferta. Además, en el contexto de transición energética global algunas regiones en el mundo han disminuido su consumo de carbón, priorizando metas de descarbonización, como ha sido el caso de Europa.

Considerando que en 2024 se alcanzó un máximo histórico en la explotación del energético, para 2025, 2026 y 2027, se prevé una ligera disminución en la explotación global relacionada con inventarios abundantes y las dinámicas del mercado (IEA, 2024).

Por otro lado, en países como Indonesia, las políticas regulatorias, tales como el establecimiento de precios mínimos de referencia y el aumento de las regalías progresivas, podrían limitar la flexibilidad de su explotación orientada a la exportación, afectando el suministro por vía marítima del carbón térmico. Mientras que, Australia y Canadá buscan incrementar sus exportaciones de carbón metalúrgico, apoyados por proyectos de expansión y adquisiciones estratégicas, aunque enfrentan desafíos asociados a las metas de emisiones y capacidad logística.

El total de exportaciones de carbón en el mundo alcanzó un récord de 1.547 Mt en 2024, y enfrenta perspectivas de contracción a corto plazo, particularmente en el caso del carbón térmico. La IEA proyecta una reducción en los volúmenes de comercio para el periodo 2025-2027, impulsada por la caída de las importaciones en Europa y una menor demanda en el noreste asiático en países como: Japón y Corea del Sur (IEA, 2024).

El aumento de la explotación de carbón térmico en China creció un 7,7 % interanual en los primeros dos meses de 2025 (Wood Mackenzie, 2025), lo cual generó un exceso de oferta, desafiando la estabilidad del mercado global en el corto plazo.

Además, iniciativas como la política de biodiésel B40 en Indonesia buscan reducir la dependencia de combustibles fósiles en sectores industriales, lo que podría limitar el consumo interno de carbón a mediano plazo, obligando a los productores a depender aún más de los mercados de exportación en un entorno mucho más competitivo y regulado (Wood Mackenzie, 2025).

1.5. Usos no convencionales del carbón.

En el contexto de la transición energética, que promueve el desarrollo de fuentes renovables como la energía eólica, solar fotovoltaica y geotérmica, así como la reducción del carbón destinado a sus usos convencionales, resulta fundamental explorar alternativas de uso del carbón menos contaminantes.

Entre los usos tradicionales del carbón con mayor participación se encuentran la combustión en termoeléctricas, su empleo como reductor en la producción de acero mediante la ruta alto horno – horno de oxígeno básico (BF-BOF, por sus siglas en inglés Blast Furnace and Basic Oxygen Furnace), y la generación de calor en industrias como la del cemento. Estos procesos se caracterizan por generar altas emisiones de CO₂e, lo que hace imprescindible que se identifiquen y desarrollen aplicaciones más sostenibles, especialmente en países con recursos y reservas significativas de carbón, como es el caso de Colombia.

Además de los usos tradicionales, a nivel global existen iniciativas y programas gubernamentales y privados que promueven su incorporación en cadenas de producción no convencionales, en la siguiente tabla se relacionan algunos de ellos:

Tabla 1. Programas e iniciativas para promover usos no convencionales del carbón.

País	Iniciativa / programa	Descripción	Estado / alcance	Fuente
Estados Unidos	El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) tiene dos programas:	1. Uso del carbón y desechos en la elaboración de productos de alto valor como nanomateriales de carbono, carbones activados y grafito.	1. Diversos estados conforme a los avances de cada uno de los proyectos.	(DOE, 2022)
	1. Programa de procesamiento de minerales de carbono. 2. Programa de Hidrógeno.	2. Investigación orientada al desarrollo de las tecnologías necesarias para producir hidrógeno a partir de gas de síntesis generado por la gasificación del carbón.	2. Busca desarrollar tecnologías para producir hidrógeno a partir de gas de síntesis, y la posterior construcción y operación de una central eléctrica para producir hidrógeno, además de electricidad.	(DOE, 2025)
Australia	Proyecto piloto de la Cadena de Suministro de Energía con Hidrógeno (HESC, por sus siglas en inglés).	Proyecto piloto colaborativo de los gobiernos de Australia, Japón y socios industriales de los mismos países. Los principales logros fueron: 1) extracción de hidrógeno a partir de carbón y de biomasa, 2) licuefacción del gas de hidrógeno, 3) transporte y descarga exitosa en el puerto de destino. (Incluyó construcción de terminal de recepción y almacenamiento, al igual que la construcción de un buque cisterna para hidrógeno líquido).	Piloto finalizado en febrero de 2022.	(HESC, 2022)
China	Industria química tradicional e industria química moderna.	En el contexto chino la industria se divide en tradicional y moderna. La industria química tradicional de carbón incluye la producción de coque, amoníaco, carburo de calcio y policloruro de vinilo (PVC). Por otra parte, la industria química moderna, contempla los siguientes procesos de transformación: Carbón a gas (CTG, por sus siglas en inglés), Carbón a oleofinas (CTO, por sus siglas en inglés), Carbón a líquidos (CTL, por sus siglas en inglés), Carbón a etilenglicol (CtEG, por sus siglas en inglés), Carbón a aromáticos (CTA, por sus siglas en inglés).	Industria consolidada con plantas en operación y demostrativas. De acuerdo con la Asociación Nacional del Carbón de China (CNCA), se espera que en 2025 las capacidades de producción de CTL, CTG, CTO y CtEG por año alcancen, 12 Mt, 15.000 millones de metros cúbicos, 15 Mt y 8 Mt, respectivamente.	(Tu, 2024)

País	Iniciativa / programa	Descripción	Estado / alcance	Fuente
India	Misión de Gasificación del Carbón.	Política para promover gasificación de carbón y producir metanol, ácido acético y fertilizantes. En 2020 se lanzó la <i>Coal Gasification Mission</i>, cuyo objetivo es gasificar 100 millones de toneladas de carbón para 2030.	Algunos proyectos en marcha o planificados: - JV CIL-GAIL en Sonapur Bazari, Bengala Occidental: producción de gas natural sintético. Año esperado de operación 2029. - JV CIL-SAIL en la planta siderúrgica de Durgapur. El objetivo es generar gas de síntesis (Syngas, por sus siglas en inglés), para la tecnología de producción de hierro (DRI). - Proyecto de lignito a metanol de NLCIL: busca producir productos energéticos limpios a partir de lignito, incluyendo syngas, diésel e hidrógeno verde.	(Yadav & Shuhaib, 2024)

Fuente: elaboración propia a partir de la columna fuente.

Para comprender los usos no convencionales del carbón, es necesario precisar qué se entiende por “*no convencional*”, teniendo en cuenta que no existe una definición estandarizada sobre el tema, a continuación, se presentan algunos planteamientos que permiten proponer una aproximación al concepto.

Una primera aproximación se relaciona con los usos no combustibles del carbón. Según el IEA Clean Coal Centre (2014), este tipo de aplicaciones consiste en emplear el carbón como materia prima para fabricar materiales como plásticos y fibras, o como insumo en procesos químicos, en lugar de quemarlo para generar energía térmica (Nalbandian, Non-fuel uses of coal, 2014).

La IEA define el uso “*no combustión*” como aquel en el que los combustibles fósiles (carbón, gas natural y productos derivados del petróleo) no se queman para liberar energía, sino que se emplean directamente en la producción de materiales de construcción, materias primas químicas, lubricantes, entre otros. En algunos casos, este término se utiliza como sinónimo de “*uso no energético*” (IEA, 2025).

Además, (Song & Schobert, 1996) destacan que la producción de coque y alquitrán de hulla constituye un ejemplo tradicional de uso no energético del carbón.

De forma complementaria, es importante mencionar los procesos de transformación a los que puede someterse el carbón, pues su conocimiento permite comprender sus posibles aplicaciones y, en consecuencia, aproximarse al concepto de usos no convencionales del carbón. A continuación, se enuncian los procesos más representativos:

- **Combustión:** es un proceso químico en el que los elementos presentes en el carbón, principalmente carbono (C), hidrógeno (H) y azufre (S), reaccionan con el oxígeno. Esta reacción libera luz y calor, además de generar productos gaseosos como dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y vapor de agua (H₂O) (Yue, Junfu, & Yang, 2017). El proceso de combustión se desarrolla en tres etapas principales:

- Secado y desvolatilización: a medida que el carbón se calienta, la humedad y los compuestos volátiles presentes en él, se evaporan.
 - Oxidación: los compuestos volátiles liberados durante la etapa anterior reaccionan con el oxígeno, produciendo principalmente dióxido de carbono y vapor de agua, junto con una liberación considerable de energía térmica.
 - Combustión del carbón fijo (char): el material sólido restante, denominado char, se oxida progresivamente para formar dióxido de carbono, generando la mayor parte de la energía almacenada en el carbón (Charles Swann Coal Merchants, 2025).
- Pirolisis y carbonización: se define como la descomposición de moléculas mediante la aplicación de calor o energía térmica, produciendo principalmente gases y líquidos en lugar de sólidos, diferenciándose así de la carbonización, cuyo principal producto es sólido (Schobert, 2013).

En este contexto, la carbonización implica su calentamiento controlado hasta aproximadamente 1.100 °C en ausencia de oxígeno, con el objetivo de destilar compuestos volátiles como alquitranes y aceites ligeros. El coque obtenido constituye el producto principal, mientras que el gas de horno de coque, el amoníaco, el agua y los compuestos de azufre se generan como subproductos asociados al proceso. (Speight, 2013).

- Gasificación: es un proceso en el cual una materia prima carbonosa pasa por un gasificador, en el que, en presencia de vapor de agua y oxígeno, y bajo condiciones de alta temperatura y presión moderada, se transforma en gas de síntesis (syngas). Este gas consiste principalmente en una mezcla de hidrógeno (H₂) y, monóxido de carbono (CO) (NETL, 2006).
- Licuefacción: es un proceso mediante el cual el carbón se transforma en un líquido que posteriormente puede ser refinado para eliminar impurezas, como nitrógeno y azufre, y convertirse en combustible. Normalmente se emplea carbón bituminoso, y en ocasiones se utiliza antracita (Nowak, Dilo, & Srivastava, 2004). Existen dos clasificaciones principales de la licuefacción del carbón: directa e indirecta.
- En la licuefacción directa, el carbón pulverizado se mezcla con un solvente y se calienta bajo presión en una atmósfera de hidrógeno, generalmente en presencia de un catalizador. Posteriormente, se separan las cenizas y el carbón residual, y los líquidos obtenidos se refinan para producir combustibles y otros productos terminados (NETL, s.f.).
 - La licuefacción indirecta se realiza en dos etapas. Primero, el carbón se gasifica para generar gas de síntesis (*syngas*) y posteriormente, los componentes principales del *syngas* (monóxido de carbono e hidrógeno), se convierten en hidrocarburos, como gasolina, diésel, metanol y otros productos (NETL, s.f.).

Cabe destacar que la hidrogenación forma parte integral de la licuefacción directa del carbón, siendo clave para convertir la materia carbonosa en productos líquidos de alto valor.

- Activación: proceso utilizado para producir carbón activado, que consiste en la activación del sólido carbonoso. Durante la activación se amplía la superficie específica del material, ya sea mediante la apertura de poros inaccesibles, la creación de nuevos poros y/o el ensanchamiento

de los existentes. De esta manera se aumenta la capacidad de absorción del carbón (Gaurav, y otros, 2022).

- Extracción: proceso que incluye un conjunto de operaciones fisicoquímicas diseñadas para separar las fracciones solubles de la materia orgánica humificada, ácidos húmicos y fúlvicos, de una matriz sólida, como suelo, turba, lignito o residuos orgánicos. Inicialmente, la materia orgánica se disuelve en una solución alcalina, seguida de un fraccionamiento por acidificación y posterior purificación para obtener los ácidos húmicos y fúlvicos (Rani, Kumari , & Biswajit, 2024) (Yang, y otros, 2024).
- Grafitización: consiste en la conversión del carbono amorfo en carbono grafitico, que requiere una reorganización drástica de los enlaces químicos para formar una estructura en capas compuesta por anillos condensados de carbono. La grafitización demanda alto consumo energético, y normalmente se realiza calentando coque de petróleo hasta 3000 °C para producir grafito sintético. El uso de catalizadores metálicos permite realizar el proceso a temperaturas más bajas, sin embargo, la eliminación de los residuos metálicos es difícil de realizar (Marin & Marchesan, 2022).

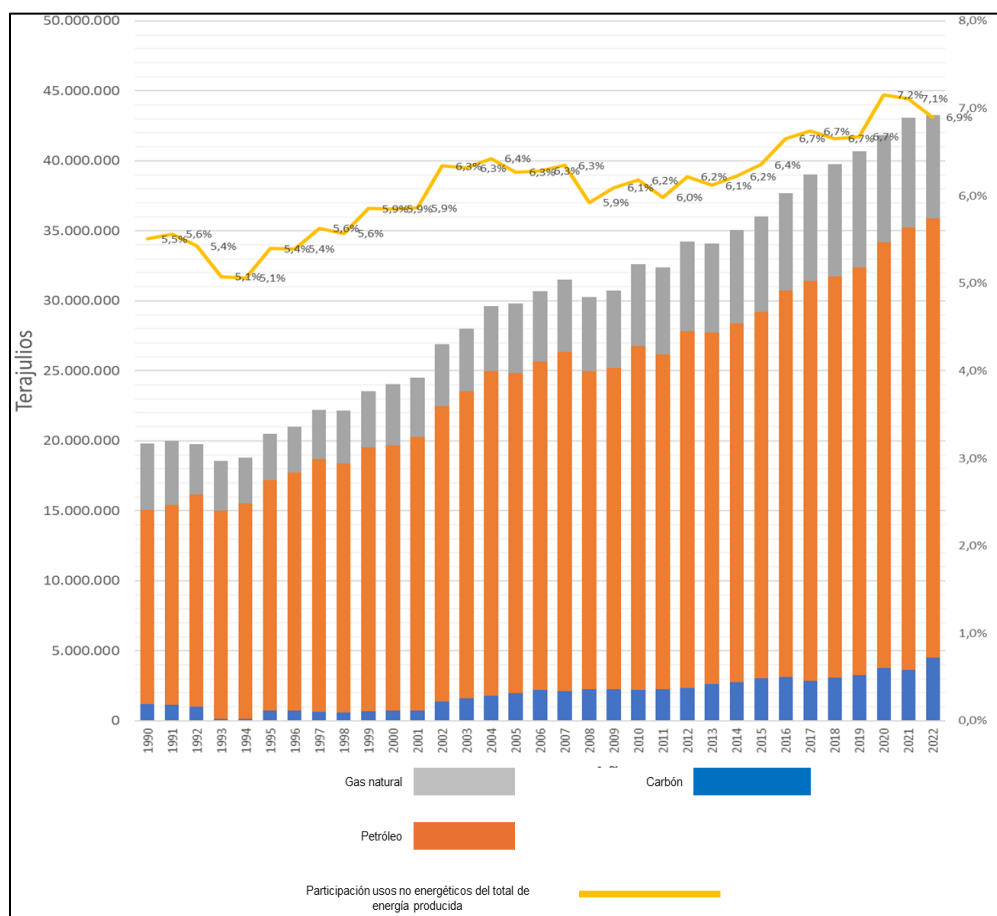
1.5.1. Usos no energéticos de los combustibles fósiles

Según el *Institute for Global Sustainability* de la Universidad de Boston, los recursos fósiles han estado históricamente ligados a la generación de energía. Su uso más común incluye la producción de combustibles derivados del petróleo en el sector transporte, la producción de calor mediante gas natural y la generación eléctrica en plantas termoeléctricas alimentadas con carbón. En todos estos casos, la energía se obtiene a partir de la combustión directa de dichas materias primas.

Sin embargo, existen otras rutas de aprovechamiento no energético, en las que los recursos fósiles se transforman en productos químicos o materiales sin requerir combustión. En el caso del carbón, por ejemplo, la coquización permite la obtención de coque, empleado en la producción de acero, mientras que la licuefacción posibilita la generación de compuestos como amoníaco o metanol.

En términos globales, la participación de estos usos no energéticos del gas natural, petróleo y carbón, ha mostrado un crecimiento leve pero sostenido, representando entre un 5 % y un 7 % del total de la energía asociada a estos recursos entre 1990 y 2022. En particular, para el carbón, la proporción destinada a usos no energéticos se ha mantenido en el rango de 1,2 % a 2,5 % durante el mismo período.

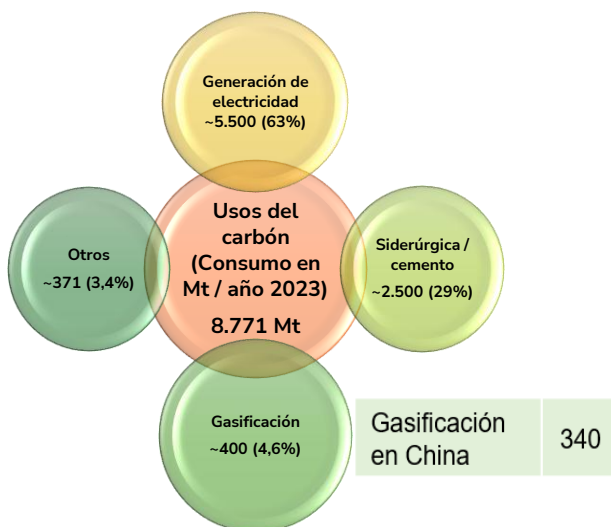
Gráfico 19. Uso no energético de combustibles fósiles en el mundo.



Fuente: Editado y traducido a partir de (UN, 2025).

De manera complementaria al concepto de usos del carbón, los registros recientes sobre el consumo mundial de este recurso muestran que, para el año 2023, la mayor proporción se destinó a la generación eléctrica (63 %), seguida por la industria siderúrgica y cementera (29 %), mientras que la gasificación representó alrededor del 4,6 % y, a otros usos un 3,4 % del total (Reid, 2025), cabe destacar que China concentró aproximadamente el 85 % de la actividad mundial de gasificación durante ese mismo año (Coca, 2025).

Gráfico 20. Usos del carbón 2023.



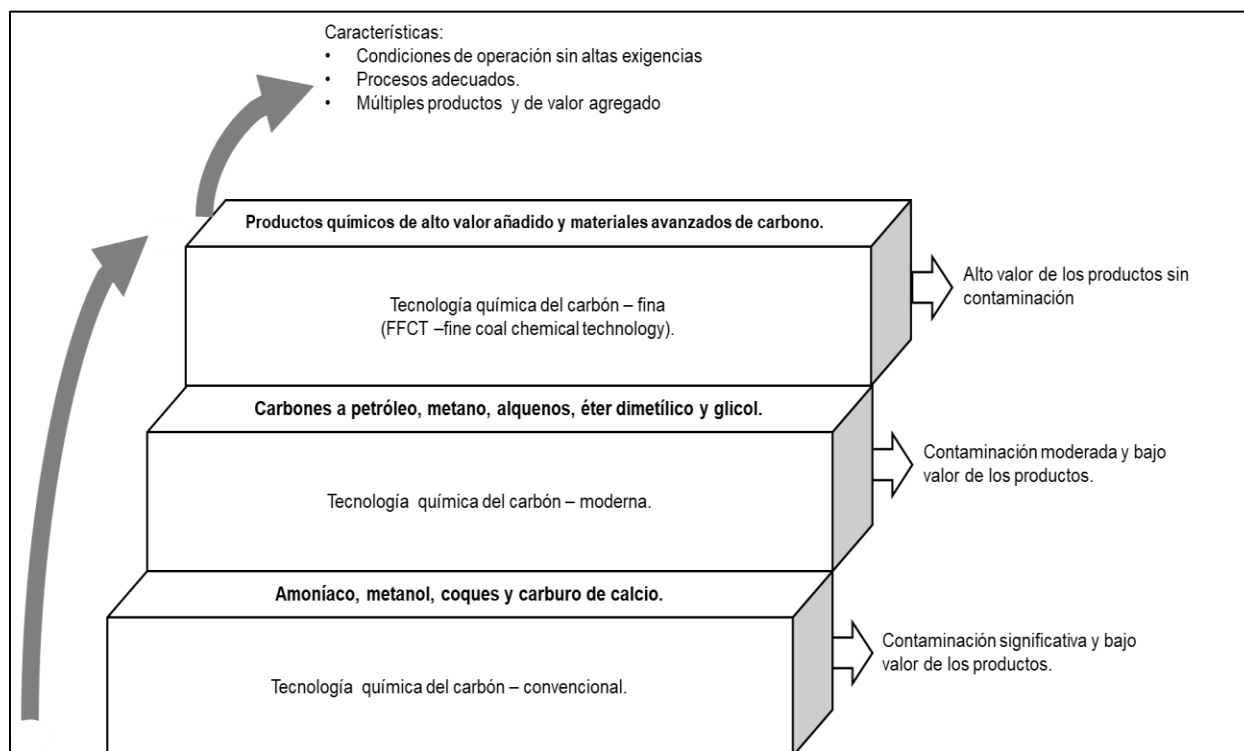
Fuente: elaboración propia a partir de (Reid, 2025), (Coca, 2025), (IEA, 2024).

A partir del análisis de los principales procesos de transformación del carbón, de los conceptos asociados a sus usos no energéticos y de la distribución global de su consumo en 2023, es posible proponer un primer acercamiento al concepto de usos no convencionales del carbón, así: las aplicaciones en las que el recurso no se somete a procesos de combustión ni carbonización.

Para 2023, dichos usos se estiman en torno al 8 % del carbón consumido en el mundo, aunque si se excluye la gasificación realizada en China, la proporción descendería aproximadamente al 3,6 %, considerando tanto los “otros usos” como una fracción menor de gasificación desarrollada en otros países.

Así mismo, diversos estudios destacan que el avance hacia usos no energéticos y ambientalmente más sostenibles del carbón requiere un conocimiento detallado de su estructura molecular. Desde esta perspectiva, la química molecular del carbón (MCC, por sus siglas inglés) constituye una herramienta fundamental para comprender la composición orgánica del recurso y desarrollar tecnologías asociadas a lo que se denomina química fina del carbón (FCCT, por sus siglas en inglés), orientadas a su industrialización (Wei, Zong, Fan, & Li, 2015).

Gráfico 21. Perspectiva científica sobre la utilización del carbón.



Fuente: adaptado y traducido a partir de (Wei, Zong, Fan, & Li, 2015).

A medida que el mercado mundial del carbón se orienta hacia modelos más sostenibles y diversificados, los usos no convencionales adquieren relevancia como estrategias para aprovechar de manera más integral este recurso. Los avances en ciencia y tecnología han impulsado nuevas aplicaciones en la industria carboquímica, la síntesis de nanomateriales y la valorización de subproductos, configurando así segmentos de mercado emergentes con menor huella ambiental y mayor valor agregado.

1.5.2. Principales usos no convencionales

El carbón como recurso abundante y en muchos casos más económico que otras materias primas sustitutas, puede transformarse industrialmente, a través de los procesos previamente descritos para generar productos tanto convencionales como no convencionales, algunos de ellos se relacionan en la siguiente tabla:

Tabla 2. Usos convencionales y no convencionales del carbón.

Combustión	Plantas termoeléctricas a partir de carbón			
	Producción de cemento			
Carbonización	Coquización (Carbón de uso metalúrgico)	Coque	Producción de acero (BF-BOF)	
		Alquitrán de hulla	Brea de hulla	Fibras de carbono
		Gas	Combustible	Electrodos de carbono
	Activación física o química	Carbón activado	Purificación	
	Grafitización	Producción de nanomateriales como el grafeno	Electrónica, biomedicina, textiles y filtración de contaminantes.	
Gasificación	Gas de síntesis - Syngas (CO+H ₂)	Hidrógeno	Combustible / electricidad	
		Amoniaco	Urea	Fertilizantes
		Metanol	Combustible	
		Productos químicos aromáticos		
		Gasolina de alto octanaje	Combustible	
		Productos químicos parafínicos		
		Aceite diésel de alto número de cetano	Combustible	
		Combustibles sintéticos sin nitrógeno ni azufre	Combustible	
		Carbono		
Licuefacción	Pirolisis	Gases, aceite (alquitrán de hulla, aceite ligero, aceite de naftaleno) y carbono	Combustible	
	Hidrogenación	Hidrocarburo líquido	Combustible	
Extracción alcalina y precipitación	Productos o sustancias húmicas (SH)	Mejoramiento de la calidad del suelo		
Lixiviación ácida o extracción por solventes (Residuos y materia orgánica)	Tierras raras	Imanes motores eléctricos, pantallas dispositivos electrónicos, baterías		
Calentamiento instantáneo Joule (Residuos y materia orgánica)	Tierras raras			
Usos convencionales	Usos no convencionales			

Fuente: elaboración propia a partir de (Andrews, 2021), (Nalbandian, 2014).

En cuanto a las tendencias, se observa un creciente interés en el aprovechamiento del carbón como materia prima para obtener productos de alto valor agregado, entre ellos fibras de carbono, aditivos carbonosos para cemento, materiales para baterías y electrodos, nanocompuestos, plásticos especiales y materiales para impresión 3D (NETL, 2021).

En el contexto de la transición energética, es importante subrayar que la industria siderúrgica primaria continuará demandando coque como agente reductor hasta que se logre una adopción generalizada de tecnologías con menor huella ambiental. En consecuencia, la coquización del carbón seguirá siendo una actividad relevante y generará diversos coproductos de interés industrial, entre los cuales destacan:

- Gas de horno de coquización (COG, por sus siglas en inglés): los principales componentes son el hidrógeno, el metano y el monóxido de carbono. A partir del gas de la coquización, se pueden obtener productos como el amoníaco, empleado en la elaboración de fertilizantes, metanol y gases combustibles (Nalbandian, Non-fuel uses of coal, 2014).
- Alquitrán de hulla: permite obtener benceno, utilizado en la producción de plásticos, y naftaleno, empleado en la fabricación de resinas (Ibid.).
- Brea de hulla: usado como aglutinante en la fabricación de electrodos de grafito, además de ser materia prima en impermeabilizantes y la producción de fibras de carbono (Ibid.).

Teniendo en cuenta la información previa, se han identificado como usos promisorios no convencionales del carbón, los siguientes productos: carbón activado, fibras de carbono, hidrógeno, sustancias húmicas, tierras raras y grafeno. En el numeral 3.2., utilizando una metodología de priorización, se seleccionan tres de ellos para realizar el análisis de las respectivas cadenas productivas.



2. EL CARBÓN

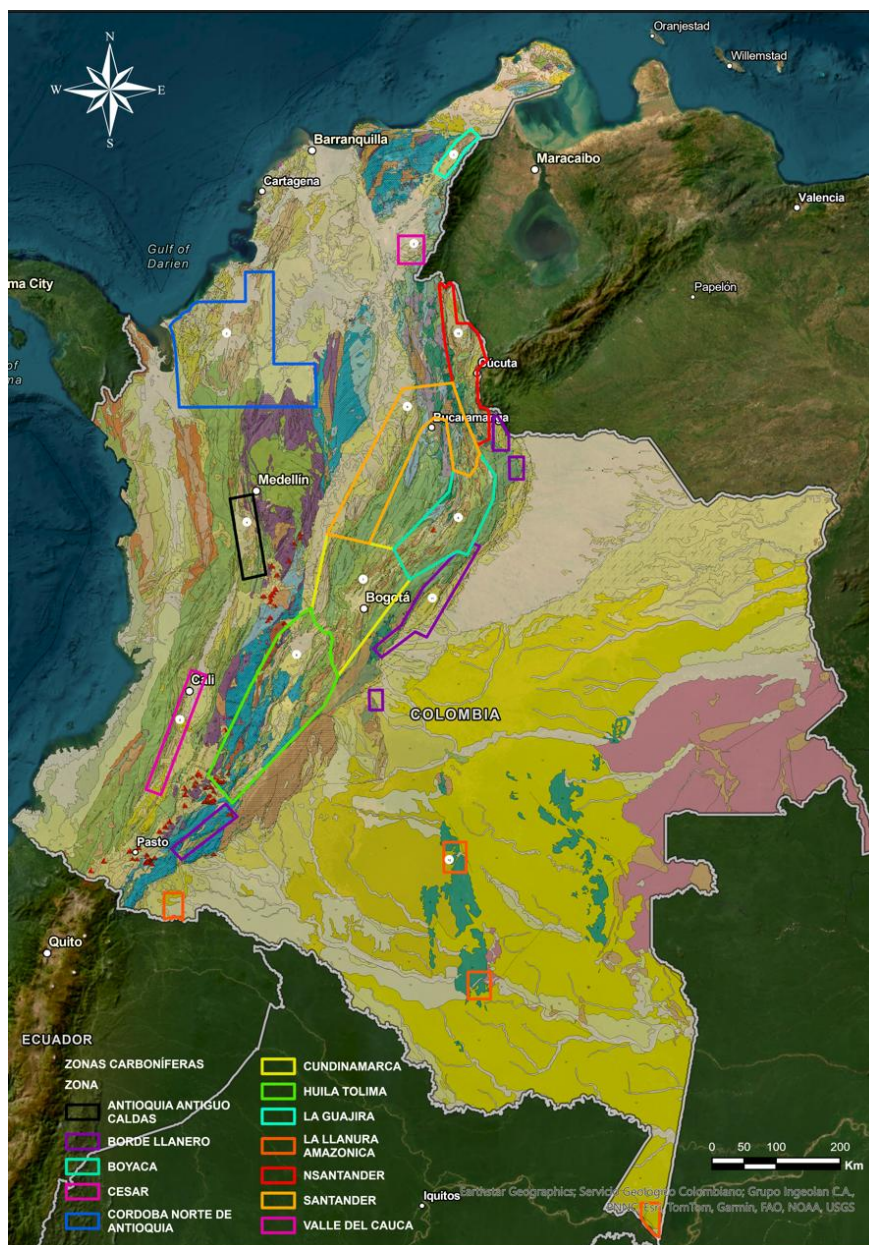
EN COLOMBIA

2 EL CARBÓN EN COLOMBIA

La existencia de carbón en Colombia se relaciona con su historia geológica, gracias a factores determinantes en las condiciones de depositación (ambientes geológicos) y transformación de la materia orgánica, aspectos que optimizaron el albergue de depósitos considerables de este recurso en el territorio nacional. Producto de estos elementos, además de las variaciones de presión y temperatura en el tiempo, el país cuenta con un espectro de carbones de rangos bajos, desde turba y lignito, hasta antracita y meta antracita, de acuerdo con las variaciones en las propiedades fisicoquímicas.

En el Mapa de Potencial Carbonífero (SGC, 2016) se mencionan las “zonas carboníferas”, las cuales corresponden a extensiones de tamaño departamental con características geológicas específicas. Dentro de las zonas carboníferas, al limitar su extensión, se especifican áreas, las cuales abarcan uno o dos municipios y, los bloques que corresponden a la escala más pequeña de delimitación, en los que las características de los mantos de carbón son comunes. (Mejía, 2014). Actualmente, se encuentran definidas 12 zonas carboníferas, cada una de las cuales responde a condiciones geológicas particulares que definen el depósito y calidad de los carbones.

Gráfico 22. Zonas carboníferas de Colombia.



Fuente: elaboración propia a partir de (SGC, Portal datos abiertos, 2025)

2.1. Geología de los yacimientos carboníferos.

Las doce zonas carboníferas son la evidencia de la presencia de carbón en el territorio nacional a lo largo del tiempo geológico, desde el período Carbonífero (Río Lebrija-Santander) hasta el Mioceno-Plioceno (Amazonía); el carbón se manifiesta en diferentes dimensiones, desde láminas, capas muy delgadas hasta en mantos de gran espesor, siendo de mayor interés para su explotación económica los correspondientes al Cretáceo tardío-Paleógeno.

La calidad de los yacimientos carboníferos colombianos constituye un pilar fundamental para su aprovechamiento en sectores energéticos, industriales y tecnológicos. Encontrando desde carbones de rango subbituminoso para uso térmico o para procesos de gasificación y licuefacción, carbones bituminosos para uso térmico y coquización, hasta los de mayor rango que corresponden a los antracíticos, empleados para usos industriales. (Mejía, 2014).

Determinar el origen del carbón permite establecer tres parámetros geológicos que definen las propiedades fisicoquímicas del carbón y, por ende, el uso final del recurso.

- El *rango del carbón* indica el grado de metamorfismo (o carbonización) al que ha estado sometida la turba durante su historia de enterramiento, a lo largo de su evolución geológica en la serie natural de lignito a antracita.
- El *tipo* de carbón refleja la naturaleza de los restos vegetales (componentes vegetales- macerales) de los que se formó el carbón y el grado de degradación al que estuvieron expuestos antes de su enterramiento.
- El *grado* de un carbón representa la proporción de materia mineral durante la acumulación de la turba posterior al enterramiento y el avance del metamorfismo.

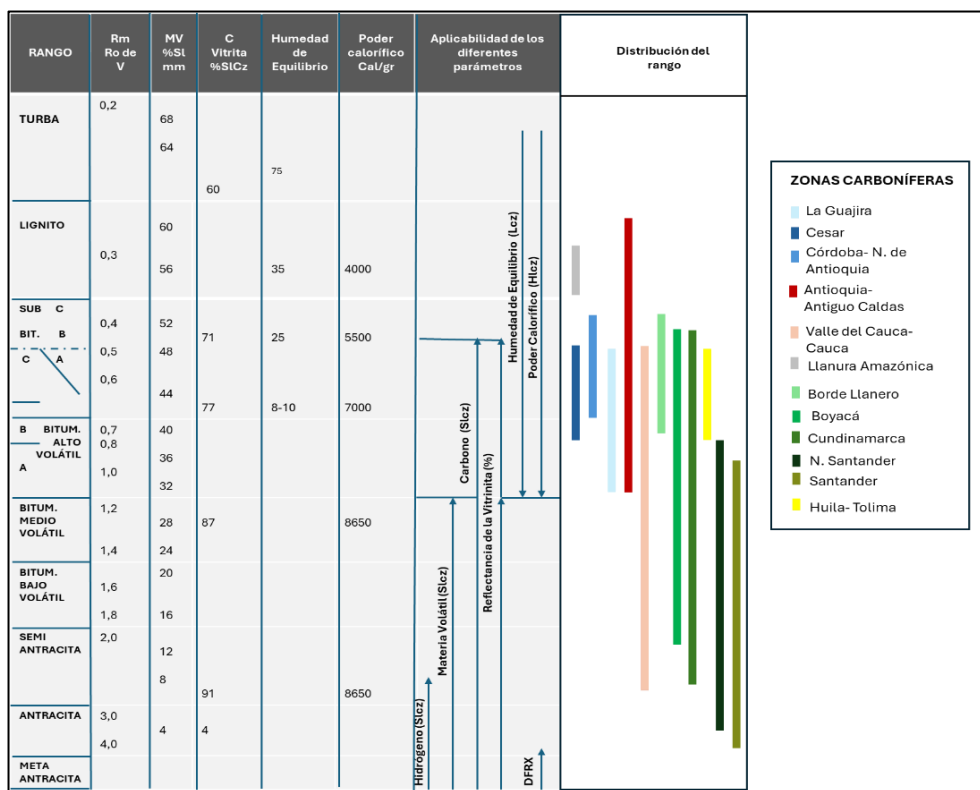
Acorde con lo anterior, un carbón de alto grado es aquel que cuenta con una baja proporción general de materia mineral y, por consiguiente, un alto contenido de materia orgánica, independientemente de su rango o tipo (Ward & Suárez-Ruiz, 2008).

Los diferentes análisis fisicoquímicos y petrográficos son esenciales para caracterizar adecuadamente los carbones, acorde con los diferentes usos y sus correspondientes procesos de transformación (Ecocarbón, 1995):

- El *análisis próximo* consiste en determinar la humedad, materia volátil, carbono fijo (por diferencia) y la ceniza.
- El *análisis elemental - último* se realiza para obtener el valor de las cenizas, carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno (por diferencia) y azufre para calcular los requerimientos de aire para la combustión del carbón.
- El *análisis de fusibilidad* de cenizas se efectúa bajo ciertos estados de fusión y fluidez.
- El *análisis químico* de cenizas determina la capacidad de las cenizas para la formación de escoria.
- El *análisis petrográfico* cuantifica macro y microscópicamente los constituyentes del carbón para determinar su composición, rango y usos.
- Los análisis para determinar propiedades plásticas de los carbones, tales como *Índice de Hinchamiento* - indicador de las propiedades de aglutinamiento del carbón; el *Índice Roga* método que mide el poder de aglutinación de un carbón; el *ensayo Gray-King* parámetro que mide la magnitud y textura del residuo producido; la *plastometría* medida de la fluidez de un carbón en condiciones normalizadas; la *dilatometría* técnica para medir la contracción y expansión del carbón en condiciones normalizadas.
- Los Análisis de propiedades físicas tales como la *densidad*, la *friabilidad*, la *porosidad*, el *área superficial* y el *Índice de triturabilidad*.

A partir de los análisis realizados se clasifica el carbón por rango de acuerdo con el estándar ASTM D-388-77², considerando el porcentaje de carbono fijo, calculado en base seca libre de materia mineral; el poder calorífico cal/gr, calculado en base húmeda libre de materia mineral y el carácter aglomerante, determinando la clase desde lignito hasta antracita, siendo este último el de mayor rango. Esta clasificación está directamente relacionada con la reflectancia de la vitrinita ya que es un indicador de la madurez térmica del carbón. La distribución por rango de los carbones en las doce zonas carboníferas se ilustra en el siguiente gráfico.

Gráfico 23. Clasificación por rango de los carbones en las doce zonas carboníferas de Colombia



Fuente: elaboración propia a partir de (SGC, 2012).

En la clasificación por tipo de carbón, se requiere determinar la composición del carbón, el grado de degradación al que estuvo expuesta la materia orgánica antes de su enterramiento y la definición del ambiente sedimentario, a partir de las facies del carbón.

Las facies del carbón son el resultado de los análisis macro y microscópicos del carbón: litotipos, macerales, microlitotipos, índices de macerales y geoquímica orgánica, como una función del tipo de flora que formó la turba, permitiendo caracterizar las propiedades texturales, estructurales y composicionales del carbón (Guatame & Rincón, 2021). De esta manera se describen las condiciones físicas, químicas y biológicas que existían en los diferentes períodos geológicos, los procesos de sedimentación, subsidencia/descenso del área, accidentes geográficos y geomorfológicos, que definen los *sistemas*

² Standard Specification for Classification Of Coals By Rank. Fuente: (ASTM, s.f.)

deposicionales sedimentarios propicios para la acumulación de la materia orgánica, los cuales son indicadores de la geometría y continuidad de los yacimientos carboníferos. (Dai, y otros, 2020).

En Colombia se han definido sistemas deposicionales de llanura aluvial continental, transicional de plano de delta, deposicional marino marginal y, lacustres a partir de estudios integrados de *estratigrafía, sedimentología, facies sedimentarias de las rocas asociadas, la paleogeografía, paleoclima, geoquímica, mineralogía, palinología y petrología (análisis maceral y microlitotipos)*, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 3. Sistemas deposicionales sedimentarios de las zonas carboníferas de Colombia.

Zona carbonífera	Fm. Productora	Edad	Sistema Depositional Sedimentario	Ambiente deposicional
La Guajira	Formación Cerrejón	Paleoceno	Sistema deposicional transicional de plano de delta.	Plataforma somera mixta a ambientes submareales de grano fino (lagunas), atravesados por canales submareales hasta la superficie (Montes, y otros, 2005).
Cesar	Formación Los Cuervos	Paleoceno- Eoceno temprano	Sistema deposicional transicional de plano de delta.	Sistema deltaico (UIS, 2007).
Córdoba- Norte de Antioquia	Formación Floresanto-Pujil	Oligoceno- Mioceno	Sistema deposicional transicional de plano de delta	Ambiente de depósito marino somero con profundidades batiales superiores a neríticas e indicativas de un depósito en zonas de plataforma altamente subsidentes (Hernández, Zapata, Salazar, & Garzón, 2009).
	Formación - Ciénaga de oro- Cerrito	Oligoceno- Mioceno	Sistema deposicional transicional deltaico	Paleoambientes de frente deltaico y prodelta, que varían a llanura costera. (Mendoza-Rodríguez, Buatois, Rincón-Martínez, & Mángano, 2025) (Vargas, Pardo, Gallego, Restrepo, & Muñoz, 2022) (Rodríguez, Zapata, & Bermúdez, 2013).
	Formación Tarazá- (Gr. Sincelejo)	Oligoceno	Sistema deposicional de llanura aluvial continental	Ambientes de baja a media energía, tales como llanuras aluviales, ciénagas y canales con energía moderada (Rodríguez, Zapata, & Bermúdez, 2013).
Antioquia- Antiguo Caldas	Formación Amagá	Oligoceno Superior- Mioceno Inferior	Sistema deposicional transicional deltaico	Continental con incursiones marinas - condiciones estuarinas o de delta inferior, cercanos a la línea de Costa. (Blandón, Contribución de la materia orgánica sedimentaria a la determinación del paleoambiente y del potencial de generación de hidrocarburos en los carbones de la Formación Amagá (Colombia), 2007).
Valle del Cauca- Cauca	Formación Guachinte, Ferreira y Mosquera	Eoceno- Oligoceno	Sistema deposicional transicional	Mbo Los Chorros (Fm. Guachinte) marismas, pantanos y charcas someras. Mbo. La Rampla. Amb. continental de llanuras de inundación y pantanos. Fm. Ferreira- marismas y pantanos. Fm. Mosquera- ríos trezados y meandriformes divagando sobre llanuras de inundación, pantanos y de manera marginal, marismas (Geostudios, 2008).
Huila- Tolima	Formación Caballos	Aptiano- Albiano	Sistema deposicional transicional de plano de delta	Ambientes transicionales a marinos someros. (Velandia, 2001) Subambientes de la zona litoral, asociados a un sistema deltaico progradante. (Flórez & Carrillo, 1994).
Cundinamarca	Formación Guaduas	Maastrichtiano sup-Paleoceno.	Sistema deposicional transicional de plano de delta	Ambientes transgresivos parálcos, telmáticos a limnotelmáticos, detrás de barrera (Guatame & Sarmiento, 2004).
	Formación Seca	Maastrichtiano- Paleoceno	Sistema deposicional transicional de plano de delta	Ambiente de tipo parálco o costero; la ocurrencia de mantos de carbón se produce en un ambiente de pantano que oscila entre facies de bosque húmedo y ciénaga de juncos. (Olaya, León, Reyes, & Snotos, 2024).
Boyacá	Formación Guaduas	Maastrichtiano sup-Paleoceno	Sistema deposicional transicional de plano de delta	Ambientes transgresivos parálcos, telmáticos a limnotelmáticos, detrás de barrera (Guatame & Sarmiento, 2004).

Zona carbonífera	Fm. Productora	Edad	Sistema Depositional Sedimentario	Ambiente deposicional
Santander	Formación Umir	Maastrichtiano	Sistema deposicional transicional de plano de delta	Pantanos con leves ingresiones marinas, secuencias de borde de pantano y depósitos de la interface de los sistemas pantano y fluvial. (Montaño, y otros, 2016).
	Formación Mito Juan	Maastrichtiano tardío	Sistema deposicional transicional de plano de delta	Nerítico a sublitoral. En la parte superior se encuentran los carbones es un ambiente deltaico (Fúquen, 2011).
N. Santander	Formación Catatumbo	Maastrichtiano superior	Sistema deposicional transicional de plano de delta	Pantanos salobres. (Núñez & Saavedra, 2006)
	Formación Los Cuervos	Paleoceno medio, inferior-Eoceno inferior	Sistema deposicional transicional de plano de delta	Ambientes deltaicos y corrientes fluviales, particularmente llanuras de inundación. (Paredes, Romero, De Bedout, & Bernal, 2019)
Borde Llanero	Formación Une	Albiano-Cenomaniano	Sistema deposicional transicional de plano de delta	Deltaico con influencia marina (Pinto, y otros, 2010).
	Formación Chipaque	Cenomaniano superior-Santoniano	Sistema deposicional transicional de plano de delta	Sistema estuarino. Lagoon parcialmente cerrado controlado por olas y corrientes costeras. (Guatame & Rincón, Coal petrology analysis and implications in depositional environments from upper Cretaceous to Miocene: a study case in the Eastern Cordillera of Colombia, 2021).
	Grupo Palmichal	Maastrichtiano – Paleoceno superior	Sistema deposicional transicional de plano de delta	Sistema estuarino. Lagoon abierto, mareas y olas activas. (Guatame & Rincón, Coal petrology analysis and implications in depositional environments from upper Cretaceous to Miocene: a study case in the Eastern Cordillera of Colombia, 2021).
	Formación Arcillas del Limbo	Paleoceno medio-tardío	Sistema deposicional transicional de plano de delta	Estuarino y plano costero. Dominio de mareas y ríos, incremento de influencia fluvial. (Guatame & Rincón, Coal petrology analysis and implications in depositional environments from upper Cretaceous to Miocene: a study case in the Eastern Cordillera of Colombia, 2021).
	Formación Los Cuervos	Paleoceno	Sistema deposicional marino marginal.	Estuarino (Jiménez, González, Mantilla, Rangel, & Rubiano, 2008).
	Formación San Fernando	Oligoceno-Mioceno	Sistema deposicional deltaico con influencia marina.	Lacustre. Como parte de un sistema deltaico con influencia marina (Guatame & Rincón, Coal petrology analysis and implications in depositional environments from upper Cretaceous to Miocene: a study case in the Eastern Cordillera of Colombia, 2021).
	Formación Margua (Eq. Fm. Guayabo)	Oligoceno-Mioceno inferior	Sistema deposicional continental lacustre	Sistema fluvio-lacustre distal. Carbón asociado a depósitos lacustres y pantanosos (Bayona, y otros, 2008).
	Formación Pepino	Eoceno	Sistema deposicional continental	(SGC, 2012).

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes incluidas en la columna Ambiente deposicional.

2.2. Potencial carbonífero: recursos y reservas.

El potencial carbonífero de Colombia se fundamenta en la cuantificación de sus recursos y reservas, los cuales reflejan tanto la riqueza geológica del país como su capacidad para sostener la explotación de carbón en el mediano y largo plazo.

En los reportes ECRR presentados por los titulares mineros a la ANM en agosto de 2025, relacionados con 88 títulos mineros de carbón coquizable y 111 de carbón térmico, se cuantifican reservas probadas y probables de carbón por 1.020,55 Mt, de las cuales el 83,80 % son aptas para uso térmico y el 16,20 %

para uso metalúrgico. Adicionalmente, se reportan recursos medidos, indicados e inferidos por 5.608,40 Mt, de las cuales el 86,27 % se consideran aptas para uso térmico y 13,73 % para uso metalúrgico.

Gráfico 24. Recursos y reservas de carbón en Colombia.



Fuente: elaboración propia a partir de datos sobre recursos y reservas reportados a la ANM en agosto de 2025.

En los reportes se evidencian recursos carboníferos disponibles en nueve de las doce zonas carboníferas. De manera general, las zonas carboníferas del Cesar, Córdoba-N. Antioquia y La Guajira son las que cuentan con el mayor potencial de carbón, zonas en las que históricamente se ha realizado su explotación y beneficio, principalmente en proyectos a cielo abierto, para uso térmico, mientras que en las zonas de Boyacá, Cundinamarca y N. Santander se cuenta con el recurso, tanto para uso térmico como metalúrgico.

Tabla 4. Potencial de carbón por zona carbonífera en Colombia.

	RECURSOS Y RESERVAS		
	Carbón uso Térmico (Mt)	Carbón uso Metalúrgico (Mt)	Potencial carbonífero (Mt)
La Guajira	802	-	802
Cesar	2.704	-	2.704
Córdoba_ N. Antioquia	1.366	-	1.366
Antioquia- Antiguo Caldas	15	-	15
Valle del Cauca- Cauca	12	-	12
Boyacá	166	368	534
Cundinamarca	112	272	384
N. Santander	274	193	467
Santander	243	102	345

Fuente: Reporte R&R, ANM 08-2025 (88 títulos mineros de carbón coquizable y 111 títulos mineros de carbón térmico).

2.3. Mercado del carbón

Los volúmenes de carbón reportados asociados a pagos de regalías en Colombia durante el 2024, a corte 31 de octubre de 2025, alcanzaron las 59,8 Mt, lo que representó una disminución del 13,7 % en comparación con las 69,3 Mt registradas en el 2023. Aproximadamente el 85 % la explotación nacional se obtiene en operaciones a cielo abierto en los departamentos del Cesar, La Guajira y Córdoba, con carbón térmico destinado principalmente para exportación. El 15 % restante se extrae de manera subterránea en los departamentos de Antioquia, Cauca y Valle del Cauca con carbón térmico, y en Cundinamarca, Boyacá, Santander y Norte de Santander, donde se explota carbón térmico y metalúrgico de alta calidad. Este último se destina tanto para el abastecimiento del mercado interno para la producción de coque, como para exportación.

Gráfico 25. Departamentos con explotación de carbón en Colombia.



Fuente: Reportes R&R, ANM 05-2025 (88 títulos mineros de carbón coquizable y 111 títulos mineros de carbón térmico).

2.3.1. Oferta nacional de carbón

El carbón en Colombia ha sido en los últimos años uno de los principales productos del sector minero colombiano, representando en el 2024 el 52,6 % del PIB minero, el 56,6 % de las exportaciones mineras y

el 14,3 % de las exportaciones colombianas, según datos del DANE, además, representó el 79,0 % de las regalías mineras recaudadas durante la vigencia, acorde con información de ANM al 2025, el 79,7 % de la explotación del carbón explotado en América Latina, con lo cual se ubicó como el sexto exportador mundial de carbón (BP, 2025), manteniendo su relevancia en el mercado internacional.

Parte de este desempeño se relaciona con las propiedades fisicoquímicas del carbón colombiano, caracterizado por su bajo contenido de cenizas, azufre y un alto poder calorífico, que en yacimientos como los ubicados en Molagavita en el departamento de Santander alcanzan hasta 14.161 BTU/lb (SGC, 2012). Estas cualidades lo hacen competitivo en mercados globales exigentes.

En Colombia, la actividad minera del carbón se desarrolla bajo un marco de 1.003 títulos mineros vigentes con corte al 31 de octubre de 2025, que abarcan un área total de 508.901 hectáreas, equivalente al 0,4 % del territorio nacional, de estos títulos, el 80 % incluye carbón metalúrgico. La distribución por escala de operación muestra una marcada predominancia de pequeña minería, que representa el 72,8 % de los títulos, seguida por mediana minería con un 25,1 % y gran minería con un 2,1 %.

Paralelamente, se encuentran vigentes 607 solicitudes de títulos mineros, que cubren 379.732 hectáreas, correspondientes al 0,3 % del territorio nacional, de las cuales, el 54,1 % corresponde a pequeña minería, el 43,3 % a mediana minería y el 2,6 % a gran minería. En proporción, cerca del 98 % de los títulos mineros y solicitudes vigentes corresponden a pequeña y mediana minería, lo cual evidencia la importancia de esta actividad en las regiones en donde se realiza la extracción del recurso.

La oferta nacional, está representada mayoritariamente por carbón térmico, de tal forma que en el 2024 representó cerca del 89 % del volumen explotado en el país, seguido en un 10 % por carbón metalúrgico y con menos del 1 % por antracitas, a partir de esta oferta, en el país se realiza la producción de coque, diversificando su participación en el comercio internacional de carbón.

2.3.2. Exportación de carbón

Durante el 2023 las cantidades exportadas de carbón colombiano presentaron una leve disminución del 1,1 % representado en 666.164 toneladas, mientras que en el 2024 la cantidad exportada se incrementó un 7,2 %. Según datos reportados por la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales - DIAN y el DANE, las exportaciones de carbón colombiano alcanzaron un valor FOB de USD 9.163,3 millones en 2023 con 60,3 millones de toneladas, por su parte, en 2024 las cantidades exportadas alcanzaron 64,6 millones de toneladas; sin embargo, el valor exportado disminuyó un 25,3 %, totalizando USD 7.106,6 millones. Este incremento en la cantidad exportada se atribuye al comportamiento de la demanda internacional del energético, en un escenario de oferta creciente principalmente por parte de productores asiáticos, que al cierre de 2024 superó la demanda, lo cual se reflejó en la disminución de los precios a nivel internacional, situación que se mantiene al tercer trimestre de 2025, con repercusión en la explotación de carbón en Colombia.

Acorde con la estructura de la oferta de carbón en Colombia, las exportaciones en 2024 se conformaron en un 91,2 % por carbón térmico, seguido con un 6,1 % por coque, un 2,7 % por carbón metalúrgico y por antracitas y otros con un 0,05 % (DIAN, 2025). Estos datos resaltan la importancia del carbón térmico para Colombia, alineándose con tendencias de la demanda global, mientras que el coque consolida a Colombia como el cuarto proveedor para la industria siderúrgica internacional, con más del 10 % (TradeMap, 2025).

Tabla 5. Exportaciones de carbón y coque colombiano, 2024.

Categoría	Millones de toneladas (Mt)
Térmico	58,91
Metalúrgico	1,72
Antracita y otros	0,01
Coque	3,96

Fuente: elaboración propia a partir de datos publicados por la DIAN (2025).

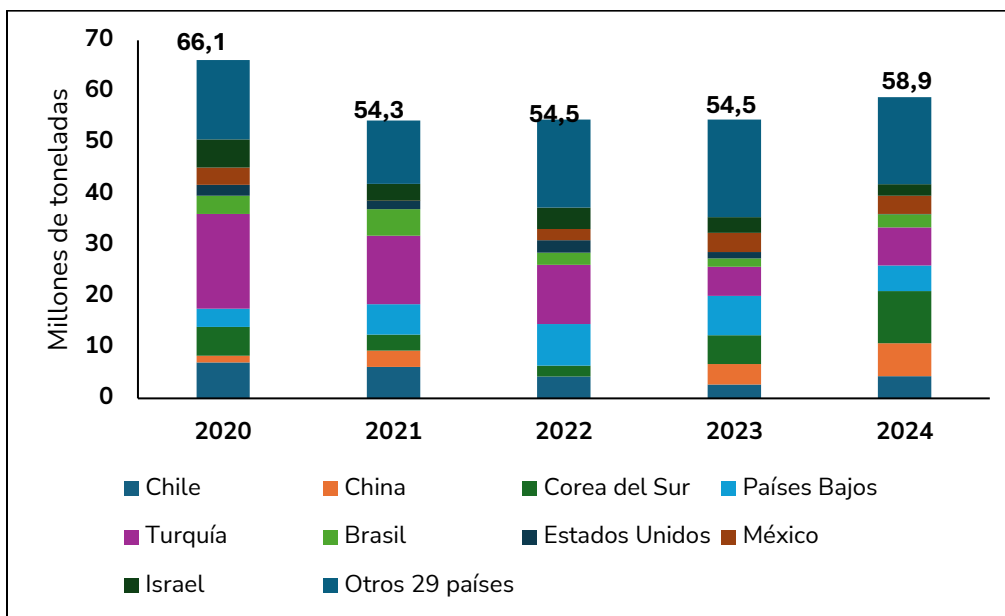
En este escenario, Colombia puede aprovechar su capacidad exportadora para posicionarse en mercados en desarrollo, al tiempo que podría acceder a nichos de mayor valor agregado en la industria química y tecnológica, como la producción de carbón activado, hidrógeno o materiales avanzados, alineándose con las tendencias de sostenibilidad, las dinámicas del mercado y las variables geopolíticas. Estas últimas, añaden otra capa de complejidad derivada de grandes consumidores, como China y Estados Unidos, y el auge de políticas proteccionistas.

2.3.2.1. Exportaciones de carbón de uso térmico 2020-2024

Durante el período 2020-2024, las exportaciones de carbón térmico colombiano presentaron un comportamiento dinámico, influenciado por fluctuaciones en la demanda global, principalmente relacionadas con temas de transición energética, y cambios en la oferta, fundamentalmente en el mercado asiático. Para el año 2020, Turquía se destacó como el principal destino con 18,5 Mt, seguida por países como Chile, Corea del Sur e Israel, mientras que mercados como China y Estados Unidos mantenían una participación menor al 3,5 %.

Sin embargo, entre 2021 y 2023, se observó una tendencia decreciente en algunos destinos tradicionales como Turquía, que redujo sus compras a 7,7 Mt en 2023, y Chile, que contrajo sus compras a 2,7 Mt en el mismo año. Esta disminución coincidió con un aumento en los destinos de las exportaciones de carbón térmico colombiano, como es el caso de Países Bajos, que alcanzó un pico de 8,1 Mt en 2022, y países del mercado asiático como China, que pasó de no registrar compras en 2022 a demandar 6,4 Mt del energético colombiano en 2024.

Gráfico 26. Exportaciones de carbón térmico (Mt) en Colombia.2020- 2024.



Fuente: DIAN-DANE, 2025.

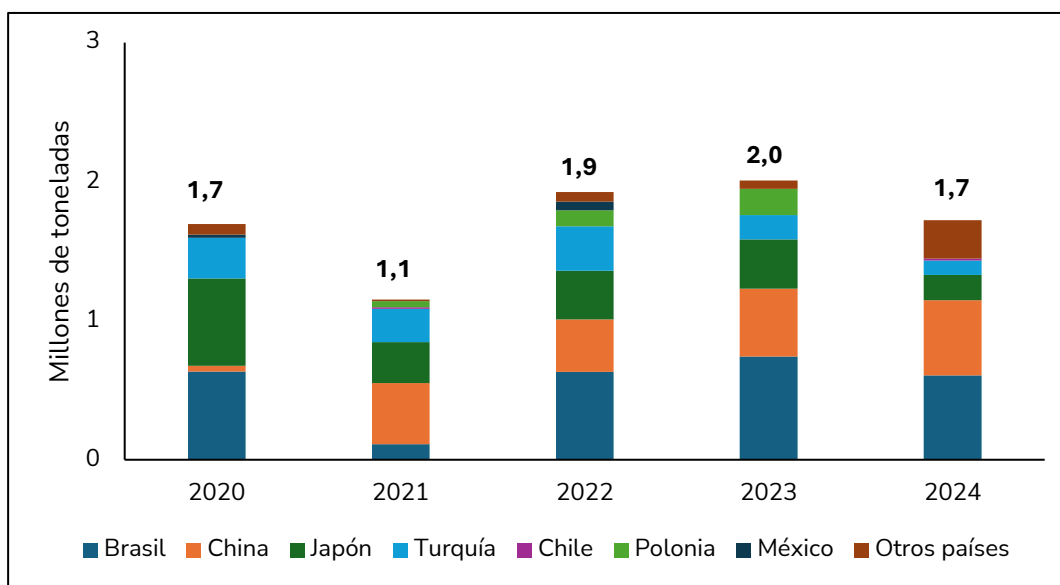
En 2024, la tendencia se revirtió, reflejando un renovado interés por el carbón térmico colombiano, especialmente en Asia y América. Durante la vigencia Corea del Sur incrementó su participación con 10,2 Mt, por su parte China también aumentó significativamente sus importaciones del energético. En el continente americano, Chile recuperó su participación, al pasar de 2,7 Mt en 2023 a 4,4 Mt en 2024, en contraste con la reducción presentada por parte del mercado europeo, como es el caso de Países Bajos, cuya participación disminuyó al 8,5 %, atribuida a las políticas de transición energética.

Aunque Israel mantuvo una participación promedio del 6,27 % entre 2020 y 2024, su demanda de carbón térmico colombiano disminuyó al 3,84 % en 2024, debido a restricciones normativas en Colombia. Este comportamiento evidencia una reconfiguración de la oferta exportadora colombiana, en respuesta a las dinámicas globales, lo cual le ha permitido mantener su relevancia en el mercado internacional.

2.3.2.2. Exportaciones de carbón de uso metalúrgico 2020-2024

La oferta exportadora de carbón metalúrgico colombiano, aunque menor en volumen frente al carbón térmico, durante el período 2020-2024 registró un promedio cercano a las 1,7 Mt, consolidándose como un componente relevante en las exportaciones mineras del país. En 2024, de una explotación cercana a las 6,3 Mt, solo el 27 % con 1,7 Mt se destinó a los mercados internacionales, mientras que el restante 73 % se orientó al consumo interno, principalmente para la fabricación de coque. A lo largo de este período, las exportaciones han experimentado fluctuaciones, con un enfoque creciente hacia el mercado asiático, que en 2024 concentró el 62,1 % del total exportado.

Gráfico 27. Exportaciones de carbón de uso metalúrgico (Mt) desde Colombia.2020-2024.



Fuente: DIAN-DANE, 2025.

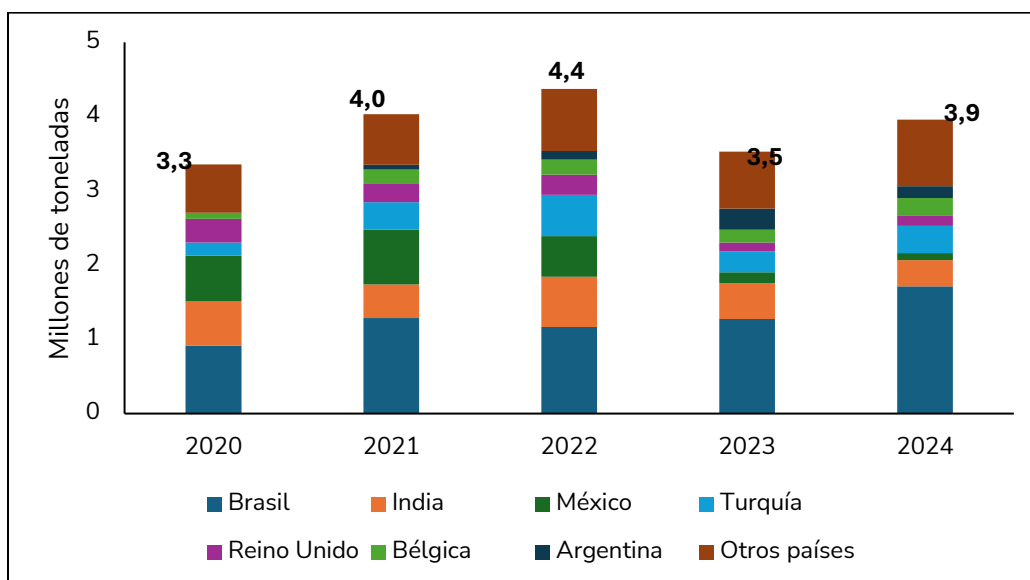
Países como China y Japón han sido destinos clave, con incrementos notables en sus compras, mientras que Brasil, como líder en el mercado regional, mantuvo una demanda sostenida en las exportaciones del 2024, representando el 36,1 % junto con Chile y Ecuador. El comportamiento anual refleja una adaptación de la oferta colombiana para abastecer los requerimientos de sus principales socios comerciales. En 2020, Brasil y Japón se destacaron como los mayores importadores de carbón de uso metalúrgico colombiano. Sin embargo, a partir de 2021, China incrementó progresivamente su participación, consolidándose en 2024 como el segundo destino del energético colombiano, mientras que Brasil se mantuvo como el principal destino.

2.3.2.3. Exportación de coque 2020-2024

Entre los destinos de las exportaciones de coque colombiano durante el período 2020- 2024, el continente americano se consolida como el principal, con un crecimiento sostenido en la participación de Brasil, mientras que México muestra una disminución progresiva en su demanda tras un máximo alcanzado en 2021. En paralelo, Europa mantuvo una presencia estable con Reino Unido, y Asia, liderada por India experimentó fluctuaciones que culminaron en una contracción en 2024.

En 2024, Colombia se posicionó como el cuarto exportador mundial de coque, superada solo por Polonia, China e Indonesia, este último consolidándose como el mayor exportador global. Entre 2020 y 2024, las exportaciones colombianas de coque se concentraron principalmente en Brasil, con el 33,0 % del total, seguido por India (13,3 %), México (11,2 %), Turquía (9,1 %) y Reino Unido (5,7 %).

Gráfico 28. Exportaciones de coque (Mt) desde Colombia. 2020- 2024.



Fuente: DIAN-DANE, 2025.

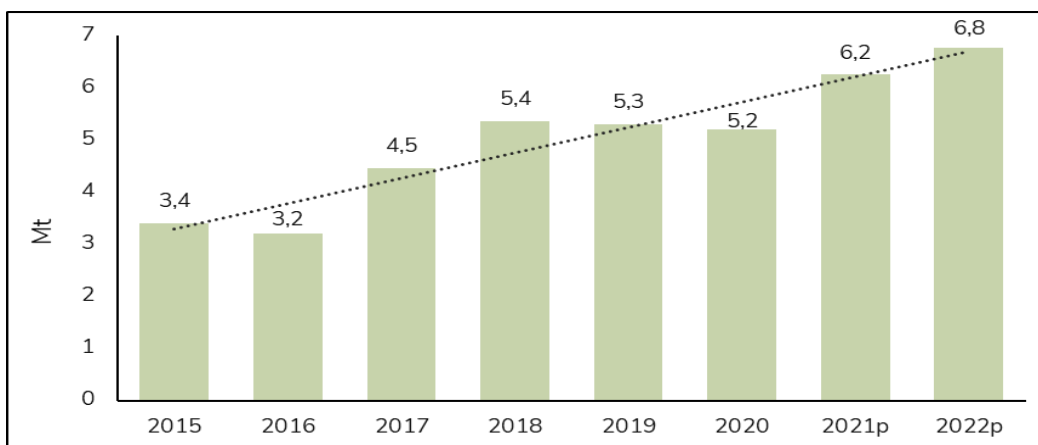
En 2024 las exportaciones al mercado americano representaron el 51,1 % del total, impulsado por una mayor integración con economías clave de la región. Por su parte, el mercado europeo mostró una recuperación moderada alcanzando el 22,7 % de participación, sustentada en la demanda de países como Bélgica, Noruega y Reino Unido. En contraste, el mercado asiático se redujo al 20,7 %, reflejando una reorientación estratégica hacia destinos de mayor proximidad geográfica.

2.3.3. Demanda nacional de carbón.

La demanda nacional de carbón en Colombia se refleja en la información disponible en la Cuenta Satélite de Minería del DANE, la cual cuenta con datos sobre carbón térmico y metalúrgico para el período 2015-2022. Estas cifras cuentan con datos provisionales sobre consumo intermedio para los años 2021 y 2022.

El consumo intermedio de carbón metalúrgico muestra una tendencia creciente, partiendo de 3,4 Mt en 2015, hasta alcanzar 5,4 Mt en 2018. A pesar de una ligera disminución en 2019 y 2020, se observa una recuperación y un crecimiento significativo en los años siguientes, llegando a 6,8 Mt en 2022. Esta evolución subraya la relevancia del carbón metalúrgico en la producción de acero y coque en el país.

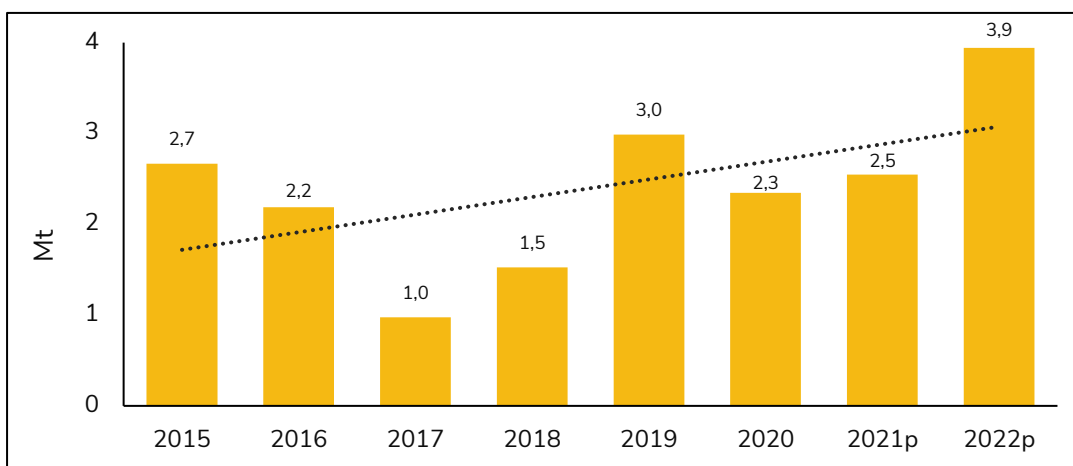
Gráfico 29. Consumo de carbón de uso metalúrgico (Mt) en Colombia. 2015- 2022. p: provisional.



Fuente: elaboración propia a partir de cuenta satélite de minería - DANE, con corte al 30 de diciembre 2024.

Por su parte, el consumo intermedio de carbón para uso térmico mostró una trayectoria más volátil durante el mismo período, con 2,67 Mt en 2015, se redujo a 0,97 Mt en 2017, con recuperación en 2019 al alcanzar 2,99 Mt. En 2021 los datos indican un consumo de 2,55 Mt, con un repunte para el año 2022 con 3,94 Mt, reflejando las variaciones en la demanda del energético.

Gráfico 30. Consumo de carbón de uso térmico (Mt) en Colombia. 2015- 2022. p: provisional.



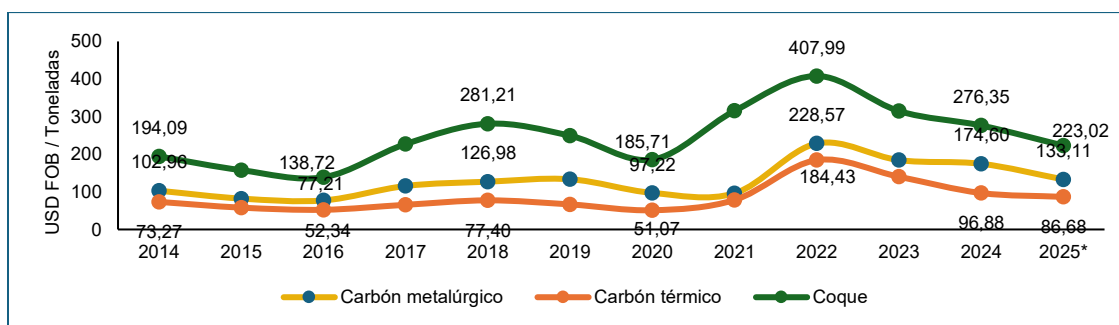
Fuente: elaboración propia a partir de cuenta satélite de minería - DANE, con corte al 30 de diciembre 2024.

Más allá del uso directo del carbón como fuente energética o en procesos metalúrgicos, el carbón es un insumo fundamental para la producción de diversos derivados industriales con una participación creciente en el comercio exterior global. Estos usos incluyen productos como el amoníaco, carbón activado, hidrógeno y urea, cada uno con sus propias dinámicas de mercado.

2.3.4. Comportamiento de los precios

Los precios del carbón y coque colombiano han respondido a las dinámicas del mercado internacional a través de los años, es así que en el 2022 se alcanzó el precio histórico más alto, asociado a circunstancias derivadas de situaciones geopolíticas que han tenido repercusión en el mercado global; en el 2025 se observa una tendencia decreciente en los precios, que en el caso del carbón térmico se acerca a los niveles de precios proyectados en el gráfico 25.

Gráfico 31. Precio promedio anual del carbón y coque colombiano (USD FOB/Tonelada).

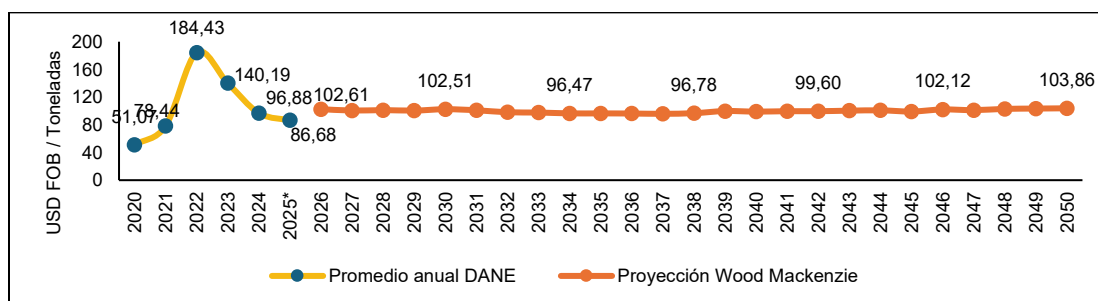


Fuente: elaboración propia a partir de datos DANE para subpartidas arancelarias de carbón térmico, metálico y Coque.
*Precios promedio de exportación a septiembre de 2025.

En cuanto a las proyecciones de los precios del carbón térmico colombiano, se observa una tendencia hacia la estabilidad a largo plazo, con valores promedio estimados entre USD 96,48 y USD 103,86 la tonelada hasta el año 2050.

Esta proyección refleja un equilibrio entre la disminución de la demanda en regiones comprometidas con la descarbonización, como Europa, y la persistencia de la demanda en Asia, donde el carbón térmico aún desempeña un rol clave en la generación eléctrica (Wood Mackenzie, 2024).

Gráfico 32. Proyección de precios FOB del carbón térmico colombiano (USD FOB / Tonelada).



Fuente: elaboración propia a partir de datos DANE y Wood Mackenzie.

En general, los precios del carbón térmico, metálico y productos como el coque han respondido a una combinación de factores como lo son ajustes en la oferta y cambios estructurales en la demanda global.

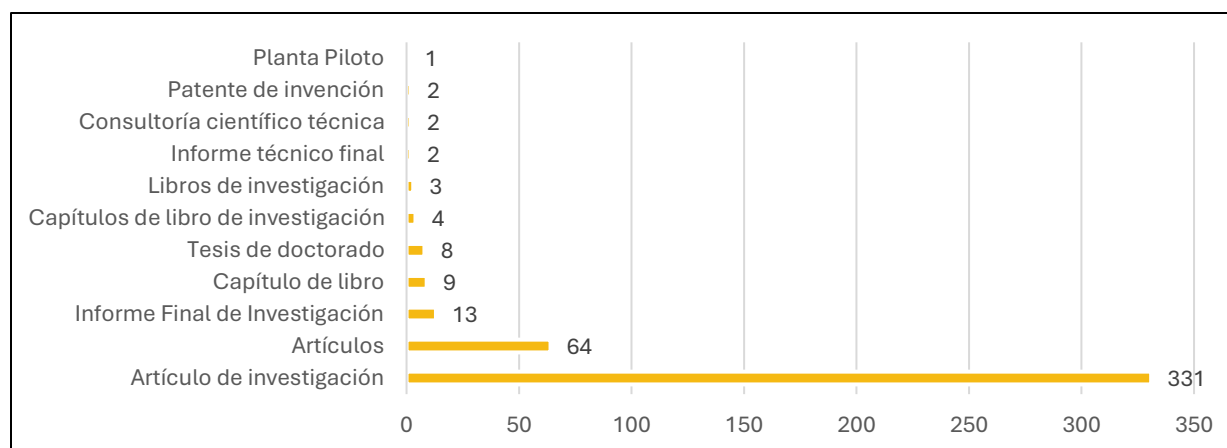
2.4. Investigaciones e iniciativas relacionadas con usos no convencionales del carbón

A continuación, se identifican la producción científica relacionada con las actividades de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i), asociada a las tecnologías requeridas para la obtención de carbón activado, fibras de carbono, hidrógeno, sustancias húmicas, tierras raras y grafeno, a partir del carbón o de los coproductos generados en los procesos de transformación a los que puede ser sometido.

Con base en la información registrada en la base de datos “*Producción Grupos Investigación*”, disponible en el Portal de Datos Abiertos del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MinCencias), y siguiendo la metodología de selección descrita en el [anexo 1](#), se realizó una búsqueda sistemática de procesos y productos asociados a los usos no convencionales del carbón.

Los resultados de aplicar la metodología antes enunciada evidencian que la producción científica se concentra principalmente en artículos de investigación (75 %), seguidos por artículos de divulgación (15 %) e informes finales de investigación (3 %), los cuales representan el 93 % del total, el restante 7 % incluye, entre otros, tesis de doctorado y libros de investigación.

Gráfico 33. Tipologías de producción de investigación.



Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de “*Producción Grupos Investigación*” (MINCIENCIAS, 2025).

En la información recopilada se identificó que no todos los procesos y productos analizados utilizan el carbón como materia prima, y en algunos casos, las fuentes consultadas no especifican claramente la materia prima empleada. A continuación, se presenta una descripción general de los resultados de las búsquedas realizadas en la base de datos de producción científica y tecnológica mencionada anteriormente.

Las tablas que cuantifican los estudios por temática y la relación de los estudios más relevantes para los propósitos de este documento se pueden consultar en el [anexo 2](#).



3.

USOS NO CONVENCIONALES DEL CARBÓN

3. USOS NO CONVENCIONALES DEL CARBÓN

Para establecer los usos no convencionales del carbón con mayor potencial para ser desarrollados en el país, se empleó una metodología que considera tres criterios orientados a identificar aquellos usos en los que Colombia podría avanzar, se consideró: el nivel de madurez tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés), balanza comercial e impactos ambientales de las cadenas productivas relacionadas.

3.1. Metodología para priorizar los usos no convencionales del carbón en Colombia

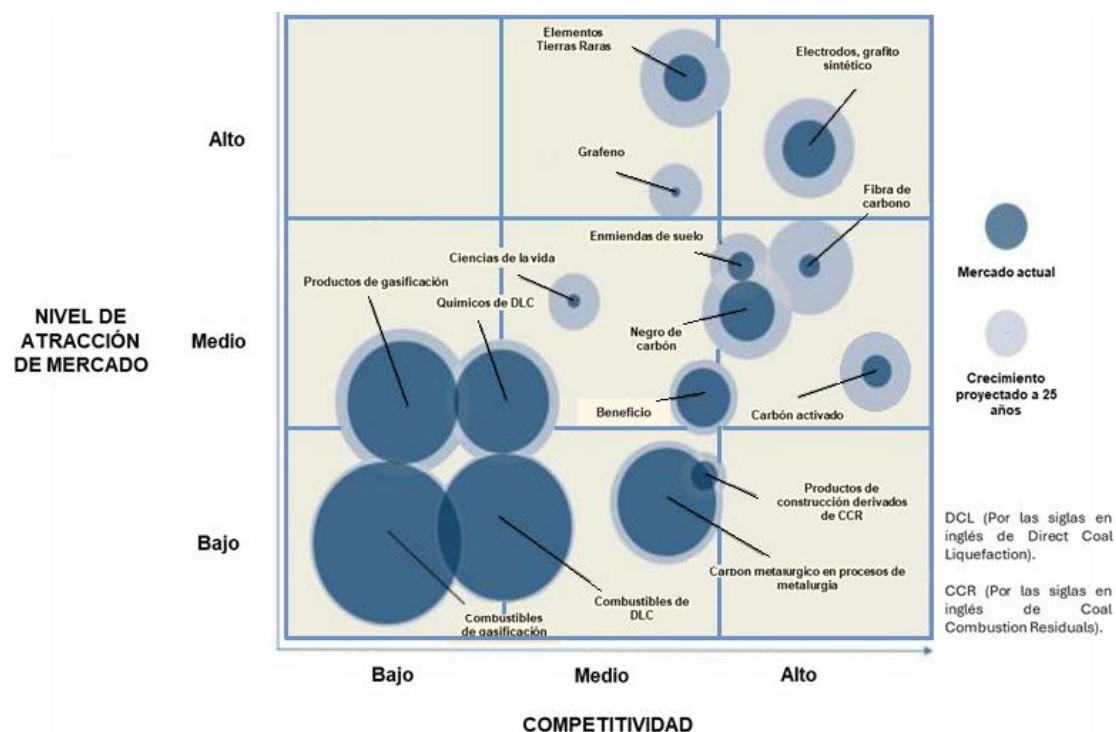
Como se ha mencionado, el alcance de este documento incluye el análisis de las cadenas productivas relacionadas con los tres productos con mayor potencial para ser desarrollados en Colombia. Por lo anterior, fue necesario definir un conjunto de criterios para su priorización.

Como referencia de criterios utilizados, se tiene el caso del estudio realizado en la región de Macedonia Occidental – Grecia (Pavloudakis, Karlopoulos, & Pagouni, 2023) respecto al uso no energético del carbón, en el cual se plantea como criterios: 1) grado de madurez tecnológica, 2) adecuación del lignito en términos de características de calidad y tamaños críticos de extracción, 3) elegibilidad de la inversión, 4) capitalización de la infraestructura y del conocimiento técnico, 5) impacto positivo en el empleo y 6) grado de circularidad.

De forma complementaria, existe información del National Coal Council (NCC, por sus siglas en inglés), que desarrolló la metodología de uso nacional, para identificar oportunidades del carbón en mercados de usos no convencionales, teniendo en cuenta las fortalezas competitivas de la industria de los Estados Unidos. La metodología se materializa gráficamente en una matriz que incluye en el eje X la competitividad de la industria estadounidense y en el eje Y el nivel de atracción del mercado. Para cada uno de ellos se establecen tres niveles (bajo, medio, alto) generando nueve cuadrantes (NCA, 2019).

En la categoría de nivel de atracción del mercado se consideran el tamaño del mercado, los atributos del mercado y la tasa de crecimiento; y en la categoría de competitividad: participación relativa en el mercado, capacidad para competir en términos de precio y calidad, y debilidades y fortalezas competitivas. Es de precisar que los resultados del análisis en cuestión están dirigidos únicamente al carbón estadounidense.

Gráfico 34. Carbón a productos considerando la tecnología-Mercado en Estados Unidos.



Fuente: editado y traducido de (NCA, 2019).

El análisis que se hace por parte de la *National Coal Council* de las oportunidades que tiene el carbón de los Estados Unidos en usos diferentes a la combustión incluyendo lo siguiente:

- Un segmento del mercado no convencional del carbón conformado por productos de gran escala productiva, respaldados por tecnologías consolidadas y que demandan altas inversiones de capital. En este grupo, además del carbón, existen materias primas sustitutas con mayor competitividad en costos, lo que reduce su atractivo económico; algunos de los productos incluidos en este grupo están asociados a los procesos como la gasificación y la licuefacción del carbón.
- Un segundo segmento se distingue por volúmenes de producción intermedios, el uso de tecnologías maduras y requerimientos de inversión de capital moderados, aunque con oportunidades comerciales relevantes. En este grupo se incluyen productos como el coque, el carbón activado, el carbono paracristalino- carbon black (producto de combustión incompleta), y aquellos empleados como insumos para materiales de construcción.
- Por último, el segmento con mayor atractivo de mercado y competitividad corresponde a la producción especializada de materiales de alto valor y desempeño. Entre estos destacan los elementos de tierras raras, la fibra de carbono, el grafito y las enmiendas de suelo.

Teniendo en cuenta las referencias mencionadas, se resalta que, para realizar un ejercicio preliminar para priorizar productos asociados a usos no convencionales del carbón con mayor potencial en Colombia, considerando los aspectos ambientales y el potencial real de desarrollo en Colombia, es indispensable seleccionar criterios para los cuales exista información, preferiblemente cuantitativa.

A partir de la evaluación de los criterios utilizados en las metodologías anteriormente enunciadas y considerando la disponibilidad de información para el caso colombiano, se definieron como criterios esenciales los siguientes:

- Nivel de madurez tecnológica (TRL) a nivel mundial y en Colombia.
- Impacto ambiental, en términos de emisiones de CO₂e.
- Comercio exterior de Colombia, como indicador de mercado.

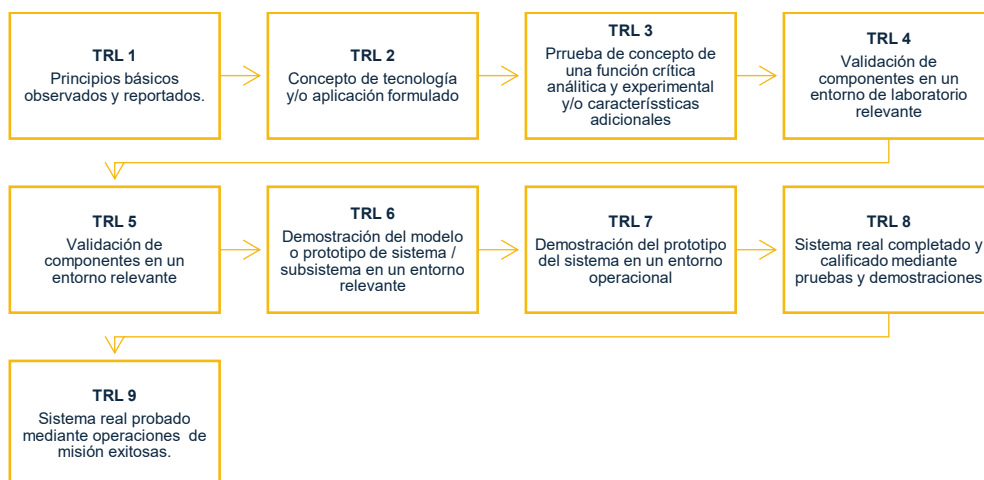
En cuanto a la metodología desarrollada por el *National Coal Council* es significativamente más robusta y proporciona información que permite focalizar los esfuerzos en el desarrollo de cadenas productivas que consideren las dimensiones de mercado y competitividad del país. La metodología podría ser utilizada como referente como parte de una posible iniciativa para la construcción de una hoja de ruta para el desarrollo de cadenas productivas de usos no convencionales del carbón.

A continuación, se explican los criterios utilizados en la metodología de priorización de los productos no convencionales elaborados a partir el carbón para Colombia:

3.1.1. Nivel de Madurez de una Tecnología

El Nivel de Madurez de una Tecnología (TRL, por sus siglas en inglés), es un concepto desarrollado por la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA, por sus siglas en inglés) en 1970, y permite identificar en qué nivel de madurez está un proyecto de desarrollo de tecnología; que puede estar ubicado en algún estado entre la investigación básica, el desarrollo y la incorporación en procesos productivos en entornos reales. Esta métrica está asociada al nivel de incertidumbre que existe y de las inversiones requeridas para llevar una tecnología hasta su incorporación exitosa en operaciones comerciales. (Office of Systems Engineering and Architecture, 2025).

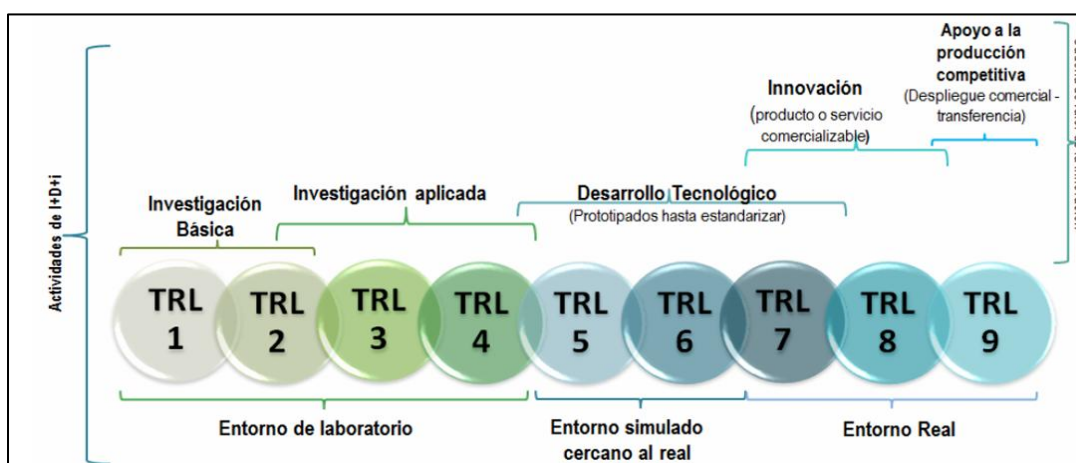
Gráfico 35. Nivel de madurez tecnológica.



Fuente: Traducido y editado a partir de (NASA, s.f.).

El Nivel de Madurez de una Tecnología ha sido adaptada para otros usos distintos al sector minero y puntualmente al caso del carbón, es así, como en el caso del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia - MinCiencias, es usada en los términos de referencia para establecer el grado de madurez en los que está la tecnología asociada a los proyectos que esperan participar en las convocatorias para ser objeto de financiación, en el marco de las actividades de investigación, desarrollo tecnológico e innovación I+D+i. En este sentido, se utiliza un esquema de relacionamiento entre los niveles de TRL y las etapas del proceso de I+D+i, como se observa en el siguiente gráfico:

Gráfico 36. Relación entre los TRL y las etapas del I + d + i



Fuente: Tomado del anexo 1 Especificaciones técnicas de la convocatoria para apoyar proyectos de I+D+i en recobro mejorado de hidrocarburos y al fortalecimiento de capacidades para esta temática en instituciones de educación superior – 2025 del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

La explicación detallada de cada uno de los niveles de TRL adoptado por el MinCiencias en sus convocatorias se expone en el [anexo 3](#).

Este primer criterio permite dar mayor valoración a los usos del carbón en los que se ha alcanzado una TRL con mayor nivel, lo que equivale a una mayor posibilidad de tener tecnologías asociadas a productos que están más cercanos a una operación comercial.

3.1.2. Impacto ambiental

Con el fin de cuantificar el impacto ambiental asociado a los distintos usos no convencionales del carbón, se adoptó el enfoque de Evaluación del Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés). Esta metodología permite estimar los impactos ambientales de un producto, sistema o servicio a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, es decir, desde la “cuna hasta la tumba” (*cradle-to-cradle*) (Astrup Jensen, y otros, 1997). Por otra parte, el concepto desde la “cuna a la puerta” (*cradle-to-gate*) es una Evaluación del Ciclo de Vida con un alcance menor, que no incluye las actividades posteriores a la salida del producto de fábrica, como son: el transporte al usuario final, el uso y la disposición final.

Existen varias categorías de indicadores para evaluar el impacto del ciclo de vida, entre ellos: calentamiento global, acidificación, eutrofización y agotamiento del ozono (Chen, Matthews, & Griffin, 2021). Una de las categorías más utilizadas en las diversas metodologías de evaluación del impacto es el cambio climático, cuyo indicador³ se expresa mediante kg CO_{2e}.

El impacto ambiental de una cadena productiva es relevante como criterio para la promoción de las cadenas productivas, ya que permite avanzar de forma alineada con las metas mundiales y nacionales de mitigación de Gases de Efecto Invernadero - GEI, lo anterior, sin desconocer la importancia de este criterio en el comercio internacional de bienes y servicios. En lo que corresponde a las metas nacionales, en el Plan Estratégico Sectorial – Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2023-2026 (MADS, 2024) se establecen las siguientes:

- Reducir en un cincuenta y uno por ciento (51 %) las emisiones GEI con respecto al escenario de referencia a 2030 de la Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés), lo que equivale emisiones máximas de 169,44 millones de tCO_{2e}.
- Alcanzar carbono neutralidad a 2050.

3.1.3. Comercio exterior colombiano del producto

La categoría de comercio exterior se asocia a las cantidades tanto importadas como exportadas del producto objeto de análisis en Colombia, buscando determinar si la balanza comercial es positiva, negativa o si la subpartida arancelaria no cuenta con cifras de comercio.

3.1.4. Aplicación de la metodología de priorización de usos no convencionales del carbón en Colombia

A partir de la información de los usos no convencionales incluidos en los documentos de producción científica en Colombia y la información sobre las iniciativas de usos no convencionales del carbón a nivel global mencionados en el numeral 2.4., se consideraron los siguientes productos:

- Hidrógeno
- Carbón activado
- Elementos de tierras raras
- Fibras de carbono
- Sustancias húmicas
- Grafeno

La metodología para el diligenciamiento de la matriz de priorización se explica en detalle en el [anexo 4](#), así mismo, los datos de referencia para determinar el valor que se asigna a cada criterio se relacionan en el [anexo 5](#). Finalmente, el resultado de la aplicación de la metodología de priorización se muestra en la siguiente tabla:

³ El equivalente de dióxido de carbono (CO_{2e}) es una medida del efecto de diferentes gases de efecto invernadero (GEI) sobre el clima. Al convertir diversas emisiones a la cantidad equivalente de dióxido de carbono (CO₂), es posible comparar sus impactos. (ClimatePartner, s.f.)

Tabla 6. Matriz de priorización.

Producto	Criterio 1. Madurez tecnológica (33,33%)		Criterio 2. Comercio exterior colombiano (33,33%)	Criterio 3. Impacto ambiental (33,33%)	TOTAL
	Nivel de madurez tecnológica - TRL Mundial	Nivel de madurez tecnológica - TRL Colombia	Balanza comercial 3: no existen registros de exportaciones ni exportaciones. 6: con balanza negativa. 9: con balanza positiva.	Huella ambiental Emisiones de CO ₂	
Sustancias húmicas	9	9	6	9	8,0
Carbón activado	9	9	6	7	7,3
Hidrógeno	9	3	6	8	6,3
Fibras de carbono	9	4	6	4	5,2
Grafeno	9	5	6	1	4,4
Elementos de tierras raras	6	3	6	1	3,6

Fuente: elaboración propia

A partir de los resultados de la metodología de priorización, se identificaron dos grupos de usos: un primer grupo con valores entre 6,3 y 8,0, y un segundo grupo entre 3,6 y 5,2. Estas diferencias están fuertemente influenciadas por el nivel de madurez tecnológica (TRL) en Colombia y por la huella ambiental medida en CO₂e. Cabe señalar que, en el caso del hidrógeno, la evaluación de la huella ambiental incluye el uso del proceso de captura y almacenamiento de carbono (CCS). En los siguientes numerales se desarrollarán los análisis de los tres productos con mayor puntaje en la matriz de priorización:

3.2. Uso no convencional del carbón: sustancias húmicas.

Los carbones de bajo rango en particular el lignito, el carbón subbituminoso y su variante altamente meteorizada conocida como leonardita presentan una elevada proporción de materia orgánica humificada y abundancia de grupos funcionales oxigenados (carboxilos, hidroxilos y fenólicos). Estas características los convierten en materias primas con alto potencial para la obtención de sustancias húmicas, en especial ácidos húmicos (AH) y ácidos fúlvicos (AF), con aplicaciones consolidadas en agricultura, recuperación de suelos y manejo ambiental (IHSS, 2007).

Diversos estudios han mostrado que pre-oxidaciones suaves en el carbón (con peróxido de hidrógeno o ácido nítrico diluido) incrementan la densidad de grupos carboxílicos y, con ello, el rendimiento de extracción frente a la ruta alcalina convencional (Huijin Li, 2023). Desde el punto de vista agronómico, los AH derivados de lignitos, carbones subbituminosos y leonarditas exhiben funcionalidad similar a las sustancias húmicas del suelo, mejorando la estructura, la retención de agua y el intercambio catiónico, y actuando como bioestimulantes en cultivos (Rani, Kumari, & Paul, 2024). De manera complementaria, se exploran rutas biotecnológicas de biosolubilización con hongos y bacterias ligninolíticas que reducen el uso de reactivos y favorecen la incorporación gradual de carbono orgánico al suelo (Cubillos-Hinojosa, Valero, & Melgarejo, 2015).

En el suelo, los ácidos húmicos actúan como un mejorador natural, vuelven la tierra más suelta, ayudan a retener agua, y mantienen disponibles los nutrientes para las plantas. También amortiguan cambios bruscos de acidez (pH) y estimulan el crecimiento de raíces y de microorganismos “buenos” del suelo (Branislav Kandra, 2024). Se usan sobre todo al preparar el terreno y en los primeros días después de sembrar o trasplantar, y son especialmente útiles en suelos pobres, arenosos o compactados, en suelos

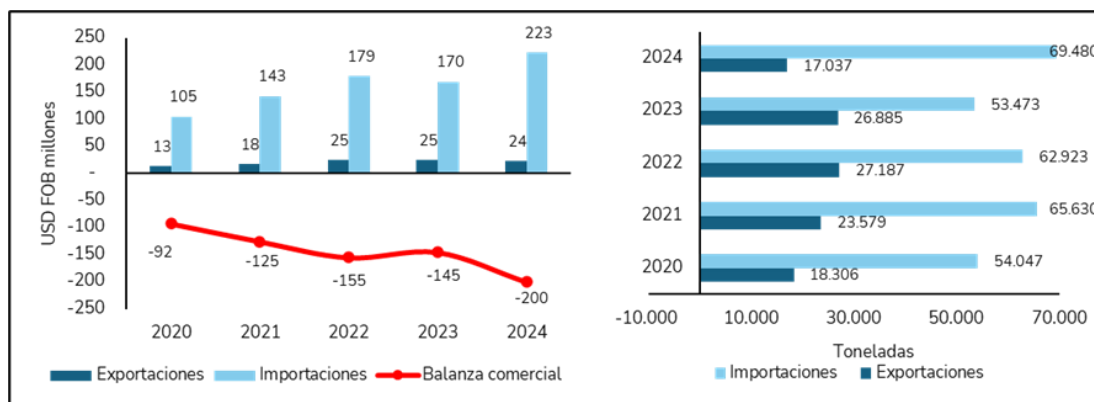
salinos o cuando el cultivo enfrenta sequía o calor. En recuperación de suelos degradados (incluidas áreas mineras en la etapa de cierre), ayudan al arraigo de las plantas y a la estabilidad del terreno.

A diferencia de otras fuentes orgánicas (residuos agrícolas o compost), los lignitos y carbones subbituminosos ofrecen una composición más estable y homogénea, facilitando el control del proceso y la estandarización de calidad del producto (Hoffmann, 2018). De esta manera, países como Polonia, Alemania e India, los han extraído de forma industrial por décadas, empleando métodos alcalinos (NaOH/KOH) con acidificación controlada para separar fracciones húmicas y fúlvicas. Experiencias recientes en Colombia confirman la viabilidad de estas metodologías con materias primas locales, obteniendo fracciones comparables a leonarditas comerciales cuando se controlan impurezas y condiciones de operación (Rani, Kumari, & Paul, 2024).

3.2.1. Información comercio exterior Colombia

Durante el período comprendido entre 2020 y 2024, la balanza comercial de la subpartida arancelaria que incluye las sustancias húmicas fue deficitaria para Colombia. Aunque las exportaciones relacionadas aumentaron hasta el 2022, las importaciones alcanzaron su nivel más alto en el 2024, con USD 223,34 millones de dólares y 69.480 toneladas.

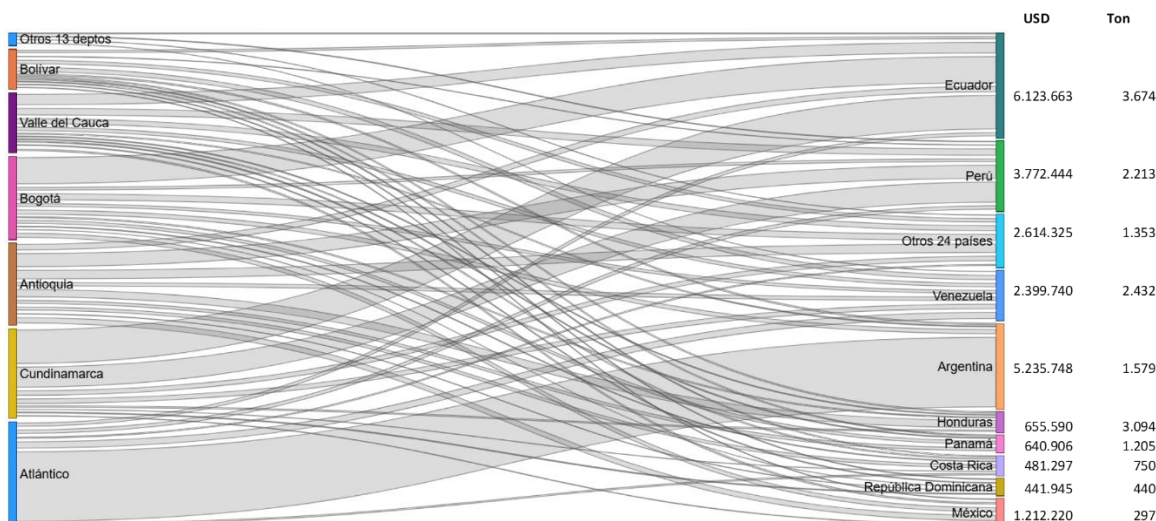
Gráfico 37. Comercio exterior colombiano de la subpartida arancelaria que incluye las sustancias húmicas, 2020 – 2024.



Fuente: elaboración ANM a partir de los datos descargados de Mapa Regional de Oportunidades - maro.com.co. Datos de la subpartida arancelaria 3824999900 - Las demás preparaciones aglutinantes para moldes o núcleos de fundición; productos químicos y preparaciones de la industria química o de las industrias conexas (incluidas las mezclas de productos naturales), no expresados ni comprendidos en otra parte.

En 2024, 18 departamentos y Bogotá como distrito capital totalizaron exportaciones por USD 23,58 millones, con 17.037 toneladas. El Departamento del Atlántico realizó el 26,21 % de las exportaciones nacionales de la subpartida analizada, seguido por Cundinamarca con el 20,76 %, Antioquia con el 17,97 %, Bogotá con el 17,68 %, Valle del Cauca con el 10,90 %, Bolívar con el 5,31 % y otros 13 departamentos con el 1,18 %. Las ventas al exterior se realizaron a 39 países, en donde Ecuador fue el principal destino de la subpartida 3824999900provenientes de Colombia con USD 6,12 millones, seguido por Argentina con USD 5,24 millones, Perú con USD 3.77 millones, Venezuela con USD 2,40 millones, México con USD 1,21 millones y otros 34 países con USD 4,83 millones.

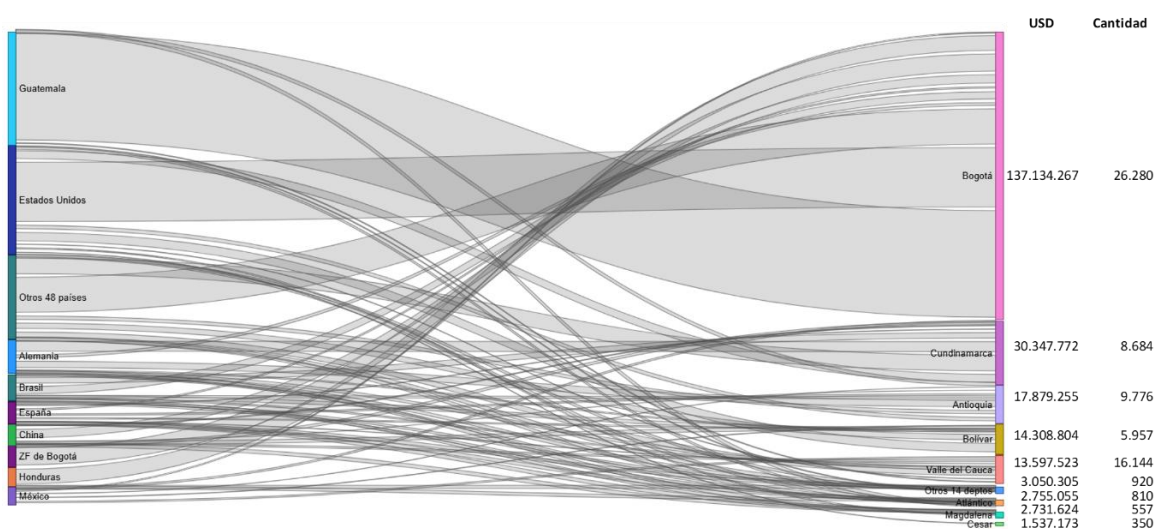
Gráfico 38. Destino de las exportaciones de la subpartida arancelaria que incluye las sustancias húmicas, 2024.



Fuente: elaboración ANM a partir de los datos descargados de Mapa Regional de Oportunidades - maro.com.co. Datos de la subpartida arancelaria 3824999900 - Las demás preparaciones aglutinantes para moldes o núcleos de fundición; productos químicos y preparaciones de la industria química o de las industrias conexas (incluidas las mezclas de productos naturales), no expresados ni comprendidos en otra parte.

Durante 2024, las importaciones de la subpartida arancelaria que incluye las sustancias húmicas registraron un valor de USD 223,34 millones, con 69.480 toneladas, provenientes de 57 países (incluidas dos zonas francas situadas en Colombia). Los principales socios comerciales fueron Guatemala con USD 53,95 millones, seguida por Estados Unidos USD 52,03 millones, Alemania con USD 16,01 millones, Brasil con USD 12,54 millones y España con USD 10,64 millones.

Gráfico 39. Origen de las importaciones de la subpartida arancelaria que incluye las sustancias húmicas, 2024.



Fuente: elaboración ANM a partir de los datos descargados de Mapa Regional de Oportunidades - maro.com.co. Datos de la subpartida arancelaria 3824999900 - Las demás preparaciones aglutinantes para moldes o núcleos de fundición; productos

químicos y preparaciones de la industria química o de las industrias conexas (incluidas las mezclas de productos naturales), no expresados ni comprendidos en otra parte.

Durante el período de análisis, el precio promedio de exportación de los productos asociados a la subpartida arancelaria que incluye las sustancias húmicas registró valores inferiores al precio promedio de importación. En 2020 se presentó el precio de exportación mínimo con USD 724 FOB por tonelada, el cual fue un 62,85 % menor al precio mínimo de importación. Lo anterior indica que aparentemente el país contó con una ventaja respecto al precio durante el período 2020-2024.

Tabla 7. Precio promedio de exportación e importación de los productos asociados a la subpartida arancelaria que incluye las sustancias húmicas en USD FOB por tonelada, 2020 – 2024.

Precio promedio USD FOB t	2020	2021	2022	2023	2024
Exportación	724	752	906	914	1.384
Importación	1.949	2.177	2.850	3.170	3.214

Fuente: elaboración ANM a partir de los datos descargados de Mapa Regional de Oportunidades - maro.com.co. Datos de la subpartida arancelaria 3824999900 - Las demás preparaciones aglutinantes para moldes o núcleos de fundición; productos químicos y preparaciones de la industria química o de las industrias conexas (incluidas las mezclas de productos naturales), no expresados ni comprendidos en otra parte.

3.2.2. Materia prima

La materia prima requerida para la obtención de ácidos húmicos y fúlvicos, proviene principalmente de la materia vegetal, la cual se degrada en humina a partir de los biopolímeros de las plantas (Hedges, 1988), y esta a su vez en ácidos húmicos y fúlvicos (teoría de la despolimerización) o, se plantea también la teoría de la polimerización (Hermann Staudinger), la cual indica que los biopolímeros vegetales se descomponen primero en componentes orgánicos más pequeños, que reaccionan entre sí, formando inicialmente el ácido fúlvico, el cual, mediante condensación, y puede transformarse en ácidos húmicos. (Tan, 2003).

El tipo de materia prima varía desde: i). Subproductos vegetales ricos en lignina y celulosa (bagazo), ii). Tierras ricas en humus, iii). Compost maduro como producto de degradación aeróbica de residuos orgánicos, iv). Turba donde la materia vegetal se descompone en ambientes húmedos, v). Lignito como el carbón de más bajo rango y, vi). Leonardita como la forma oxidada del lignito. En cada una de ellas el contenido aproximado de sustancias húmicas varía; en referencia a los productos relacionados con la formación del carbón o el carbón, el contenido de sustancias húmicas varía desde 20- 40 % en la turba, 40- 60 % en lignito y 60-90 % en la Leonardita. (Picula, 2024).

Se destaca en estos materiales precursores el contenido de grupos ácidos ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$ fenólicos), la alta reactividad química en el caso de la Leonardita, la estructura parcialmente aromática, la alta cantidad de oxígeno y de lignina residual en el caso del lignito y los grupos carboxílicos abundantes en la turba, lo que está relacionado con el grado de carbonización de bajo a muy bajo.

En conclusión, la Leonardita es un estado intermedio entre turba y lignito, aunque también se mencionan los carbones *subbituminosos* y *las lutitas carbonosas*, como resultado del proceso de humificación de la materia orgánica por decenas de millones de años, donde prevalecen condiciones oxidantes como

exposición al aire o aguas subterráneas oxigenadas, bajas temperaturas de carbonización y la presencia de agua y microorganismos.

La calidad de los ácidos húmicos se determina a partir de la alta proporción de grupos funcionales activos, ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$ fenólicos, $-\text{C}=\text{O}$), la alta solubilidad en medio alcalino, peso molecular medio (5–30 kDa) y, la capacidad de quelar nutrientes/metales.

En Colombia, en los informes de evaluación de recursos del carbón, como (SGC, 2016), no se reportan volúmenes asociados a lignitos en las zonas carboníferas y únicamente se menciona como recurso en la región Amazónica.

En estudios locales, tesis y documentos técnicos se indican lignitos en afloramientos en diferentes zonas como: Boyacá, Santander, Cundinamarca, La Guajira, Antioquia- Antiguo Caldas y Norte de Santander, en formaciones de edad Mioceno- Plioceno como es la Formación Tilatá en Cundinamarca-Boyacá (Rodríguez J. , 2012) y, la Secuencia Volcanoclástica de Aranzazu (Castaño & Gómez, 2001).

3.2.3. Análisis de la cadena de valor

La cadena de valor se organiza como un flujo continuo que transforma lignito, carbón subbituminoso y leonardita en productos húmicos estandarizados para uso agrícola y ambiental. (Rani, Kumari, & Paul, 2024). El objetivo es convertir materias primas variables en un portafolio confiable de humatos y ácidos húmicos/fúlvicos con desempeño reproducible. Inicia con la prospectiva y abastecimiento, continúa con el pretratamiento físico del sólido, pasa por la extracción química y/o oxidación controlada, sigue con el refinado y la formulación, se asegura con control de calidad y cumplimiento regulatorio, concluye con logística, comercialización y servicios de aplicación en campo (International Humic Substances Society, 2007)

El pretratamiento físico acondiciona el material para mejorar la transferencia de masa y la eficiencia de extracción. Incluye secado controlado, trituración/molienda y clasificación granulométrica hasta lograr un polvo estable y manejable. (Branislav Kandra, 2024) Un buen pretratamiento reduce consumos de reactivos y energía aguas abajo y minimiza problemas de operación asociados a finos, polvo o sobre-molienda.

En la extracción predomina la alcalina (NaOH/KOH) ajustando relación líquido-sólido, temperatura y tiempo para solubilizar las fracciones húmicas. En lignitos y carbones sub-bituminosos, una pre-oxidación suave con peróxidos o ácido nítrico diluido, según normativa aplicable puede aumentar la densidad de grupos carboxílicos y elevar el rendimiento. (Rani, Kumari, & Paul, 2024)

A los productos de la preoxidación, líquidos y sólidos, se realiza filtración, concentración y precipitación ácida con el fin de aislar los ácidos húmicos. (Huijin Li, 2023)

Cada paso del proceso se documenta con una ficha técnica y de seguridad para uso agrícola, así mismo se gestionan los permisos pertinentes para el uso del agua, manejo de vertimientos y residuos. (Cubillos-Hinojosa, Valero, & Melgarejo, 2015).

3.2.4. Tecnologías

Los métodos de aislamiento y extracción de sustancias húmicas han sido ampliamente estudiados debido a su importancia en aplicaciones agrícolas y ambientales. Entre los procedimientos más comunes se encuentra la extracción alcalina, que utiliza soluciones como el amoníaco, hidróxidos de potasio y sodio para transformar las sustancias húmicas en humatos solubles con alta actividad biológica, destacándose por su eficiencia y bajo impacto ambiental (Universidad del Sur de Kazajstán, 2022).

La extracción se puede hacer mediante diferentes métodos, como lo son: Extracción alcalina (Método IHSS), Método hidrotermal con KOH y Extracción alcalina asistida por ultrasonido (EAAU)

- Extracción alcalina (Método IHSS). (Rani, Kumari, & Paul, 2024).

Acondicionamiento del material: el lignito se seca a aproximadamente 40 °C y se muele finamente para obtener una granulometría homogénea.

Pretratamiento ácido: el material triturado se somete a desmineralización con HCl y, se centrifuga. Esta etapa elimina minerales carbonatados y partículas finas que interfieren con el aislamiento de las fracciones húmicas.

Extracción alcalina: el material se trata con NaOH, la solución alcalina solubiliza la fracción húmica, formando humatos en solución.

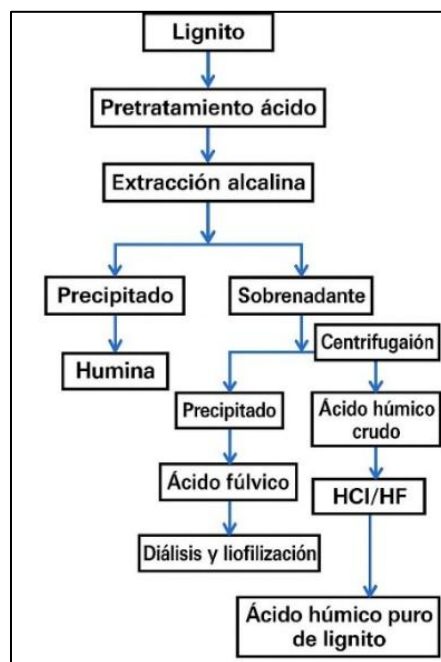
Separación de la humina: el precipitado insoluble recuperado después de la centrifugación corresponde a la fracción humina, que no se solubiliza en medio alcalino y cuyo contenido depende del grado de oxidación del lignito.

Precipitación ácida del ácido húmico (AH): el producto alcalino se acidifica con HCl, el ácido húmico pierde solubilidad y precipita.

Obtención del ácido fúlvico (AF): la fracción líquida posterior a la precipitación contiene los ácidos fúlvicos, que permanecen solubles incluso en un pH ácido.

Purificación del ácido húmico (descenizado): el ácido húmico crudo puede purificarse mediante un tratamiento con HCl/HF, posteriormente, el producto se lava, congela y seca al vacío a 60 °C para obtener el ácido húmico purificado.

Gráfico 40. Esquema del proceso de extracción alcalina de ácido húmico a partir de lignito.



Fuente: editado y traducido a partir de (Rani, Kumari, & Biswajit, 2024).

➤ **Método hidrotermal con KOH.**

Según (Huijin Li, 2023) el método hidrotermal produce un ácido húmico con mayor masa molecular, mejor estructura aromática y menor contenido de cenizas comparado con el obtenido mediante extracción alcalina tradicional.

Preparación del lignito: el lignito se seca, se muele y se tamiza para obtener un material homogéneo antes del tratamiento.

Mezcla con KOH: el lignito preparado se mezcla con hidróxido de potasio (KOH) en proporciones controladas, formando una suspensión alcalina que actúa como agente de disolución y de activación química durante el proceso hidrotermal.

Tratamiento hidrotermal (200 °C – 6 h): la mezcla se introduce en un reactor sellado y se calienta para romper enlaces estructurales en el lignito.

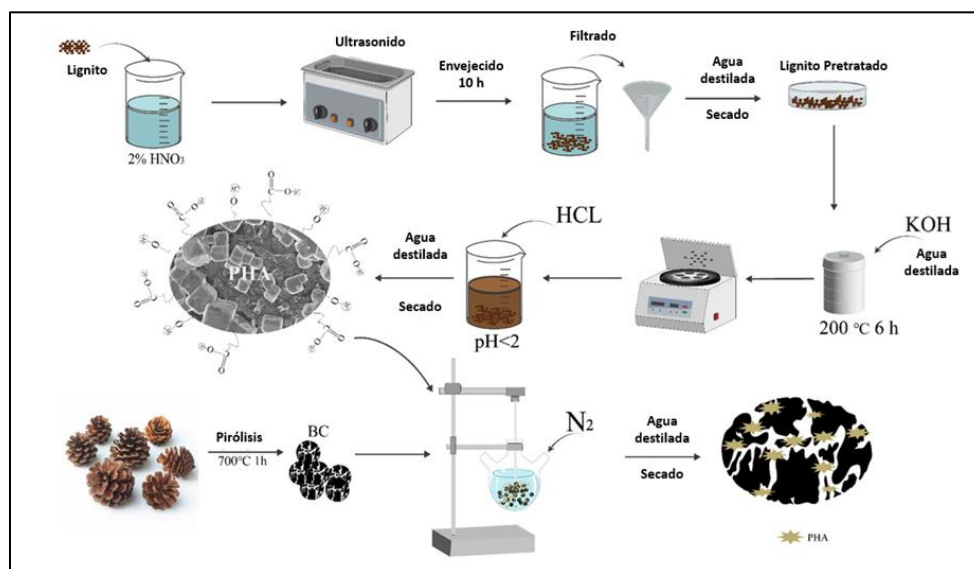
Separación del extracto: se separa el residuo sólido del extracto líquido de la mezcla obtenida.

Acidificación del extracto: el extracto líquido se acidifica con HCl separando el ácido húmico (insoluble) y ácido fúlvico (que permanece en solución).

Recuperación y lavado del ácido húmico: el precipitado formado se centrifuga y se lava repetidamente con agua para eliminar residuos de potasio y sales generadas durante el proceso.

Secado del producto final: el ácido húmico obtenido se seca en un horno a temperaturas controladas entre 45 °C y 60 °C.

Gráfico 41. Diagrama del proceso hidrotermal para la obtención de ácido húmico a partir de lignito.



Fuente: editado y traducido a partir de (Huijin Li, 2023).

- Extracción alcalina asistida por ultrasonido (UAAE) (Nieweś, y otros, 2022).

Pretratamiento ácido del material: el material carbonoso se somete inicialmente a un pretratamiento con ácido clorhídrico diluido, con el fin de remover carbonatos y minerales asociados.

Extracción alcalina intensificada por ultrasonido: el material se mezcla con una solución de NaOH 0,5 M y se somete a tratamiento ultrasónico en un baño de 45 kHz, utilizando intensidades de 200, 300 y 400 mW·cm⁻² y tiempos de exposición de 45, 90 y 135 minutos. La cavitación ultrasónica promueve la ruptura de agregados dentro de la matriz carbonosa, aumenta la dispersión del material y acelera la transferencia de masa, lo que favorece la solubilización de sustancias húmicas. Estas condiciones generan una mayor eficiencia de extracción en comparación con la extracción alcalina convencional.

Separación del extracto alcalino: finalizado el tratamiento ultrasónico, la mezcla se centrifuga para separar la fase líquida del residuo sólido. El sobrenadante obtenido contiene las fracciones húmicas solubilizadas, cuya concentración aumenta a medida que se intensifica la energía ultrasónica aplicada (Nieweś, y otros, 2022).

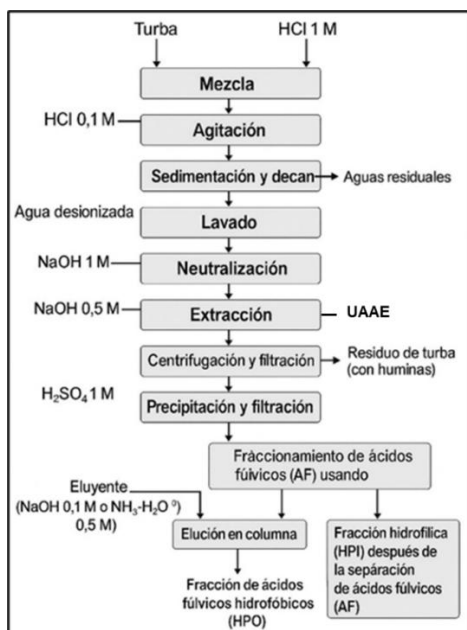
Precipitación del ácido húmico (AH): el extracto alcalino se acidifica empleando H₂SO₄.

Recuperación y lavado del ácido húmico: el gel de ácido húmico precipitado se recupera mediante centrifugación y se lava varias veces con agua para eliminar residuos de sales y restos del medio alcalino.

Obtención y fraccionamiento de la fase fúlvica (AF): la fase líquida remanente contiene predominantemente ácidos fúlvicos (AF), para su fraccionamiento se emplea una resina hidrofóbica DAX-8, mediante la cual se separan dos fracciones: AFhidrofílicos (HPI) – no retenidos por la resina y AF hidrofóbicos (HPO) – adsorbidos y posteriormente eluidos con NaOH 0,1 M o $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 0,5. Este procedimiento permite obtener fracciones definidas para análisis espectroscópico y gravimétrico.

Evaluación de la eficiencia del proceso: la eficiencia del método depende del equilibrio entre la energía aplicada y la integridad estructural del material húmico, dado que intensidades muy elevadas pueden favorecer la degradación parcial de ácidos húmicos, aumentando el contenido de ácidos fúlvicos.

Gráfico 42. Proceso de extracción y fraccionamiento de sustancias húmicas a partir de turba o lignito.



Fuente: editado y traducido a partir de (Nieweś, y otros, 2022).

3.2.5. Marco regulatorio

En Colombia, el Reglamento de Producción Ecológica (Res. 187 de 2006 - Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural) admite derivados de ácidos húmicos y el ICA publica listados de insumos permitidos y registrados para su uso. El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, a través del National Organic Program (NOP), permite el uso de sustancias húmicas en la producción ecológica bajo el esquema de certificación USDA Organic, siempre que sean de origen natural y se obtengan mediante procesos permitidos, como la extracción con agua o álcalis, y cuenten con la aprobación del organismo certificador correspondiente. En la Unión Europea a través de la FAO, se trabaja en la gestión de la materia orgánica referenciado en la calidad del suelo, la nutrición vegetal y el ciclo del carbón, apoyando las iniciativas de la agricultura sostenible. Finalmente, en Canadá en la Lista de Sustancias Prioritarias (PSL, por sus siglas en inglés), establecidas por los ministerios de Medio Ambiente y Salud, se admiten los humatos, ácidos húmicos y fúlvicos.

Con el fin de identificar los aspectos más relevantes del marco legal y de la normatividad técnica se realizó una búsqueda que condujo a identificar los principales requisitos asociados a los diversos eslabones de la cadena productiva de sustancias húmicas.

El Decreto 1071 de 2015 *“Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo Agropecuario, Pesquero y de Desarrollo Rural”* incluye la definición de insumo agropecuario como *“Todo producto natural o sintético, biotecnológico o químico, utilizado para promover la producción agropecuaria, así como para el diagnóstico, prevención, control, erradicación y tratamiento de las enfermedades, plagas, malezas y otros agentes nocivos que afecten a las especies animales y vegetales o a sus productos”* (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2015).

Igualmente, el Decreto establece en el artículo 2.13.1.1.2. que el Instituto Colombiano Agropecuario - ICA realiza, entre otros temas, el control técnico de los insumos agropecuarios, que incluye: 1) el control sobre los productos biológicos y químicos para uso y aplicación; ya sea en vegetales, en animales o en el suelo, y 2) el control de carácter técnico de la producción, comercialización y uso de los insumos agropecuarios. Entre las atribuciones asignadas al ICA para desarrollar el control técnico están: 1) la determinación de los requisitos para las organizaciones que fabrican, formulan, importan usan o aplican los insumos agropecuarios, 2) la determinación de los requisitos para el registro de las organizaciones acreditadas para la certificación de la calidad, la eficacia y la seguridad de los insumos agrícolas y 3) la supervisión, control y seguimiento al cumplimiento de los requisitos establecidos en la reglamentación.

En la Resolución No. 00150 de 2003 (ICA, 2003), por la cual se adopta el Reglamento Técnico de Fertilizantes y Acondicionadores de Suelos para Colombia, se incluyen un conjunto de definiciones que permite identificar algunos actores de la cadena productiva para la producción de fertilizantes y acondicionadores del suelo. Se destacan los siguientes: distribuidor, empacador, envasador, expendedor, fabricante, formulador e importador.

Asimismo, la resolución en cuestión establece, en varios de sus artículos, la obligación de las organizaciones de registrarse exitosamente ante el ICA cuando vayan a llevar a cabo actividades que incluyen desde la fabricación hasta el envase o empaque de fertilizantes y acondicionadores de suelos, así como el registro y comercialización de acondicionadores y/o fertilizantes.

Igualmente establece que, para comercializar los fertilizantes y acondicionadores del suelo, estos deben cumplir los requisitos de etiquetado contenidos en la Norma Técnica Colombiana No. 40. Abonos o Fertilizantes. Adicionalmente, dispone que el ICA realizará la verificación de la conformidad de los fertilizantes y acondicionadores de suelos que se comercialicen en Colombia con los laboratorios de control de calidad registrados.

La Resolución No. 00150 de 2003 hace referencia, como anexo 1, a la Norma Técnica Colombiana - NTC 1927 (ICA, 2003), en la que se incluyen definiciones y clasificación de los fertilizantes y acondicionadores. Las definiciones de interés para el análisis de la cadena productiva de sustancias húmicas se transcriben a continuación:

- Ácidos fúlvicos: fracción del humus soluble en álcali, que permanece en solución después de la acidificación.
- Ácidos húmicos: fracción del humus soluble en álcali, que se precipita en medio ácido.
- Compuestos semejantes a los ácidos húmicos: fracción de la extracción alcalina de sustancias diferentes a suelos, turbas, lignitos y leonarditas, que precipita en medio ácido.

- Compuestos semejantes a los ácidos fúlvicos: fracción de la extracción alcalina de sustancias diferentes a suelos, turbas, lignitos y leonarditas, que son solubles a cualquier pH.
- Extracto húmico total (EHT): fracción de la materia orgánica de suelos, turbas, lignitos o leonarditas, soluble en medio alcalino, compuesta principalmente por ácidos húmicos y fúlvicos.
- Huminas: porción insoluble en medio alcalino y relativamente inerte del humus, constituida por ácidos húmicos íntimamente ligados a la materia mineral del suelo.
- Leonardita: materia orgánica procedente de coníferas, que estuvieron sometidas a condiciones geológicas favorables para su mineralización y carbonificación y posterior oxidación y humificación, usada como principal fuente natural de sustancias húmicas.
- Sustancias húmicas: porción extraída en medio alcalino de la materia orgánica del suelo, turba, lignito, leonardita o carbón, que ha sufrido suficiente transformación a través de degradación predominantemente pedogenética y microbial de los biopolímeros y subsiguiente polimerización por reacciones químicas. Están compuestas principalmente por ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas.

Con relación a la clasificación de los fertilizantes y acondicionadores de suelo la NTC 1927 establece las siguientes categorías:

- Fertilizantes químicos (inorgánicos).
- Acondicionadores inorgánicos de suelos (Materiales de encalado y Otros acondicionadores con elementos secundarios).
- Fertilizantes orgánicos y acondicionadores de suelos
- Acondicionadores orgánicos (natural y sintético de suelos).
- Fertilizantes y acondicionadores de origen mixto (órgano- mineral).

Considerando la definición de sustancias húmicas, estas se pueden clasificar como un acondicionador orgánico que puede actuar como un bioestimulante.

Lo anterior puede ratificarse comercialmente en el portal agroquímicos de Colombia (Portal Agrícola , 2025), realizada la búsqueda por la opción de categoría / extractos húmicos existen 45 productos, algunos de los cuales tiene en su descripción:

- Enmienda orgánica húmica / Acondicionador orgánico húmico para aplicación al suelo / Ácidos húmicos derivados de leonardita en forma granulada.
- Enmienda orgánica húmica de suelos / Ácidos húmicos líquidos, elaborados a base de Leonardita, con alto contenido de ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, disponibles de forma inmediata para el cultivo.

Al 21-11-2025 se encuentra en consulta pública un proyecto normativo del ICA con código PN-2025-24108 *“Por la cual se establecen los requisitos para el registro de fabricantes, formuladores, envasadores, importadores y distribuidores de fertilizantes, acondicionadores de suelos y productos afines para uso agrícola y en jardinería, así como el registro y control de estos productos y se establecen otras disposiciones”* en el que se incluye una definición para acondicionador orgánico húmico, así: *“Producto de origen pedogenético (de la génesis del suelo) con o sin tratamiento químico que aporta ácidos húmicos y fúlvicos.”* (ICA, 2025).

Con relación a la política pública, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, expidió en septiembre de 2025 la Resolución 000295 *“Por la cual se adoptan los lineamientos de Política Pública sobre Bioinsumos, fertilizantes orgánicos y acondicionadores de suelos: una apuesta para el logro de las agriculturas para la vida”*. La resolución busca promover la agricultura sostenible a través de disposiciones que permitan desarrollar tecnologías para la producción de bioinsumos, fertilizantes orgánicos, acondicionadores de suelos y su posterior uso en el sector agrícola colombiano (MADR, 2025).

Previamente a la expedición de la Resolución 000295 de 2025, se elaboró el CONPES 4098 de 2022 (DNP, 2022), que incluye la línea de acción *“Implementar la Política Nacional de Insumos Agropecuarios”*, en ella se establecieron, entre otras, las siguientes acciones:

- Estrategia de divulgación de información para promover la adopción de prácticas que incluyan alternativas para el uso de insumos agropecuarios de origen biológico. 2022 - 2031.
- Estudio de prefactibilidad para el montaje de plantas de insumos agropecuarios y bioinsumos. 2024- 2025.

En línea con la producción de alimentos ecológicos, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural estableció el *“Reglamento para la producción primaria, procesamiento, empaque, etiquetado, almacenamiento, certificación, importación, comercialización de Productos Agropecuarios Ecológicos”*, en el que los ácidos húmicos y fúlvicos son considerados como insumos autorizados en producción ecológica como productos fertilizantes.

En términos de reglamentación técnica, además de la Norma Técnica Colombiana - NTC 1927 previamente referenciada, se encuentran:

- NTC 5167:2022. Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo.
- NTC 6287-1:2018. Fertilizantes y enmiendas. Toma de muestras y preparación de muestras.
- NTC 40:2017. Abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo. Etiquetado.

3.2.6. Mapeo de actores

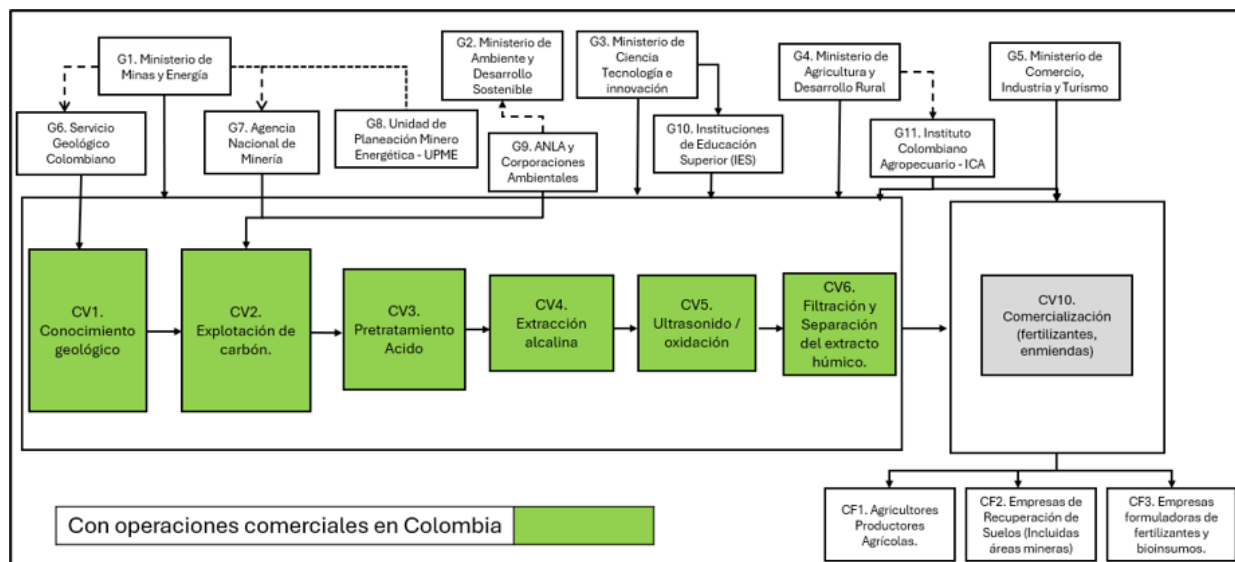
La cadena de valor del ácido húmico a partir de carbones de bajo rango integra actores mineros, tecnológicos, regulatorios y de mercado.

En el nivel operativo, los actores son titulares mineros y productores que explotan carbones de bajo rango o materiales humificados, posteriormente se realiza el acondicionamiento del material (tritución, molienda, homogenización y secado). La fase de transformación incluye el acondicionamiento fino del material, la extracción y oxidación para obtener el extracto húmico, y los gestores de residuos que manejan efluentes y subproductos. Posteriormente intervienen las empresas de formulación, que convierten el ácido húmico crudo en presentaciones comerciales para el sector agrícola y ambiental.

Los actores en la fase final de la cadena de valor son los distribuidores y comercializadores de insumos, grandes consumidores industriales especializados en la recuperación de suelos, y los usuarios finales: productores agrícolas y operadores ambientales. La eficiencia de la cadena depende de la calidad del lignito / leonardita, de las especificaciones técnicas del producto final, del cumplimiento regulatorio y de

la logística entre formuladores, distribuidores y usuarios. La articulación de estos actores permite transformar un recurso minero en un bioinsumo competitivo frente a alternativas importadas.

Gráfico 43. Diagrama de actores en la producción de sustancias húmicas.



Fuente: elaboración ANM.

3.3. Uso no convencional del carbón: carbón activado

El carbón activado se puede obtener a partir de biomasa (cáscara de coco, desechos agrícolas, madera y chatarra de polímeros), y de carbón como se trata en este texto.

El carbón es la materia prima comúnmente usada de acuerdo con la disponibilidad del recurso y su menor costo. Adicionalmente, es importante considerar las propiedades mecánicas obtenidas en la producción del carbón activado, como la alta porosidad interna, el volumen total de poros y el área superficial interna (30-3000 m²/g); características aptas para sus diferentes usos, tales como el tratamiento de agua potable y residual, tratamiento de gases de combustión, la filtración de aire, la purificación en la industria alimentaria y, el almacenamiento de gas natural, entre otros. (Spencer, Senanayake, Altarawneh, & Ibane, 2024) (El Qada, Allen, & Walker, 2008) (Vilén, Laurell, & Vahala, 2022).

El carbón activado está disponible en diversas formas y tamaños de acuerdo con el uso industrial, se reportan más de 100 tipos de productos disponibles en el mercado global.

Tabla 8. Usos y tipos de carbón activado.

USOS CARBÓN ACTIVADO	TIPOS DE CARBÓN ACTIVADO	
- Industria automotriz - Industria de cigarrillos - Adsorción de metales pesados - Procesamiento de comida	Carbón activado granular (CAG)	200–5000 µm Absorber oro de lodos que contienen iones de aurocianuro. Eliminar el mercurio de los gases de combustión emitidos por centrales eléctricas y fundiciones industriales.

USOS CARBÓN ACTIVADO	TIPOS DE CARBÓN ACTIVADO	
- Hospitales, oficinas y laboratorios - Manufactura - Centrales nucleares - Petroquímica, caucho, pinturas y plásticos - Recuperación de metales preciosos - Pirometalurgia e industrias de proceso - Refinación de azúcar - Purificación de agua - Tratamiento de aguas residuales		Tratamiento de aguas, eliminando diversas impurezas orgánicas, sustancias peligrosas y sólidos disueltos o suspendidos Se utiliza comúnmente como paso adicional o final en el tratamiento de aguas residuales para lograr una buena calidad del agua.
	Carbón activado en polvo (CAP)	<180 µm Trata eficazmente los suelos contaminados con mercurio, especialmente en suelos con niveles de mercurio inferiores a 200 mg/kg.
	Fibra de carbón activado (FCA)	3–100 mm de espesor hasta 1000 mm de ancho
	Carbón activado extruido (peletizado) (ECP)	800–5000 µm

Fuente: elaboración propia a partir de (Spencer, Senanayake, Altarawneh, & Ibana, 2024).

Para ser comercialmente atractivo el carbón activado debe poseer una serie de características (El Qada, Allen, & Walker, 2008), entre las que se destacan:

- Tener área de superficie interna, que debe ser accesible a través de poros lo suficientemente grandes como para admitir las moléculas a adsorber (la superficie interna se crea a partir de poros de diversos tamaños).
- Debe tener alta afinidad y capacidad para los compuestos objetivo
- Debe ser capaz de regenerarse fácilmente
- No debe perder su capacidad de adsorción a través del reciclaje continuo
- Debe tener tolerancia para una amplia gama de parámetros de aguas residuales.
- Debe ser lo suficientemente fuerte mecánicamente para soportar el manejo a granel y la vibración que son características de cualquier unidad industrial. Material que resista durante la activación, manejo y uso.

La mayor producción de carbón activado se concentra en China, Estados Unidos, e India. (Tabla 17). Particularmente China ha incrementado de forma importante su producción de carbón activado a base de carbón, superando la capacidad de las alternativas renovables, por lo que se predice que el carbón activado a base de carbón desempeñará un papel crucial para satisfacer la creciente demanda del mercado mundial en un futuro próximo. (Gráfico 56).

Tabla 9. Producción global de carbón activado a partir de carbón y otros materiales.

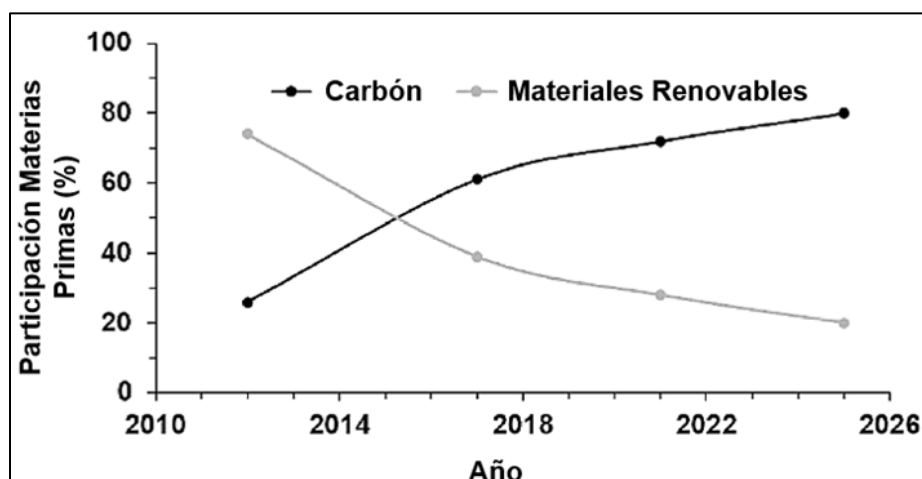
PAÍS	CÁSCARA DE COCO	CARBÓN	RENOVABLES	TONELADAS POR AÑO*	
				2013	2017
Australia		Sí		24.000	27.800
China		Sí	Madera, aserrín y otros.	660.000	1.041.000
USA		Sí	Madera, aserrín.	335.700	316.200
Bangladesh	Sí		Madera.		38.400
Sri Lanka	Sí		Cáscaras de coco	35.600	48.860
Tailandia			Cáscaras de coco	17.200	27.600
Indonesia	Sí		Aserrín	66.200	122.385
India	Sí		Madera	10.000	228.000

PAÍS	CÁSCARA DE COCO	CARBÓN	RENOVABLES	TONELADAS POR AÑO*	
				2013	2017
México	Sí	Sí	Madera, huesos de ganado	11.680	23.780
Malasia	Sí		Madera, cáscaras de palma	26.560	34.830
Filipinas	Sí	Sí	Madera, cáscaras de coco	70.000	84.250
Japón	Sí	Sí	Madera, cáscaras de coco	68.740	79.500
Países Bajos (UE)		Sí	Turba	48.000	48.000
Corea del Sur	Sí	Sí	Madera y otros	24.280	39.400
Francia (UE)			Madera y cáscaras de coco	29.100	29.250

*CIFRAS ESTIMADAS

Fuente: Editado y traducido a partir de (Spencer, Senanayake, Altarawneh, & Ibana, 2024).

Gráfico 44. Contribución estimada de materias primas para la producción de carbón activado (2012- 2025).



Fuente: Editado y traducido a partir de (Spencer, Senanayake, Altarawneh, & Ibana, 2024).

De acuerdo con los compromisos a nivel mundial en la mitigación de emisiones en la protección del medio ambiente y, considerando las nuevas regulaciones, se ha estimulado el carbón activado en aplicaciones de tratamiento de agua en Asia, Europa y Centroamérica, por lo que el consumo de carbón activado se duplicó en la última década; en 2016 alcanzó 2,3 millones de toneladas anuales y, se prevé un crecimiento anual del 5,3 % en la demanda para 2025, (Spencer, Senanayake, Altarawneh, & Ibana, 2024).

En 2024, el tamaño del mercado global de carbón activado alcanzó los USD 4.510 millones y, se espera que el mercado alcance los USD 7.680 millones, con una proyección del 5,8 % durante 2025-2033. Particularmente, para el segundo semestre de 2025, el Grupo IMARC (Empresa en investigación de mercados), informa los precios de carbón activado estimado por la fuerte demanda en los sectores de tratamiento de agua y purificación del aire, principalmente en regiones urbanas que implementan regulaciones de emisiones más estrictas: Korea del sur (US\$ 2.675/t), Alemania (US\$ 2.447/t), India (US\$ 2.050/t), USA (US\$ 2.024/t) y, China (US\$ 1.619/t).

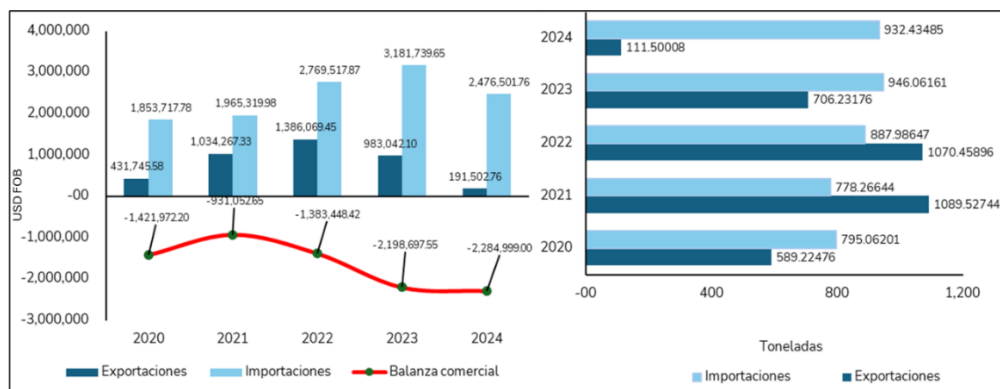
Entre tanto, el mercado latinoamericano de carbón activado presenta problemas de infraestructura, e ineficiencias logísticas. Adicionalmente, el precio se ve influenciado por factores críticos como la inestabilidad política, la inconsistencia de los marcos regulatorios y la devaluación monetaria (IMARC, 2025).

3.3.1. Información comercio exterior Colombia

La demanda de carbón activado ha mostrado una mayor dependencia de las importaciones, con una balanza comercial en déficit promedio anual de 1,64 millones de dólares FOB entre 2020 y 2024. Durante este quinquenio, la exportación de carbón activado mostró una marcada volatilidad, alcanzando su pico en 2022 con 1,38 millones de dólares FOB, para luego desplomarse a 0,19 millones de dólares FOB en 2024, lo que representa una disminución del 86,18 % respecto al valor de 2022.

En 2024, el total exportado fue de 191.503 dólares FOB, equivalentes a 111,50 toneladas, con el departamento de Atlántico liderando las ventas externas con el 85,80 % del total, seguido por Norte de Santander con USD 16.320 FOB (8,52 %), Antioquia con USD 10.875 FOB (5,68 %) y Bogotá con USD 8 FOB (0,004 %).

Gráfico 45. Comercio exterior colombiano de carbón activado, 2020 – 2024.



Fuente: elaboración propia a partir de maro.com.co. Subpartida arancelaria 3802100000 – carbón activado.

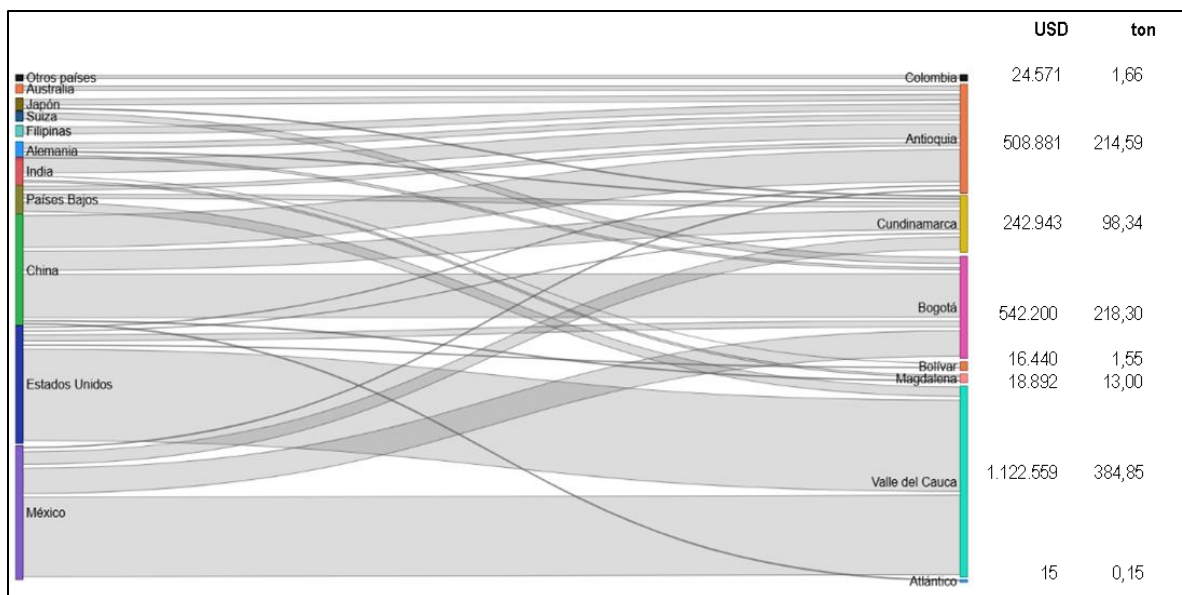
Gráfico 46. Destino de las exportaciones de carbón activado, 2024.



FUENTE: elaboración propia a partir de maro.com.co. SUBPARTIDA ARANCELARIA 3802100000 – CARBÓN ACTIVADO.

En contraste con las exportaciones colombianas, las importaciones de carbón activado en 2024 sumaron 2,48 millones de dólares FOB, correspondiendo a 932 toneladas. Esto subraya la considerable demanda interna que no es cubierta por la producción nacional. Los principales proveedores de este producto son México, Estados Unidos y China, que en conjunto representaron más del 79 % del valor total importado, con participaciones individuales del 30,26 %, 25,56 % y 24,13 % respectivamente.

Gráfico 47. Origen de las importaciones de carbón activado, 2024.



Fuente: elaboración propia a partir de maro.com.co. Subpartida arancelaria 3802100000 – carbón activado.

Colombia mostró una ventaja competitiva en el precio promedio de exportación de carbón activado, siendo sustancialmente menor que el precio de importación (con diferencias de entre 938 y 1.971 dólares FOB por tonelada entre 2020 y 2024), esta ventaja no fue suficiente para revertir el déficit de la balanza comercial. El precio máximo de exportación en 2024, de 1.718 dólares FOB, aún se mantuvo un 35,32 % por debajo del precio promedio de importación de ese mismo año, lo que resalta la disparidad en la valoración y probablemente en la calidad o el tipo de carbón activado que se comercializa.

Tabla 10. Precio promedio exportaciones e importaciones de carbón activado, 2020 – 2024.

Precio promedio USD FOB/tonelada	2020	2021	2022	2023	2024
Exportación	733	949	1.295	1.392	1.718
Importación	2.332	2.525	3.119	3.363	2.656

Fuente: elaboración propia.

3.3.2. Materia prima

La evaluación de las propiedades del carbón como material precursor en la producción de carbón activado debe ser considerada, ya que tienen incidencia en las características finales del producto, y por lo tanto en el uso final.

Se consideran las propiedades intrínsecas del carbón, tales como la humedad, el contenido de volátiles, el contenido de cenizas, la densidad y, la composición química para establecer el *rango del carbón*, el cual, es un indicativo de la distribución del tamaño de poro, y resistencia mecánica del carbón activado producido. Así mismo, el *tipo de carbón* indica la composición maceral, su naturaleza, microporosidad y asociación maceral (microlitotipos), como un indicativo de la difusión de gases, lo que está directamente relacionada con la reactividad, porosidad intrínseca y área superficial disponible para la activación (Brooks, Lomas, & Tahmasebi, 2024).

En el análisis de otras propiedades que se consideran en el proceso de carbonización, se tienen la dureza del carbón, el índice de molienda y la temperatura de fusión de las cenizas ya que influyen en la generación de un tamaño de partícula adecuado para la producción de carbón activo y en la selección de la temperatura de activación (Spencer, Senanayake, Altarawneh, & Ibana, 2024).

Respecto a la porosidad, se aprovechan los diferentes tamaños de poro para eliminar diversos compuestos orgánicos en líquidos o para los diferentes usos, por lo que se considera que los macroporos (50 nm) se reducen al aumentar el rango del carbón, mientras que los mesoporos (2 a 50 nm) y microporos (2 nm) aumentan con el rango del carbón (Zhu et al., 2016) en (Keboletse, Ntuli, & Oladijo, 2021). Numerosos estudios determinan que la vitrinita es el maceral más reactivo, característica que favorece la formación de poros durante la carbonización/activación (Keboletse, Ntuli, & Oladijo, 2021). Si bien, las inertinitas y exinitas son macerales menos reactivos, contribuyen con poco desarrollo de microporosidad, disminuyen la superficie específica y requieren mayor energía para activación, aunque se considera importante cuantificar la fracción reactiva de la semifusinita, la cual puede aportar un porcentaje de poros en la activación.

Adicionalmente, es importante mencionar que se requieren carbones con bajo contenido de materia mineral, ya que está directamente relacionado con el porcentaje de superficie activa libre. El alto contenido de minerales puede obstruir poros, catalizar reacciones indeseadas durante la activación, aumentar el tratamiento previo, disminuir el rendimiento, y contaminar la adsorción.

El rango de carbón requerido para obtener carbón activado se relaciona con su poder reactivo, se consideran principalmente *lignitos*, *carbones subbituminosos* y *bituminosos*, aunque los carbones inmaduros generan impurezas (materia volátil) y residuos orgánicos, mientras que los carbones de mayor rango como los bituminosos presentan en su superficie pocos sitios activos (L, Liu, & Huang, 2007).

Diversos estudios concluyen que la producción de carbón activado a partir del lignito, logran una superficie BET (Brunauer-Emmett-Teller) superior a 500 m²/g mediante activación térmica y superior a 1.000 m²/g mediante activación química aptos para desulfuración de gases de combustión, captura de contaminantes de la industria farmacéutica, supercondensadores, eliminación de yodo y eliminación de azul de metileno, fenol y de cianuro del agua (Spencer, Senanayake, Altarawneh, & Ibana, 2024).

En consecuencia, se obtiene carbón activado a partir de los diferentes rangos del carbón, no mayor a bituminosos altos volátiles, acorde con la capacidad de producir porosidad en la activación por lo que se requieren carbones con volátiles y oxígeno. Los carbones *bituminosos* y *subbituminosos* son los más usados, aunque considerando la reactividad a la activación y mayor porosidad se mencionan los de bajo rango como *lignitos* y *sub bituminosos*, aquellos con alto contenido de cenizas pueden ser considerados para activación luego del tratamiento de los residuos (Spencer, Senanayake, Altarawneh, & Ibana, 2024).

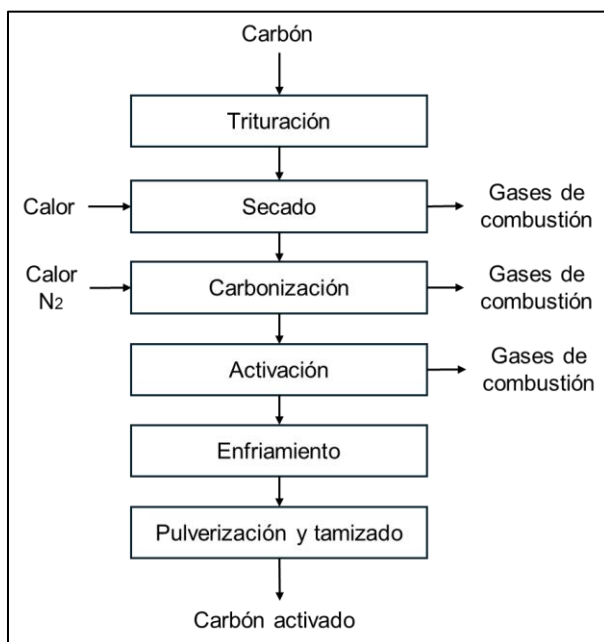
3.3.3. Análisis de la cadena de valor

La producción, la calidad y el rendimiento del carbón activado se ven afectados por el tipo de carbón, su rango, el tamaño de partícula, la composición química y las condiciones del proceso, como el método, la temperatura de activación y los pasos de pretratamiento y postratamiento.

(Spencer, Senanayake, Altarawneh, & Ibana, 2024) cita cuatro métodos básicos para la producción de carbón activado.

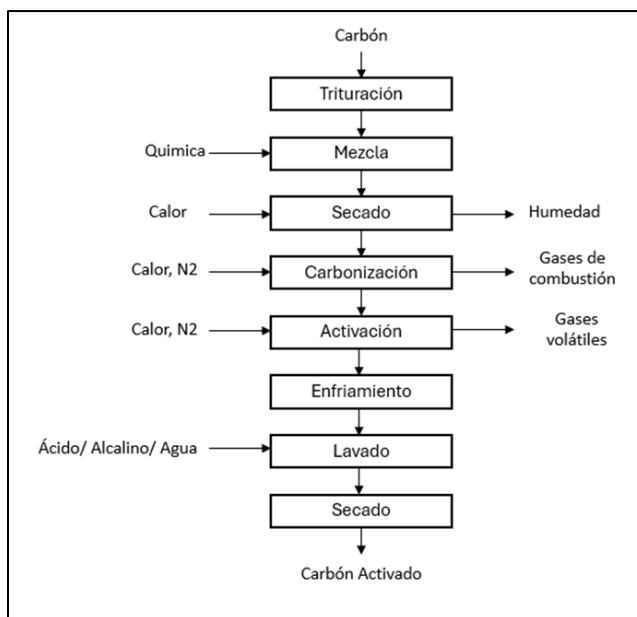
- La activación física - térmica consta de secado, carbonización y activación: el proceso de carbonización se lleva a cabo en una atmósfera inerte con temperatura de 200 - 500°C y 6 a 72 h, posteriormente, el carbón vegetal obtenido se activa mediante un agente de activación como CO₂, vapor o aire a una temperatura de 850 a 1.100 °C. (El Qada, Allen, & Walker, 2008).
- En el proceso de activación química se impregnan las materias primas con diferentes agentes deshidratantes y oxidantes en diferentes proporciones y concentraciones que influyen en la descomposición del carbón y previenen la formación de alquitrán o cenizas antes del tratamiento térmico y, se activa a una temperatura (>500 °C). El proceso de carbonización suele realizarse en ausencia de aire, en el proceso se mejora la micro y mesoporosidad, y el área superficial, lo que la hace eficaz para diversas aplicaciones, como la recuperación de metales y el tratamiento de aguas.
- La activación termoquímica es una combinación de activación térmica y química, el proceso se lleva a cabo a una temperatura más alta que la activación química. El carbón se impregna con una sustancia química adecuada que disuelve la estructura de la celulosa, posteriormente se seca y se activa en presencia de vapor en un horno rotatorio o lecho fluidizado. El producto presenta una amplia gama de distribuciones de tamaño de poro para aplicaciones de supercondensadores de alto rendimiento.
- Subproducto de procesos de reducción: el carbón actúa como combustible y agente reductor en el proceso de reducción. A altas temperaturas, las reacciones del carbono con el óxido de carbono producen monóxido de carbono (CO). Una reacción sólido-gas entre el óxido de hierro y el CO es clave para reducir la ilmenita o el mineral de hierro. Durante este proceso, el carbón se convierte en carbón vegetal, que se activa con el aire o el CO₂, lo que da lugar a la producción de carbón activado como subproducto. El carbón activado producido con este método es un subproducto con alta microporosidad y un índice de yodo superior a 800 mg/g, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de tratamiento de agua. (Australia produce cerca de 27.800 toneladas).

Gráfico 48. Producción de carbón activado por activación física- térmica.



Fuente: editado y traducido a partir de (Spencer, Senanayake, Altarawneh, & Ibana, 2024).

Gráfico 49. Producción de carbón activado por activación Química.



Fuente: editado y traducido a partir de (Spencer, Senanayake, Altarawneh, & Ibana, 2024).

En la aplicación de cada uno de los métodos se analiza la relación entre la temperatura de carbonización y el área superficial resultante BET (Brunauer-Emmett-Teller), el área de microporos, la distribución del

tamaño de poro y el volumen total de poros de los carbones carbonizados y activados a partir de la isoterma de adsorción/desorción de N_2 . (El Qada, Allen, & Walker, 2008).

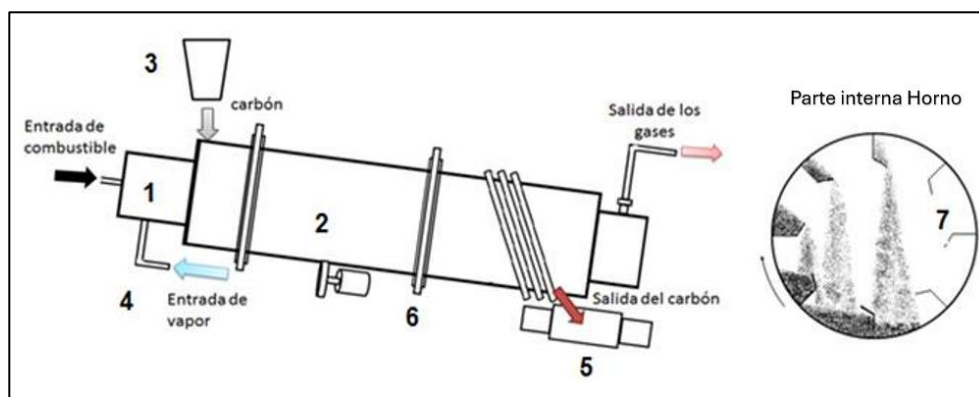
3.3.4. Tecnologías

La cadena de producción del carbón activado a partir del carbón.

A escala industrial para los procesos de carbonización y activación, se emplean comúnmente hornos rotatorios (Rotary Kilns) o reactores de lecho fluidizado. Estas rutas tecnológicas permiten realizar las etapas de carbonización y activación de forma continua, ya que permiten un mayor control de la temperatura y de las condiciones de oxígeno, al permitir el ingreso de vapores o agentes gasificantes.

El horno rotatorio es un cilindro metálico que gira lentamente y se instala con una ligera inclinación con relación a la superficie (15° aproximadamente), con el fin de permitir que el carbón alimentado se mueva a través del horno por gravedad y rotación, garantizando así un calentamiento uniforme de las partículas. El sistema de rotación es controlado por motores, engranajes y/o rodillos, los que aseguran una rotación constante.

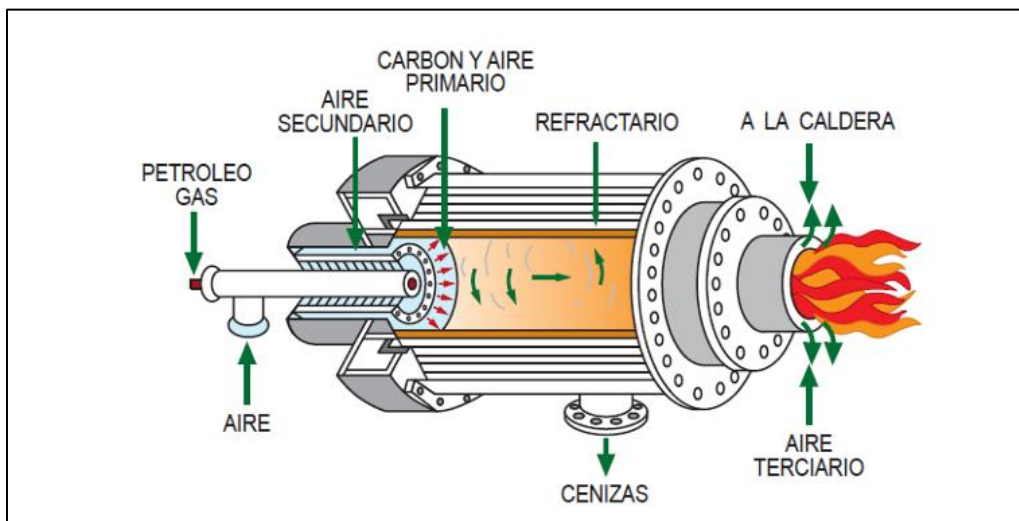
Gráfico 50. Esquema de horno rotatorio para el proceso de carbonización y activación de carbón activado a partir del carbón.



Fuente: (Herrera, 2022).

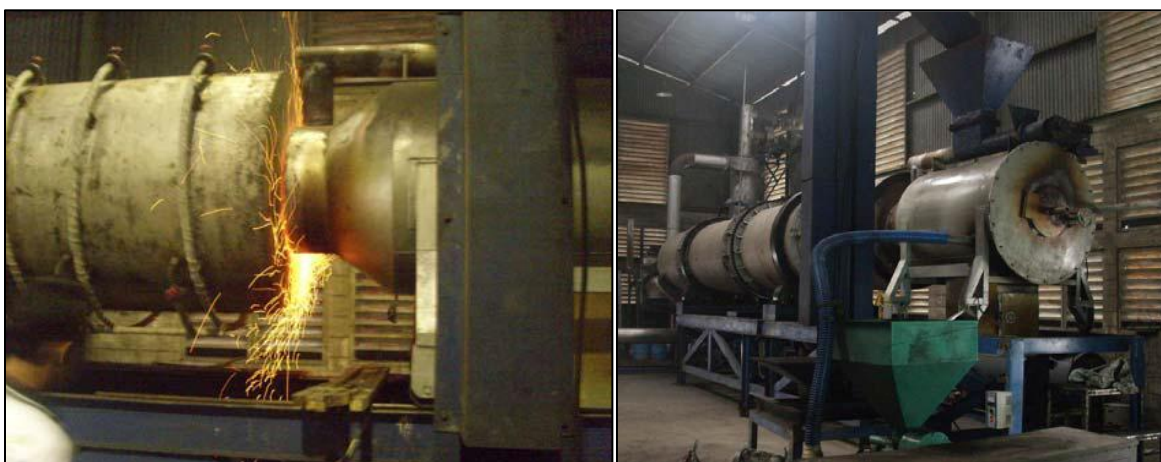
Como fuente de calor o cámara de combustión, se emplea un quemador ciclónico, estos consisten en tecnologías de combustión directa, utilizando combustibles sólidos con tamaños de partícula entre 150 y 300 micras (Herrera, 2022). El carbón pulverizado mezclado con corrientes ciclónicas de aire inyectado, hacen reaccionar rápidamente el carbón liberando los compuestos volátiles que, al mezclarse con el oxígeno, generan la ignición de estos volátiles produciendo una llama larga y estable.

Gráfico 51. Esquema de funcionamiento de quemador ciclónico.



Fuente: (Herrera, 2022).

Gráfico 52. Quemador ciclónico y a la derecha un horno rotatorio industrial para producción de carbón activado.



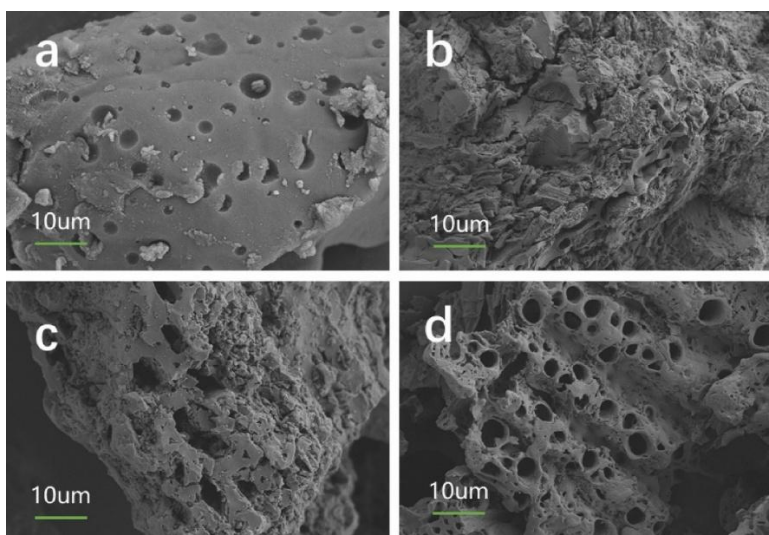
Fuente: (Indonesian Mining Journal, 2011).

Para el proceso de activación, de igual manera han sido ampliamente utilizados los reactores de lecho fluidizado, los cuales son conocidos por permitir un excelente contacto entre las partículas del carbón y los agentes gasificantes inyectados en el reactor (Vapor de agua o CO_2), cuentan con altas tasas de calentamiento y permiten un mayor control de la temperatura en el proceso (Zapata Benabithé, y otros, 2005). Estos reactores son comúnmente utilizados en el proceso de gasificación del carbón y son explicados con mayor detalle en el capítulo de tecnologías asociadas a la gasificación del carbón del presente documento.

Durante los procesos de carbonización y activación se producen unos gases residuales, gases ricos en compuestos combustibles. Con el fin de generar menores impactos ambientales, en la actualidad los avances tecnológicos están enfocados en la gestión eficiente de estos gases residuales, los cuales pueden ser aprovechados como una fuente de energía significativa para un proceso más limpio y de menor huella ambiental. La energía térmica recuperada en los procesos se puede utilizar para generar vapor que abastece las necesidades internas de la planta, pero también puede convertirse en energía eléctrica a través de una turbina de vapor. (Ask-an-engineer GmbH & CO. KG, 2021).

Por último, existen tecnologías asociadas al proceso de caracterización final del carbón activado, que sirven para confirmar las eficiencias del proceso y asegurar la calidad de producción. La caracterización se centra en el estudio de la estructura porosa (área superficial y volumen), la morfología superficial y la composición química. Una de las técnicas más implementadas para la determinación del volumen de poros, y distribución de tamaños de poros es la de adsorción y desorción de nitrógeno. Por otro lado, para poder realizar una caracterización morfológica de la estructura interna, se utilizan las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés), a manera de ejemplo se muestra a continuación un análisis de la morfología microscópica diferenciando un carbón crudo (a), pretratado con ácido (b), carbonizado (c), y su estructura final como carbón activado (d) (Sheng Ming Cheng, 2025).

Gráfico 53. Morfología microscópica SEM. a) Carbón crudo; b) Pretratamiento ácido; c) Carbonización; d) Carbón activado.



Fuente: (Indonesian Mining Journal, 2011).

3.3.5. Marco regulatorio

El marco normativo aplicable al carbón activado en Colombia se compone de un conjunto de regulaciones sectoriales, normas técnicas y estándares internacionales que, aunque no conforman una legislación específica para este material, sí establecen los requisitos esenciales para su producción, calidad, comercialización y uso en sectores críticos como el del agua potable, la industria alimentaria, los procesos petroquímicos y el tratamiento de aguas residuales.

Complementariamente, normas como las NTC de ICONTEC, los estándares AWWA, ASTM e ISO proporcionan los criterios técnicos que garantizan la calidad del adsorbente, su desempeño y su seguridad

en operaciones industriales y de consumo humano. Este conjunto articulado de disposiciones constituye la base regulatoria para el desarrollo, innovación y uso responsable del carbón activado en Colombia.

3.3.6. Marco legal

A continuación, se describe el marco legal asociado al carbón activado agrupándolo en tres componentes, el primero asociado a agua potable y saneamiento, el segundo respecto a la regulación sanitaria y el tercero en cuanto a la temática ambiental:

➤ Regulación nacional sobre agua potable y saneamiento

El Decreto 1575 de 2007 establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano, lo que implica que cualquier medio filtrante (como el carbón activado) debe cumplir estándares que garanticen la potabilidad y seguridad del agua.

El Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) establecido mediante la Resolución 330 de 2017 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, y dentro de sus exigencias técnicas incluye criterios para el uso de carbón activado en filtros, su regeneración, dosificación y operación según tipos de carbón (granular, pulverizado).

➤ Regulación sanitaria y vigilancia del carbón activado para consumo humano.

En el contexto de aditivos o de uso del carbón activado en la industria alimentaria, como un componente que puedan entrar en contacto con alimentos o productos farmacéuticos, aplica la Resolución 2606 de 2009 del Ministerio de la Protección Social, que regula aditivos alimentarios y sus requisitos sanitarios; si el carbón activado se usa como aditivo o medio en procesos alimentarios, debe cumplir este reglamento.

➤ Regulaciones ambientales aplicables al control de emisiones en la producción de carbón activado.

Resolución 909 de 2008 – Establece los límites máximos permisibles de emisiones atmosféricas para fuentes fijas, incluyendo material particulado, SO₂, NO_x, CO y compuestos orgánicos derivados de procesos térmicos. Aplica directamente a hornos de carbonización y unidades de activación.

Resolución 2254 de 2017 – Actualiza y complementa los estándares de emisiones de la Resolución 909 de 2008, ajustando límites y metodologías de medición para fuentes fijas.

Decreto 1076 de 2015 (Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente) – Compila las normas ambientales, incluyendo permisos de emisiones atmosféricas, licencias ambientales cuando aplique, y requisitos de seguimiento y reporte ante las autoridades ambientales.

3.3.7. Normalización técnica

En cuanto a normas técnicas aplicables al carbón activado, a continuación, se enuncian algunas de ellas agrupadas en normas técnicas colombianas y normas internacionales.

➤ Normas colombianas específicas para carbón activado

ICONTEC NTC 4273:1997: Norma técnica para carbón activado granulado, usada como medio de adsorción en agua potable e industrial. Define requisitos de calidad y métodos de ensayo.

ICONTEC NTC 4467:1998: Métodos de ensayo para carbón activado de uso industrial, lo que asegura que las mediciones de parámetros claves como densidad aparente, contenido de humedad, dureza, cenizas, etc., estén normalizadas.

➤ **Normas internacionales de calidad para carbón activado.**

Teniendo en cuenta que muchas aplicaciones industriales de carbón activado requieren de mayores estándares, es común referirse a normas internacionales para garantizar su calidad técnica de acuerdo con su uso.

AWWA B604-18 (Granular Activated Carbon): estándar de la American Water Works Association para carbón activado granular usado en filtros de agua. Define criterios para su uso como adsorbente y medio de filtración.

ASTM Standards del Comité D-28 (Carbón activado): incluyen métodos de ensayo para distribución de tamaño de partículas (ASTM D2862), número de yodo (ASTM D4607), dureza, humedad, contenido de cenizas, entre otros.

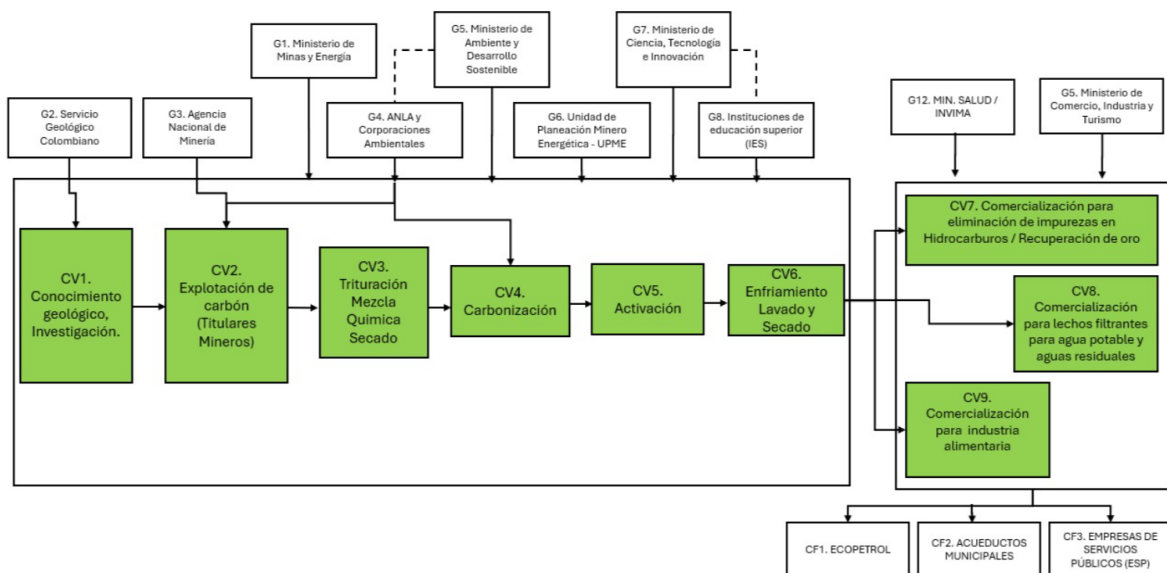
ISO 21340:2017: establece métodos de prueba para carbón activado fibroso (fibrous activated carbon), midiendo propiedades como área superficial, volumen de poros, pérdida de masa por secado, contenido de ceniza, pH, y adsorción de compuestos modelo como tolueno o azul de metileno.

ISO 176:1976: método para determinar la migración de plastificantes desde plásticos en presencia de carbón activado — relevante para aplicaciones donde el carbón activado está en contacto con polímeros o materiales plásticos.

3.3.8. Mapeo de actores

Al igual que el caso del diagrama de mapeo de actores para la producción de hidrógeno, se identificaron actores gubernamentales y los relacionados con las actividades de soporte. Los consumidores finales de carbón activado (CF1–CF3), representan la demanda directa del carbón activado en aplicaciones críticas. Ecopetrol (CF1) se destaca como un consumidor principal debido a su uso intensivo en procesos de refinación, purificación de corrientes de hidrocarburos, remoción de contaminantes orgánicos, lo que requiere carbones activados con alta área superficial, microporosidad controlada y estabilidad térmica. Los acueductos municipales (CF2) emplean este material en lechos filtrantes para mejorar la potabilización mediante la remoción de olores, sabores y materia orgánica disuelta. Las empresas de servicios públicos (CF3) lo utilizan en sistemas de tratamiento de aguas residuales, donde su capacidad adsorbente permite remover compuestos emergentes y contaminantes industriales. Esta distribución de actores evidencia la relevancia estratégica del desarrollo nacional de adsorbentes de alta eficiencia.

Gráfico 54. Diagrama Mapeo de actores cadena productiva del carbón activado.



Fuente: elaboración propia.

3.4. Uso no convencional del carbón: hidrógeno

El hidrógeno (H_2) es considerado un vector energético clave para la transición energética y la descarbonización en Colombia. Su uso tiene el potencial de incrementar la flexibilidad de una futura red eléctrica con alta participación de energías renovables, aumentar la seguridad energética y disminuir los impactos ambientales generados por otros portadores de energía.

La inserción del H_2 en los sectores económicos con mayores emisiones de Gases de Efecto Invernadero - GEI, representa un gran potencial para el cumplimiento de las metas de mitigación del país.

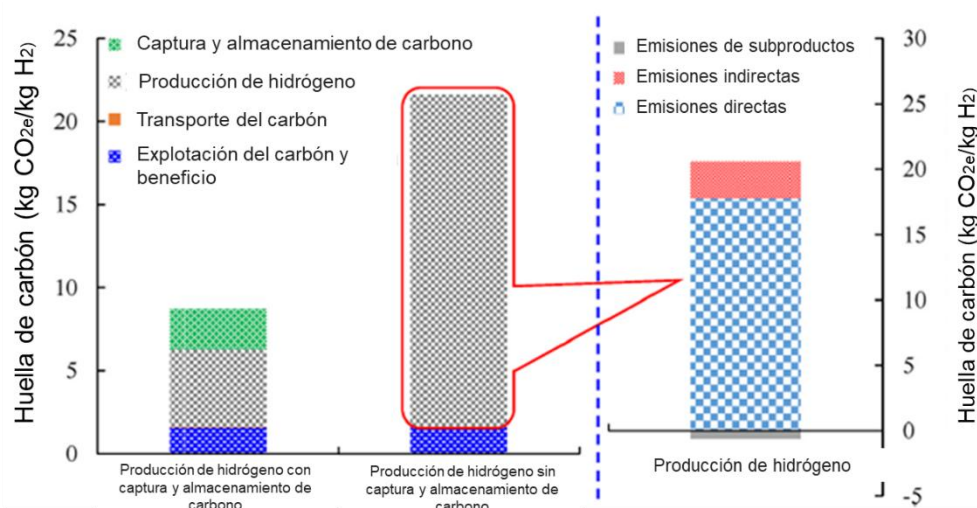
Una breve reseña del hidrógeno obtenido a partir de la gasificación del carbón se centra en lo que representa China a nivel mundial, como el país mayor productor y consumidor de carbón, aproximadamente el 70 % del carbón consumido se utiliza para la generación de energía eléctrica. Adicionalmente, considerando que las centrales eléctricas representaron aproximadamente el 40 % de las emisiones de CO_2 del país (año 2022), se ha planteado como objetivo de neutralidad de carbono la reducción de emisiones, lo que va de la mano con el desarrollo de tecnologías con bajas emisiones de carbono, lo que implica su captura, y de esta manera sumar a la eficiencia energética del país. (Wei, y otros, 2024).

La producción de hidrógeno basado en el carbón es un hecho muy interesante en los países que cuentan con el recurso natural por su bajo costo; en el caso de China esta producción fue de 33,4 Mt en 2019, 34 Mt/año en 2020 aportando en sectores como el transporte, el acero y la energía, ya que puede utilizarse como portador energético eficiente, combustible y agente reductor. (IEA, 2021), (Li, Wei, Liu, Li, & Yan, 2022).

Considerando que la economía mundial se encuentra en un período de transición hacia una economía verde y baja en carbono, en el escenario de desarrollo sostenible, la demanda mundial de hidrógeno puro aumentará a 520 Mt en 2070, lo que representa el 13 % de la demanda energética final y, particularmente en China la demanda prevista es de más de 90 Mt e incluso podría alcanzar las 130 Mt en 2060 (IEA, 2021). (Li, Wei, Liu, Li, & Yan, 2022).

En la búsqueda de una economía verde, baja en emisiones de CO₂, varios países han realizado estudios de la huella de carbono para producir hidrógeno mediante la gasificación del carbón, considerando cuatro procesos: minería de carbón, transporte, producción de hidrógeno y captura y almacenamiento de carbono de acuerdo con las diferentes tecnologías, adicionalmente, analizaron parámetros tales como la presión, la temperatura, el catalizador, el tipo de carbón, la configuración del reactor y el tipo de agente de gasificación.

Gráfico 55. Huella de carbono de producción de hidrógeno a partir de carbón.



Fuente: Editado y traducido de (Li, Wei, Liu, Li, & Yan, 2022).

Los intervalos de la huella de carbono fueron considerados en algunos casos de acuerdo con el rango del carbón, tecnología y/o captura y almacenamiento de CO₂. Se aprecia que, respecto al rango del carbón, los más inmaduros presentan menores emisiones y, así mismo, cuando se cuenta con el sistema de captura y almacenamiento del gas es considerable la disminución de la huella de carbono.

Tabla 11. Huella de carbono a partir de la producción de hidrógeno con y sin captura de CO₂ China.

País	Sin captura CO ₂ eq/kg H ₂	Con Captura CO ₂ eq/kg H ₂	Rango de Carbón	Tecnología	Fuente
Alemania	23,1				(Li, Wei, Liu, Li, & Yan, 2022)
Estados Unidos	20,39	18,58			(Energy, 2022)

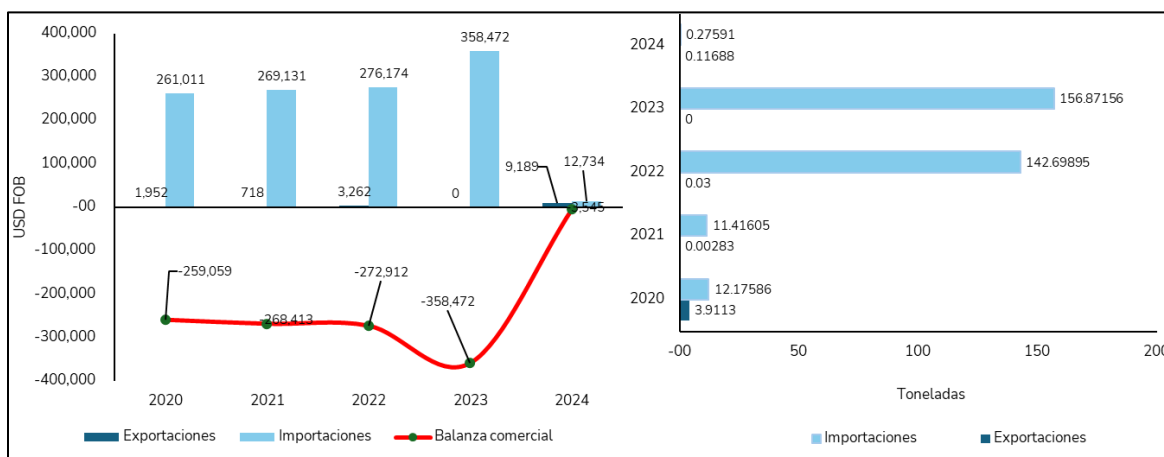
País	Sin captura CO ₂ eq/kg H ₂	Con Captura CO ₂ eq/kg H ₂	Rango de Carbón	Tecnología	Fuente
China	17,8- 21,6	11,8			(Li, Wei, Liu, Li, & Yan, 2022), (Council, 2021)
Polonia	21,7	5,21	Lignito	Texaco	(Burmistrz, Chmielniak, Czepirski, & Gazda- Grzywacz, 2016)
	19,42	4,14	Lignito	Shell	
	25,28	7,14	Bituminoso	Shell	

Fuente: elaboración propia a partir de (Li, Wei, Liu, Li, & Yan, 2022).

3.4.1. Información comercio exterior de Colombia.

La demanda de hidrógeno en Colombia entre 2020 y 2024 se ve reflejada en una balanza comercial deficitaria, acumulando un saldo negativo de 1,16 millones de dólares, a pesar de que se registraron exportaciones en casi todos los años, excepto en 2023 (ver gráfico 43). Un aspecto notable es la significativa contracción de las importaciones en 2024, las cuales disminuyeron en un 96,45 % respecto a períodos anteriores, totalizando 345.738 dólares FOB. Este panorama de déficit comercial se presenta en un contexto donde, según la Asociación Hidrógeno Colombia, el país está desarrollando activamente 27 proyectos enfocados en la producción de hidrógeno.

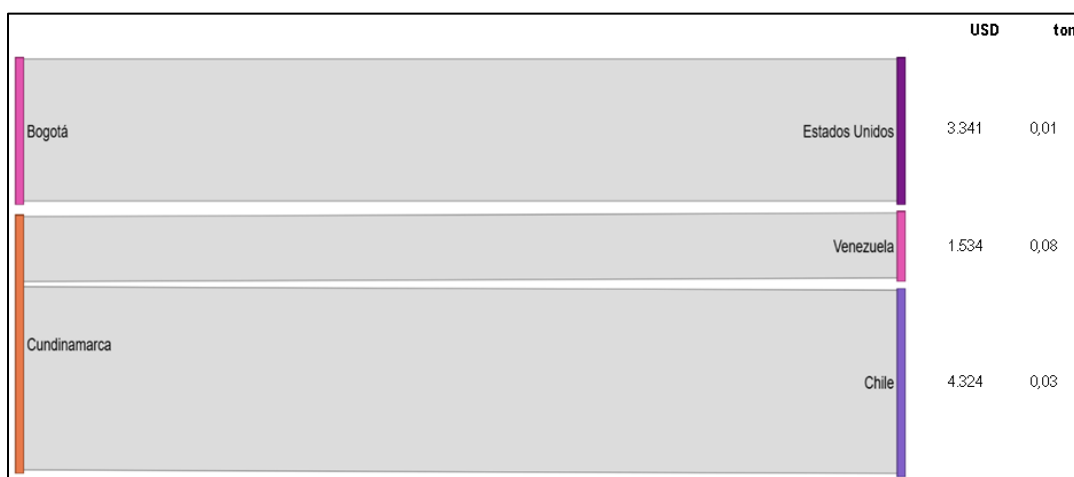
Gráfico 56. Comercio exterior colombiano de hidrógeno, 2020- 2024.



Fuente: elaboración propia a partir de maro.com.co. Subpartida arancelaria 2804100000 – hidrógeno.

En cuanto a las exportaciones de hidrógeno para el año 2024, estas se originaron exclusivamente desde Bogotá y Cundinamarca, dirigidas hacia tres naciones del continente americano. Bogotá contribuyó con 3,341 dólares FOB, lo que representa el 36,36 % del total exportado, mientras que el departamento de Cundinamarca lideró con 5.848 dólares FOB, abarcando el 63,64 % restante. Esta concentración geográfica de las exportaciones sugiere una incipiente cadena de suministro localizada en estas regiones.

Gráfico 57. Destino de las exportaciones de Hidrógeno, 2024.



Fuente: elaboración propia a partir de Mapa Regional de Oportunidades maro.com.co. Subpartida arancelaria 2804100000 – hidrógeno.

Por otro lado, las importaciones de hidrógeno en 2024 provinieron de solo dos países, destacando Bélgica como el principal proveedor con 12.042 dólares FOB, que constituyó el 94,57 % del total, seguido por Estados Unidos con 692 dólares FOB (5,43 %). La totalidad de estas importaciones tuvo como destino Bogotá.

Gráfico 58. Origen de las importaciones de Hidrógeno, 2024.



Fuente: elaboración propia a partir de Mapa Regional de Oportunidades maro.com.co. Subpartida arancelaria 2804100000 – hidrógeno.

Si bien el precio promedio de exportación por tonelada de hidrógeno superó al de importación en los años 2021, 2022 y 2024, se observa una marcada tendencia a la baja en el precio de exportación, con una disminución del 68,99 % entre 2021 y 2024, lo que podría afectar la competitividad de las futuras exportaciones colombianas de este energético.

Tabla 12. Precio promedio exportaciones e importaciones de hidrógeno, 2020 – 2024.

Precio promedio USD FOB/tonelada	2020	2021	2022	2023	2024
Exportación	499	253.541	108.745	-	78.620
Importación	21.437	23.575	1.935	2.285	46.154

Fuente: elaboración propia a partir de Mapa Regional de Oportunidades maro.com.co. Subpartida arancelaria 2804100000 – hidrógeno.

3.4.2. Materia prima

La eficiencia del proceso de gasificación depende del tipo del carbón y la tecnología utilizada, lo que se ve reflejado en la eficiencia de conversión, la composición del gas producido (H_2/CO), facilidad de manejo y costos.

Los carbones de menor rango (*lignitos y subbituminosos*) (Jiang, y otros, 2018) son considerados los óptimos en la producción de hidrógeno por gasificación, aunque también se contemplan los carbones bituminosos con alta volatilidad, teniendo en cuenta variables tales como:

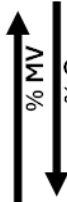
► **Poder calorífico:** los carbones ricos en carbono o de mayor rango requieren mayor energía para liberar los volátiles, romper estructura, volatilizar componentes, iniciar reacciones y tener buena conversión, lo que puede bajar la eficiencia del proceso o requerir temperaturas más altas o tiempos mayores.

► **Reactividad:** la reactividad del carbón está influenciada por el grado de carbonización, la composición orgánica (macerales), contenido de materia mineral, porosidad del carbón y el área superficial (Keboletse, Ntuli, & Oladijo, 2021). Los carbones con alta reactividad presentan estructura amorfa y de poros más abiertos, tienen más superficie interna y más "sitios activos" disponibles para la reacción con los agentes gasificantes (agua y oxígeno), lo que permite que la oxidación ocurra a mayor velocidad y con mayor eficiencia. La reactividad del lignito crece con el aumento de temperatura, esto se debe a la alta concentración de grupos funcionales oxigenados, la mayor cantidad de macroporos y la distribución de los componentes inorgánicos catalíticos. Los carbones con baja área superficial y porosidad presentan baja reactividad. (Smolinski, Wochna, & Howaniec, 2022). Algunas características relacionadas corresponden a:

- **Tamaño de partículas de carbón:** las partículas de gran tamaño tienden a reducir la reactividad del carbón y, por lo tanto, la calidad del gas de síntesis. Por otro lado, las partículas finas de carbón reducen la conversión de carbono, disminuyendo así la producción de gas de síntesis (Keboletse, Ntuli, & Oladijo, 2021).
- **Aglomeración e hinchamiento del carbón:** la formación de la fase aglomerada afecta la reactividad, puede interrumpir los patrones de flujo del gas y, por lo tanto, reducir la eficiencia térmica, la tendencia a aglomerarse disminuye en cuanto disminuye el contenido de materia volátil (Keboletse, Ntuli, & Oladijo, 2021).

- **Rendimiento de hidrógeno:** temperaturas de operación elevadas (700-900 °C o más) favorecen rendimientos de hidrógeno; ya que la generación de H₂ o de conversión total se logran en ese rango térmico.
- **Contenido de cenizas:** altas cenizas reducen la eficiencia, absorben calor, generan residuos, pueden catalizar o inhibir dependiendo de su composición, aumentan pérdidas, así como el contenido de azufre incide en el rendimiento de H₂. Al gasificar carbones de bajo rango, la temperatura de operación debe ser inferior a la temperatura a la que se fusiona la ceniza para evitar la formación de depósitos fundidos, mientras que, para carbones de alto rango, la temperatura de operación debe ser superior a la temperatura a la que se produce la fusión de la ceniza.
- **Contenido de materia volátil:** en la medida que el carbón es más rico en volátiles requiere menor temperatura para reaccionar, lo que favorece el proceso de gasificación (formación de gases). Mayor cantidad de materia volátil aumenta la reactividad del carbón, ya que reduce la energía de activación (Keboletse, Ntuli, & Oladijo, 2021).

Gráfico 59. Eficiencia del proceso de gasificación.



Tipo de carbón	Reactividad	Rendimiento de H ₂	Contenido de cenizas
Lignito	Muy alta	Alta	Alta
Sub-bituminoso	Alta	Alta	Media
Bituminoso	Media	Media	Baja-media
Antracita	Baja	Baja	Muy baja

Fuente: elaboración propia.

Respecto al lignito, se considera que causa encogimiento y cracking de las partículas, produciendo polvo de char, (residuo sólido del proceso de gasificación) reduciendo la eficiencia térmica del proceso de gasificación, por lo que es importante considerar la tecnología a utilizar (Blandón, El carbón y sus posibilidades de uso, 1999), (Rincón, Camacho, & Polanía, 1993).

En Colombia, se han realizado estudios de estimación de potencial de hidrógeno, basados en la cantidad de carbón disponible, supuestos de eficiencia y disponibilidad tecnológica en gasificación, con resultados acorde con la literatura en este tema. (Castiblanco & Milquez, 2021).

Carbones del centro de Boyacá (Cogua- Samacá y Tunja, Paipa, Duitama) clasificados como lignitos y subbituminosos fueron sometidos a gasificación obteniendo resultados viables para producir gas de síntesis. Para minimizar los contenidos de CO₂ y N₂, incrementando CO e H₂, se propuso utilizar vapor de agua. (Ardila, López, Triviño, Molina, & Barragán, 2018).

3.4.3. Análisis de la cadena de valor

La cadena de valor del hidrógeno se inicia con la explotación de la materia prima, etapa en la cual se define el rango del carbón a utilizar. Posteriormente, el carbón es sometido a un proceso de gasificación bajo condiciones controladas, con el fin de obtener gas de síntesis (H_2 , CO y CO_2), posteriormente, se realiza la separación y purificación del hidrógeno, para finalmente proceder con su transporte y almacenamiento.

Un elemento crítico dentro de esta cadena es la integración de la captura, transporte y almacenamiento de CO_2 (CCS), la cual se considera un paso fundamental y una solución transitoria para promover el desarrollo de una economía del hidrógeno con menores emisiones.

El dióxido de carbono (CO_2) forma parte del gas de síntesis y presenta diversas aplicaciones industriales. Entre ellas se destacan la conservación de alimentos, la limpieza en seco, el tratamiento de aguas y el teñido de tejidos de poliéster. Asimismo, el CO_2 es utilizado en procesos de extracción para la obtención de aceites esenciales destinados a la industria alimentaria y cosmética, así como de aromas alimentarios, pigmentos, antioxidantes y principios activos para los sectores nutracéutico y farmacéutico (CQM Consultoría SAS, 2022).

- **Separación y purificación:** respecto a estos procesos, es esencial hablar de los procesos de limpieza de impurezas del gas de síntesis, estos se pueden dar en diferentes etapas, posterior a la reacción WGS (por sus siglas en inglés de *Water-Gas Shift*) por medio de un sistema de remoción de gases ácidos, en donde se añaden unidades de compresión y deshidratación del CO_2 . Dependiendo del tipo de gasificador implementado en el proceso, comúnmente entre el 3 - 10 % del azufre presente en el carbón, se convierte en un gas incoloro e inflamable denominado sulfuro de carbonilo (COS). El gas ácido presente en el gas de salida del gasificador de carbón consiste principalmente en H_2S , COS y CO_2 . El H_2S y el COS están presentes en niveles de trazas, típicamente 100 ppm y 10 ppm, respectivamente, mientras que el CO_2 está presente en un rango porcentual de 5 - 15 % (Government of India, 2022). Los procesos establecidos para la eliminación de gas ácido se basan en solventes, que pueden ser solventes físicos o solventes químicos.

La selección del solvente depende directamente de las condiciones de operación y el producto objetivo. Los solventes químicos (aminas) son más efectivos a baja presión parcial del gas ácido y operan eficientemente a temperatura ambiente. Por el contrario, los solventes físicos requieren una alta presión en el gas de síntesis y una baja temperatura operativa (a menudo con refrigeración) para lograr una buena separación y suelen ser de 2 a 3 veces más costosos que los sistemas de base química.

Por último, el gas de síntesis limpio ingresa a la unidad de Adsorción por Variación de Presión (PSA) para la purificación final. La presión separa los componentes del gas mediante lechos adsorbentes (zeolitas o carbón activado), produciendo hidrógeno (H_2) de alta pureza (mayor al 99,5 %). Este proceso genera inevitablemente una corriente residual de baja presión conocida como gas de cola del PSA, dicho gas aún contiene hidrógeno que puede ser capturado mediante un dispositivo de captura auxiliar (Government of India, 2022).

- **Captura y almacenamiento de CO_2 :** una vez capturado, el dióxido de carbono debe ser utilizado o almacenado para evitar su reemisión a la atmósfera. El almacenamiento permanente implica inyectar y atrapar el CO_2 en formaciones geológicas estables a determinadas profundidades, como depósitos agotados de gas y petróleo.

Actualmente, se han considerado otros métodos de captura y almacenamiento como de la mineralización de carbono en peridotitas, komatiitas y basaltos ya que tienen un enorme potencial para almacenar CO₂ y requieren un tiempo mínimo para convertir el gas inyectado en carbonatos sólidos, en España se tritura la roca para aumentar su exposición y obtienen nanomateriales que son utilizados como materiales de construcción. La primera planta funciona en Islandia, retirando 4.000 toneladas de CO₂ por año a través de filtros que toman el aire del ambiente y capturan el CO₂. (BBC News Mundo, 2024); (Kamnitzer, 2024), (USGS, 2019), (Clickmania, 2021), (ESingeniería, s.f.).

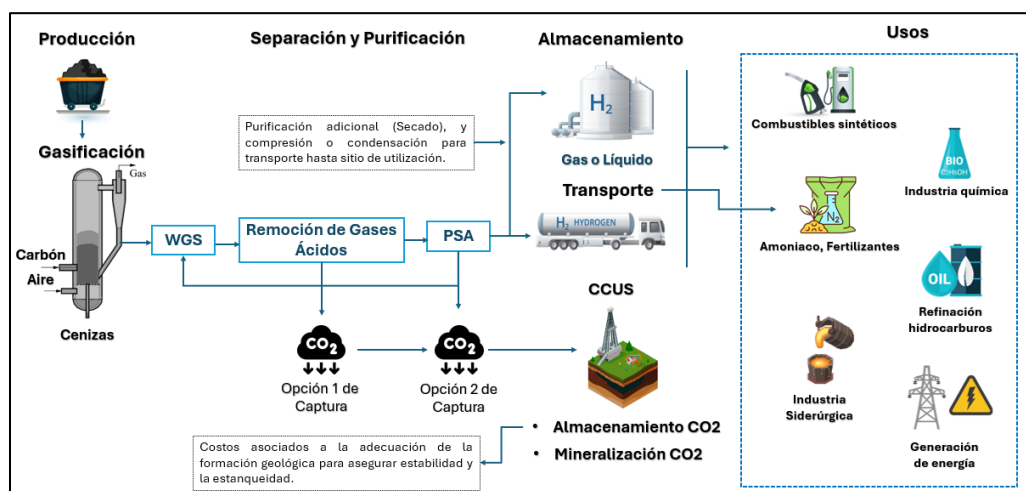
Finalmente, en los procesos de captura y almacenamiento de CO₂ se requiere una evaluación específica del potencial de almacenamiento de la unidad receptora. En caso de realizar la inyección, esta debe llevarse a cabo en sitios técnicamente adecuados, considerando propiedades como la porosidad, la permeabilidad, el área efectiva, el entorno geológico, la temperatura, la presión y el régimen de tensiones. En particular, para la técnica de mineralización de carbono se identifica que la velocidad y el grado de disolución mineral constituyen factores críticos, ya que determinan la eficiencia del almacenamiento de CO₂ en el basalto. (Kumar, Nayak, & Vishal, 2024).

- **Almacenamiento:** el almacenamiento del hidrógeno puede realizarse en estado líquido, para lo cual se requiere enfriarlo a una temperatura criogénica de -258,8 °C, y en estado gaseoso, es necesario mantener altas presiones entre 35 a 70 MPa (350 a 700 bares).

El hidrógeno puede ser transportado en vehículos de transporte de carga, tuberías, o por medio de un portador de hidrógeno. Los portadores de hidrógeno son sustancias enriquecidas dentro de su estructura con hidrógeno, que permanecen en forma de líquido a temperaturas y presiones de ambiente, haciendo más fácil su transporte. Los portadores de hidrógeno más utilizados son el amoníaco (NH₃) y el metanol (CH₃OH).

El amoníaco, como portador de hidrógeno, presenta múltiples ventajas. Entre ellas se destaca su densidad de energía volumétrica, cercana al doble de la del hidrógeno licuado. Adicionalmente, puede emplearse directamente como combustible sin necesidad de reconvertirlo en hidrógeno, proceso que implica pérdidas de H₂, un elevado consumo energético y, en consecuencia, la generación de emisiones adicionales (ICSC, 2023).

Gráfico 60. Proceso de producción de hidrógeno con captura y almacenamiento de CO₂.



Fuente: editado a partir de (CQM Consultoría SAS, 2022).

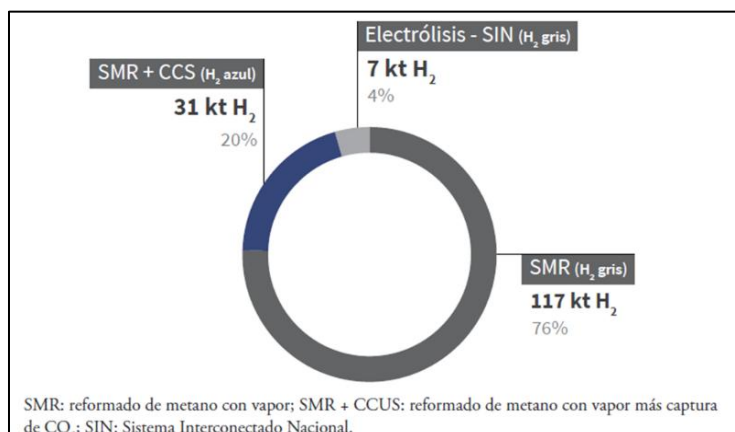
3.4.4. Usos y aplicaciones del hidrógeno:

- Sector de la refinación: la utilización de hidrógeno en el contexto de las operaciones de refinación está esencialmente ligado al proceso de convertir hidrocarburos pesados en productos ligeros y de alta calidad. En los últimos años la demanda de hidrógeno en este sector ha aumentado, esto se debe a diferentes factores entre los que se encuentran la disminución de la calidad del crudo, al aumentar su relación C:H se vuelve más pesado, y al presentar características más ácidas por altos contenidos de sulfuros (Government of India, 2022).
En Colombia las dos principales refinerías de petróleo operadas por ECOPETROL S.A., utilizan hidrógeno principalmente para su consumo interno en procesos de refinación. En la Refinería de Cartagena, su uso está asociado a los procesos de hidrorruptura de gasóleos y de hidrotratamiento (HDT) de gasolina y diésel, contribuyendo a mejorar la calidad de los combustibles producidos, mientras que, en la Refinería de Barrancabermeja, adicionalmente se produce gasolina de aviación (CQM Consultoría SAS, 2022).
- Síntesis de amoníaco: se utiliza principalmente para producir fertilizantes, como la urea y el nitrato de amonio. Anualmente se producen alrededor de 183 millones de toneladas de amoníaco en el mundo, y casi la totalidad se genera a partir de combustibles fósiles: gas natural (72 %), carbón (22 %), nafta e hidrocarburos pesados.
La síntesis se realiza mediante el proceso Haber-Bosch que conlleva condiciones específicas de alta presión y temperatura en la proporción estequiométrica de 1:3 (N_2 : H_2) (IRENA & AEA, 2022).
- En siderurgia (DRI): el proceso consiste en eliminar el oxígeno del mineral de hierro utilizando agentes reductores como el carbono o el hidrógeno, mientras que fundentes eliminan impurezas como la alúmina y la sílice. Este proceso requiere una intensa fuente de calor tanto para la reacción como para fundir el metal. En el mundo se emplean principalmente dos rutas, la ruta primaria (BF-BOF), que produce más del 70 % del acero mundial, y la ruta secundaria basada en chatarra o reducción directa del hierro DRI.
- Sin embargo, el uso intensivo de carbono en la ruta primaria ha convertido al sector en el mayor emisor industrial, contribuyendo con el 7 - 9 % de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global. Por ello, los esfuerzos de descarbonización se centran en el hidrógeno como reductor alternativo. Aunque el hidrógeno puro aún no es comercial, una parte del acero ya se produce con gas natural o gas de síntesis, que contienen en menor proporción hidrógeno (50 - 60 %) acompañado con monóxido de carbono, creando una prometedora ruta de transición hacia una siderurgia más limpia. (Government of India, 2022).

3.4.5. Producción de hidrógeno en Colombia.

De acuerdo con el estudio realizado por expertos de la Universidad de la Sabana (Cobo, Barraza, Cantillo, & Uribe, 2022), el país produce 155 kt anuales de hidrógeno distribuidas en tres grandes grupos: 84 % para aplicaciones en refinerías, 12 % para producción de fertilizantes y 4 % para otras industrias. En esta producción no se utiliza el carbón como materia prima, ya que se produce en un 96 % por reformado con vapor de gas natural (SMR), (76 % gris y 20 % azul) y 4 % en hidrógeno azul a través de electrólisis con energía del Sistema Interconectado Nacional.

Gráfico 61. Distribución de producción de hidrógeno en Colombia por tecnología.



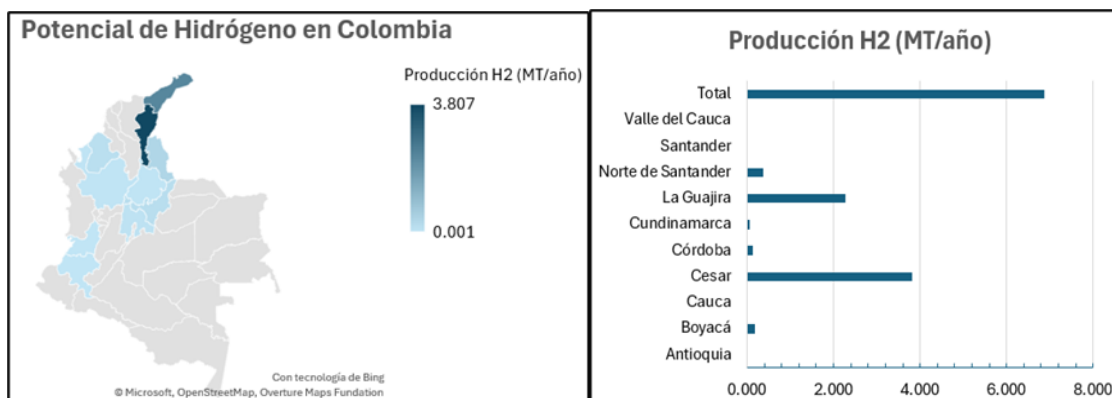
Fuente: (Cobo, Barraza, Cantillo, & Uribe, 2022).

El hidrógeno azul es visto como un paso transitorio para impulsar una economía del hidrógeno y complementar la demanda que el H₂ verde no pueda cubrir en el mediano plazo. La producción de hidrógeno a partir de carbón se presenta como un uso no convencional para el sector minero, ya que se ha proyectado una reducción en el consumo global.

Colombia presenta un potencial significativo para la producción de hidrógeno a partir de sus reservas de carbón, no obstante, para realizar una estimación del potencial nacional de producción se requiere la evaluación de la calidad de la materia prima, así como su función estratégica en otros sectores industriales como el siderúrgico.

Por tanto, el aprovechamiento de los carbones térmicos, ampliamente distribuidos y con mayores volúmenes de reservas, representa una alternativa más realista y sostenible para proyectar el potencial de producción de hidrógeno en Colombia.

Gráfico 62. Potencial de producción de hidrógeno en Colombia a partir de carbón térmico en el año 2024.



Fuente: elaboración propia.

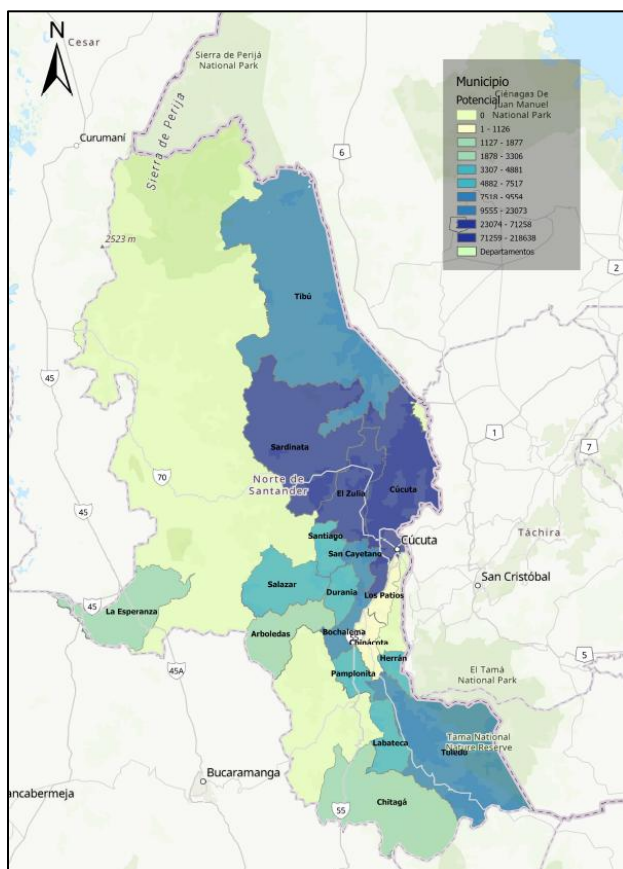
Considerando una tasa de conversión de carbón a hidrógeno igual a 0,13 kg H₂/kg carbón, y que la explotación de carbón térmico en Colombia, según datos ANM al 31 de octubre de 2025, fue de 53,4 Mt para el año 2024, se estimó que la producción potencial de hidrógeno en el país podría ser del orden de 6,88 Mt/año, lo que representaría aproximadamente el 62 % del consumo registrado en los Estados Unidos durante el 2020 (11 Mt de H₂), siendo este uno de los países con mayor producción y consumo de hidrógeno en el mundo, el cual es usado principalmente en el sector de la refinación de hidrocarburos y de síntesis de amoníaco (ICSC, 2023).

► Producción estimada de hidrógeno en Norte de Santander

Acorde con lo mencionado anteriormente, se realizó una estimación cálculo preliminar para el departamento de Norte de Santander, en el cual la minería de carbón tiene un papel muy importante en su economía; en cuanto a la clasificación de la minería, el 87 % de esta actividad corresponde a pequeña, el 11,7 % a mediana y el 1,3 % a gran minería.

En cuanto a información sobre recursos y reservas en el departamento, al considerar la información reportada a la ANM al 31 de marzo de 2025 bajo el ECRR, relacionada con de 28 títulos mineros de carbón coquizable y 52 títulos de carbón de uso térmico, se calculan recursos y reservas por 467 Mt, de las cuales 274 Mt corresponden a carbón de uso térmico y 193 Mt a carbón de uso metalúrgico; por el volumen de recursos y reservas se destacan los municipios de Sardinata, Cúcuta y Zulia.

Gráfico 63. Potencial de producción de hidrógeno en Colombia a partir de carbón térmico en el año 2024.



Fuente: elaboración propia a partir de datos ANM.

De 3,86 Mt de carbón explotadas en el año 2024, se exportaron 1,53 Mt de uso térmico y 0,70 Mt de carbón de uso metalúrgico. Como un hipotético, a partir del total del volumen explotado y, sin diferenciar el volumen exportado, se realizó el Diagrama Sankey. El diagrama muestra el balance de masa inicial que detalla la conversión de carbón a hidrógeno, obteniendo una producción total de 0,5 Mt aproximadamente. En la obtención de estos resultados se consideró el Factor de Rendimiento de 0,13 - 0,16 kg de hidrógeno/kg de carbón (Cobo, Barraza, Cantillo, & Uribe, 2022).

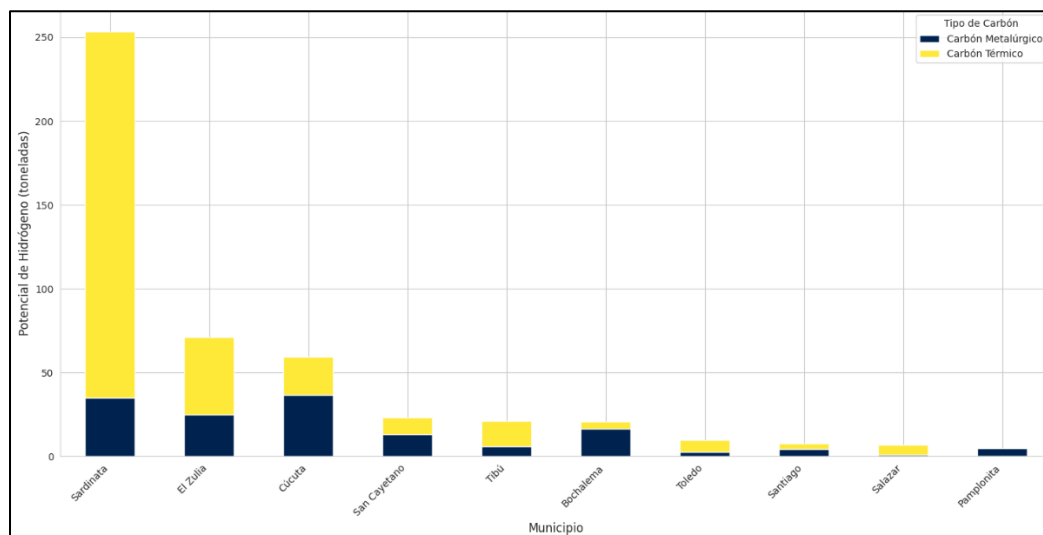
Gráfico 64. Diagrama Sankey (Norte de Santander).



Fuente: elaboración propia.

La distribución de la producción estimada e hidrógeno por municipio en el departamento se detalla en el siguiente gráfico:

Gráfico 65. Producción de hidrógeno por municipio en Norte de Santander.



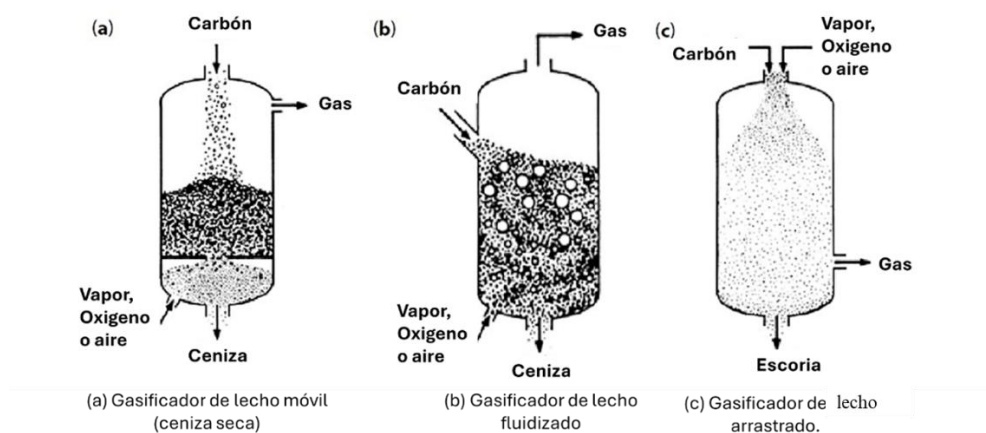
Fuente: elaboración propia.

3.4.6. Tecnologías

Existen diferentes gasificadores en el mercado para la obtención de hidrógeno, sus diferencias radican en: 1) la forma de incorporar el carbón y los agentes oxidantes (vapor, oxígeno o aire) en los gasificadores, 2) los rangos de temperaturas, 3) la presión utilizada y 4) la forma en la que se aplica el calor, que puede ser por combustión parcial de la materia prima o por una fuente externa (Speight, Handbook of Gasification Technology Science, Processes, and Applications, 2020).

Los gasificadores se clasifican en tres categorías principales: lecho fijo, lecho fluidizado y lecho arrastrado, de acuerdo con el método de contacto entre el carbón y los agentes oxidantes. La eficiencia de estos sistemas se evalúa a partir de la tasa de conversión del carbono presente en la materia prima hacia el gas de síntesis.

Gráfico 66. Esquema de las principales tecnologías de gasificadores.



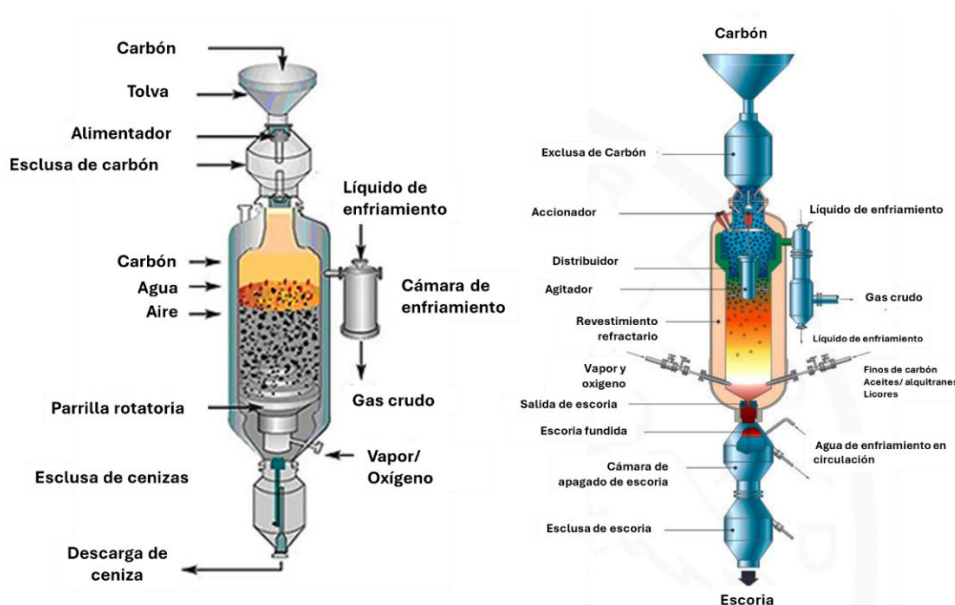
Fuente: (Speight, 2020).

- **Gasificador de lecho fijo:** denominado comúnmente de cama o lecho móvil, se alimenta de partículas de carbón menores a 50 milímetros, el carbón se introduce desde la parte superior del gasificador hasta depositarse en la cama ubicada en la parte baja. Esta categoría se divide en dos tipos de flujo ascendente (Updraft) y de flujo descendente (Downdraft), esto debido a la forma en la que fluye el agente oxidante, el cual puede ingresar por la parte de abajo o por la parte superior del gasificador. Estas tecnologías comúnmente operan por debajo de la temperatura de fusión de las cenizas, por lo que la ceniza se va depositando de manera solida en la base del gasificador. Los de flujo descendente manejan tasas de conversión de carbono entre 90 a 95 %, y los de flujo ascendente mayor al 98 % (Speight, 2020).

- El gasificador *Lurgi Dry-ash*: es un reactor de lecho fijo presurizado, utiliza carbón en trozos, vapor de agua y oxígeno para la reacción (ver gráfico 54). Una característica importante es que se usa mucho vapor en relación con el oxígeno para controlar la temperatura dentro del reactor. Esto evita que las cenizas del carbón se derritan, y así se pueden extraer como un polvo seco. Para que este gasificador funcione bien, es mejor usar carbones que reaccionen fácilmente, ya que la temperatura de operación no es muy alta. El gas de síntesis obtenido a una temperatura de hasta 537 °C, se enfría con agua

- reciclada para que los alquitranes y aceites que contiene se vuelvan líquidos y se puedan separar. La pared del gasificador tiene un sistema de enfriamiento con agua que también ayuda a generar parte del vapor necesario para la reacción (Speight, 2020).
- Por otro lado, el gasificador de escoria *British Gas/Lurgi* (BGL, por sus siglas en inglés) es una mejora del gasificador Lurgi original (ver gráfico 54). Este modelo incluye en lugar de ceniza seca, la producción de una escoria vítrea que no genera lixiviados, este reactor funciona de manera más eficiente produciendo más gas por unidad de tiempo. Asimismo, permite reciclar alquitranes y aceites volviéndolos a procesar, presentando una mayor eficiencia en la producción de monóxido de carbono e hidrógeno (CO/H₂). Finalmente, opera a temperaturas mucho más altas, superando los 2.000 °C, lo que causa que las cenizas se derritan y formen la escoria (Speight, 2020).

Gráfico 67. Gasificador Lurgi Dry-ash/ Gasificador de escoria de British Gas/Lurgi (BGL).



Fuente: (NETL, 2025 en SASOL) (NETL, 2025, en GL Industrial Services, Leicestershire, UK).

- Gasificador de lecho fluidizado: en este gasificador las partículas de carbón no cuentan con una cama fija, las partículas se suspenden sobre un gas rico en oxígeno simulando el comportamiento de un fluido. Por esta razón la granulometría del carbón debe ser inferior a 6 milímetros. El carbón se alimenta por un lado del reactor mientras que el vapor ingresa por la parte inferior con una velocidad suficiente para movilizar las partículas. Esta tecnología maneja tasas de conversión de carbono entre el 90 al 95 %, opera a temperaturas menores que la temperatura de fusión de las cenizas, por lo que estas se depositan como sólidos en la base del reactor (Speight, 2020).
- Gasificador de lecho arrastrado: para este gasificador las partículas de carbón deben tener una granulometría menor a 0,1 milímetros, la materia prima puede ser alimentada de manera sólida o en forma de lodo de carbón (slurry). A diferencia de las anteriores tecnologías, este reactor opera a elevadas temperaturas por encima de la temperatura de fusión de las cenizas, por lo que esta se transforma en un material vítreo inerte. Cuenta con la tasa más alta de conversión de carbono (98 a 99,5 %), descompone los alquitranes, aceites y fenoles que se generan en el proceso

de desvolatilización del carbón, produciendo un gas de síntesis limpio libre de alquitranes (Speight, 2020).

En la última década surgió la gasificación con agua supercrítica (SCWG, por sus siglas en inglés) como alternativa tecnológica con bajas emisiones para la conversión de carbón en gas de síntesis rico en hidrógeno. Esta tecnología permite obtener gas de síntesis en un entorno acuoso sin generar óxido de nitrógeno - NOx ni óxido de azufre SOx. Los principales productos son H₂ (50 %), el CO₂ (30-40 %) y el CH₄ (10-20 %); el nitrógeno, el azufre y otros contaminantes pueden descargarse directamente del gasificador como residuos sólidos. (Wei, y otros, 2024) (Li, Wei, Liu, Li, & Yan, 2022).

El agua supercrítica emerge como una de las tecnologías más prometedoras para alcanzar metas cercanas a cero emisiones, gracias a sus propiedades fisicoquímicas únicas que favorecen la producción de hidrógeno y la reducción de contaminantes. Bajo condiciones supercríticas (T > 374 °C y P > 22,1 MPa), el agua adquiere características intermedias entre líquido y gas, modificando su solubilidad, viscosidad y difusividad. En otras palabras, el agua supercrítica deja de comportarse como agua normal, y adquiere ciertas propiedades que le permiten disolver compuestos orgánicos y gases como si fuera un disolvente orgánico (Chen, y otros, 2021).

En este estado, el agua supercrítica actúa como un medio reactivo altamente eficiente que descompone las estructuras orgánicas del carbón, liberando hidrógeno a partir carbón y del agua. Simultáneamente, los compuestos de carbono reaccionan para formar gases como CO, CO₂ y CH₄, mientras que elementos no volátiles como el nitrógeno, el azufre y los metales se precipitan en forma de sales inorgánicas, reduciendo la presencia de contaminantes en el gas de síntesis. (Chen, y otros, 2021).

La gasificación del carbón con agua supercrítica representa muchas ventajas frente a las rutas de gasificación convencionales, al combinar altas eficiencias de producción de hidrógeno, reducción de emisiones y aprovechamiento integral del recurso hídrico. Al permitir que los elementos no volátiles del carbón como el N, S y metales se depositen como sales, se minimizan los costos y requerimientos de limpieza del gas sintetizado. Además, la separación del CO₂ se facilita mediante el control de la temperatura y la presión, ya que su solubilidad varía considerablemente respecto a la del hidrógeno, permitiendo obtener un gas rico en H₂ con bajos costos de captura. (Chen, y otros, 2021).

Tabla 13. Análisis comparativo de las diferentes tecnologías de gasificación de carbón.

Tipo de gasificador	Ventajas	Desventajas	Costos aproximados (USD)	Impacto Ambiental	Tipo de Carbón Aplicable
Lecho Fijo Downdraft	Diseño simple, bajo costo, syngas con menos alquitrán. 90 – 95% de carbono	Difícil escalar, limitado a combustibles secos	\$20,000 – \$200,000	Medio: bajo alquitrán	Lignito, carbón vegetal seco
Lecho Fijo Updraft	Alta eficiencia térmica, manejo de humedad. >98% de carbono.	Syngas con alto alquitrán	\$30,000 – \$250,000	Alto: requiere filtrado	Antracita, bituminoso
Lecho Fluidizado (Bubbling)	Temperatura uniforme, eficiencia alta	Mayor complejidad operativa	\$200,000 – \$2M	Medio: requiere ciclones	Bituminoso, lignito
Lecho Fluidizado Circulante	Alta conversión, excelente escalabilidad	Costoso y complejo	\$500,000 – \$5M	Medio-alto: necesita depuración	Pulverizado, sub-bituminoso
Gasificador de Plasma	Gasifica cualquier material, syngas limpio	Muy costoso, alto consumo energético	\$3M – \$10M	Bajo: sin residuos	Carbón, residuos complejos

Tipo de gasificador	Ventajas	Desventajas	Costos aproximados (USD)	Impacto Ambiental	Tipo de Carbón Aplicable
Lurgi (Lecho Fijo Presurizado)	Alta eficiencia con carbón, syngas de alta calidad, operación continua, madura	Alto costo inicial, requiere carbón de alta granulometría	\$2M – \$6M	Medio: emisiones moderadas con buena purificación	Bituminoso, antracita, coque

Fuente: (Speight, 2020).

Las principales propiedades del carbón utilizadas como criterios técnicos para la selección de la tecnología de gasificación apropiada se definen en el porcentaje de cenizas, humedad total, azufre total y materia volátil para determinar la viabilidad técnica y desempeño del proceso de gasificación de las diferentes tecnologías. Son sintetizadas a partir de documentos técnicos y normativos especializados, incluyendo la guía de tecnologías de gasificación (Speight, Handbook of Gasification Technology Science, Processes, and Applications, 2020), así como normas técnicas de China GB/T 9143-2021 (calidad del carbón para gasificador de lecho fijo), GB/T 29722-2021 (Calidad del carbón para gasificador de flujo arrastrado), y GB/T 29721-2023 (calidad del carbón para gasificador de lecho fluidizado).

Tabla 14. Tecnología de gasificación recomendada basado en las propiedades del carbón.

TECNOLOGÍA RECOMENDADA			
Propiedad	Lecho Fijo (Fixed Bed)	Lecho Fluidizado (Fluidized Bed)	Flujo Arrastrado (Entrained Flow)
Cenizas (%)	≤ 25%	≤ 40%	≤ 12%
Humedad total (%)	≤ 35%	≤ 40%	≤ 10%
Azufre total (%)	≤ 2,0%	≤ 2,0%	≤ 3,0%
Materia volátil (%)	> 10%	>10%	> 30%

Fuente: normas técnicas de China GB/T 9143-2021 (calidad del carbón para gasificador de lecho fijo), GB/T 29721-2023 (calidad del carbón para gasificador de lecho fluidizado), GB/T 29722-2021 (Calidad del carbón para gasificador de flujo arrastrado).

Para la tecnología de flujo arrastrado, la cual permite como materia prima el llamado Slurry o lodo de carbón, se presenta en la siguiente ilustración, las concentraciones de pulpa o solido de carbón que debe contener la materia prima teniendo en cuenta el tipo o rango del carbón.

Tabla 15. Propiedades del Slurry o lodo de carbón para tecnología de flujo arrastrado.

índice	antracita	Carbón bituminoso de baja volatilidad	Carbón bituminoso de volatilidad media a alta	lignito
Humedad total (Mt)	≤10%	≤10%	≤20%	≤35%
Concentración de pulpa*	-	>60%	>55%	>45%

*Aplicable únicamente al proceso de gasificación de lodos de agua y carbón.

Fuente: editado y traducido de Norma técnica China GB/T 29722-2021.

3.4.7. Marco regulatorio

3.4.7.1. Contexto mundial

El desarrollo del hidrógeno como fuente de energía renovable ha impulsado la creación de un marco regulatorio internacional que busca armonizar normas técnicas, ambientales y comerciales.

Con relación al marco regulatorio internacional, se puede señalar que este conjunto de políticas, estándares y acuerdos multilaterales constituye la base para consolidar al hidrógeno como un elemento clave en la transición energética global. A nivel mundial, la regulación se orienta hacia tres pilares: la certificación del hidrógeno renovable, la seguridad en su manejo y la integración de este vector en los mercados energéticos nacionales e internacionales.

Durante la Conferencia de las Partes (COP28) en Dubái, realizada en diciembre de 2023, 39 países firmaron la *“Hydrogen Declaration of Intent”*, un compromiso para el reconocimiento mutuo de los sistemas de certificación del hidrógeno y sus derivados. Este acuerdo representa un paso fundamental hacia la creación de un mercado global estandarizado, en el que las definiciones de “hidrógeno verde” o “bajo en carbono” sean compatibles entre distintas regiones, facilitando así el comercio internacional y la inversión en infraestructura energética (Offshore Energy, 2023).

Paralelamente, la Organización Internacional de Normalización (ISO) trabaja en la elaboración de estándares específicos para el hidrógeno, centrados en aspectos de seguridad, pureza, transporte y certificación de origen. Se espera que estas normas estén consolidadas entre 2025 y 2026, lo que permitirá a los países adoptar marcos regulatorios homogéneos y compatibles con los compromisos de descarbonización International (IEA, 2025).

La política energética internacional también se ha enfocado en promover estrategias nacionales de hidrógeno. Países como Alemania, Japón, Corea del Sur, Estados Unidos y Chile han implementado programas con metas de capacidad instalada de electrolizadores, incentivos fiscales y fondos para investigación y desarrollo (IRENA, 2025). Estas estrategias buscan integrar el hidrógeno verde en sectores de difícil descarbonización, como la industria siderúrgica, el transporte pesado y la aviación, donde las energías renovables convencionales resultan menos eficientes (IEA, 2025).

En el caso de la Unión Europea, se ha desarrollado un marco jurídico robusto que regula la producción, el transporte y el uso del hidrógeno dentro de su mercado energético. Uno de los instrumentos más importantes es el Paquete del Mercado de Gas e Hidrógeno Descarbonizados (Hydrogen and Decarbonised Gas Market Package), que establece normas para la creación de redes de transporte y almacenamiento exclusivas para hidrógeno, así como para la planificación conjunta con las redes eléctricas (ECCEU, 2023). A este se suma la Directiva de Energías Renovables (RED III), que fija objetivos vinculantes para la incorporación de hidrógeno renovable en los sectores industrial y de transporte, promoviendo una transición energética justa y sostenible (Norton Rose Fulbright logo, 2025).

De igual manera, la regulación europea se complementa con la *Alternative Fuels Infrastructure Regulation* (AFIR), que obliga a los Estados miembros a instalar estaciones de recarga de hidrógeno cada 200 kilómetros en las principales rutas de transporte terrestre, además de puntos estratégicos en puertos y aeropuertos (Springer, 2024). Por su parte, las normativas

“FuelEU Maritime” y “ReFuelEU Aviation” introducen cuotas mínimas de uso de combustibles sintéticos y derivados del hidrógeno, fortaleciendo la reducción de emisiones en el transporte marítimo y aéreo.

A nivel global, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) ha contribuido a la consolidación de este marco regulatorio mediante la publicación del informe Risk-Based Regulatory Design for the Safe Use of Hydrogen (2023), en el que se propone una estructura de gestión de riesgos para todas las fases del ciclo del hidrógeno: producción, almacenamiento, transporte y uso final. Este documento constituye una guía técnica de referencia para gobiernos e industrias, con el fin de garantizar la seguridad operacional y minimizar los impactos ambientales y sociales (OCDE, 2023).

Finalmente, las instituciones internacionales como la IEA y la IRENA coinciden en que el éxito del hidrógeno como vector energético dependerá de la cooperación internacional, la transparencia en los mecanismos de certificación y la consolidación de infraestructuras seguras y sostenibles. El fortalecimiento del marco regulatorio global permitirá crear confianza entre productores y consumidores, impulsando un comercio justo y sostenible del hidrógeno en los próximos años (IEA, 2025) (IRENA, 2025).

3.4.7.2. Marco legal

Con respecto al marco normativo nacional, se presenta a continuación un recuento de la regulación vinculada al hidrógeno y a la promoción de la transición energética, en la cual este recurso desempeña un papel relevante. Es importante señalar que este marco normativo está compuesto por regulación y normas técnicas.

Tabla 16 - Marco normativo vinculado al hidrógeno.

Normatividad	Objetivo de la normatividad	Alcances e instrumentos asociados al hidrogeno
Ley 697 de 2001	- Diseñar la hoja de ruta para la transformación de la matriz energética y adopción del uso racional y eficiente de energía como asunto de interés social y de conveniencia para el abastecimiento energético.	- Creación del programa de uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales "PROURE".
Ley 1775 de 2014	- Regular la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. - Establecer líneas de acción para el cumplimiento de compromisos asumidos por Colombia, tales como la aprobación del estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (Irena) mediante la Ley 1665 de 2013.	- Promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía. - Desarrollo de instrumentos para la promoción de las energías renovables, indicando incentivos arancelarios para la importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos. - Se establecen buenas prácticas de eficiencia energética, que posibiliten el intercambio de conocimiento entre los organismos del sector público.
Ley 1964 de 2019	- Promover el uso de vehículos eléctricos en Colombia.	- Contribuir a la movilidad sostenible y a la reducción de emisiones contaminantes y de gases efecto invernadero.

Normatividad	Objetivo de la normatividad	Alcances e instrumentos asociados al hidrogeno
Ley 2099 de 2021	- Reglamentar la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país, el desarrollo y la promoción de fuentes no convencionales de energía y fortalecimiento de los servicios públicos de energía y gas combustible. - Gestionar de manera eficiente la energía y sistemas de medición inteligente, que comprenden tanto la eficiencia energética como la respuesta de la demanda. - Declarar de utilidad pública e interés social las fuentes no convencionales de energía.	- Definición de hidrogeno verde, como aquel producido a partir de Fuentes No Convencionales de energía Renovable, tales como la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, el calor geotérmico, la solar, los mareomotriz, entre otros; y se considera FNCE. - Definición del hidrogeno azul, como aquel que se produce a partir de combustibles fósiles, especialmente por la descomposición del metano (CH₄) y que cuenta con un sistema de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS), como parte de su proceso de producción y se considera FNCE. - Fomento a la investigación, el desarrollo y la inversión en el ámbito de la producción de energía con fuentes no convencionales de energía -FNCE mediante la reducción del 50% sobre el valor de la renta del total de la inversión realizada. - Creación del sello de producción limpia con el fin de incentivar el uso de fuentes no convencionales de energías renovables en las empresas e industrias, Se asigna a todos aquellos que utilicen únicamente fuentes no convencionales de energías renovables como fuentes de energía. - Define mecanismos y metodologías de medición y verificación de las actividades directas de producción, almacenamiento, distribución, y uso de Hidrogeno Verde y Azul, así como la tecnología de captura utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) que tengan un balance cero emisiones netas. - Definición de las fuentes no convencionales de energía como de utilidad pública o interés social y por tanto tiene efectos oportunos para su primacía en todo lo referente a ordenamiento del territorio, urbanismo, planificación ambiental, fomento económico, valoración positiva en los procedimientos administrativos de concurrencia y selección, y de expropiación forzosa. - Regulación del Fondo de energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la energía (FENOGE), cuyo objetivo es promover, ejecutar y financiar planes, programas y proyectos de Fuentes No Convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, y gestión eficiente de la energía. El FENOGE podrá financiar y/o ejecutar proyectos de producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución, reelectrificación y uso de Hidrógeno verde, para lo cual podrá celebrar en forma directa convenios o contratos con las entidades estatales de cualquier orden, para ejecutar los planes, programas y/o proyectos, así como los recursos destinados a la promoción y desarrollo de FNCE, hidrogeno y GEE. - Define los mecanismos, condiciones e incentivos para promover la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso de hidrógeno destinado a la prestación del servicio público de energía eléctrica, almacenamiento de energía, y descarbonización de sectores como transporte, industria, hidrocarburos, entre otros. - Las inversiones, los bienes, equipos y maquinaria destinados a la producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución, reelectrificación, investigación y uso final del Hidrogeno Verde y Azul, gozarán de los beneficios de deducción en el impuesto de renta, exclusión de IVA, exención de aranceles y depreciación acelerada.
Decreto 1732 de 2012	- Establecer mecanismos exploratorios de regulación para modelos de negocio innovadores en industrias reguladas y ambientes especiales de vigilancia y control o sandbox regulatorio.	- Se entiende por Ambiente especial de vigilancia y control sandbox regulatorio, un tipo de mecanismo exploratorio de regulación que permite a las empresas probar productos, servicios y modelos de negocio innovadores, sin incurrir inmediatamente en todas las consecuencias regulatorias normales
Decreto 1537 de 2022	- Reglamentar la declaratoria de utilidad pública e interés social de los proyectos de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, así como proyectos y/o ejecución de obras para la producción y almacenamiento de hidrógeno verde.	- El ministro de Minas y Energía podrá, mediante resolución, declarar de utilidad pública e interés social los planes, proyectos y ejecución de obras para la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, y para la producción y almacenamiento de hidrógeno verde, así como las zonas a ellos afectas. - Definición del trámite para la expedición del acto administrativo de declaratoria de utilidad pública e interés social de proyectos de hidrógeno verde.
Decreto 895 de 2022	- Definir marcos regulatorios para procesos relacionados a la generación de energía eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía -FNCE. Dentro de ellos se destaca el apartado asociado a la posibilidad de venta o autogeneración de la energía eléctrica generada.	- Se reglamenta la exclusión del impuesto sobre las ventas -IVA en la importación y la adquisición de equipos, elementos y maquinaria, para producción y utilización de energía. - Las personas naturales o jurídicas que a partir de la vigencia de la Ley 2099 de 2021, sean titulares de nuevas inversiones en nuevos proyectos de fuentes no convencionales de energía -FNCE (Incluido medición, evaluación de los potenciales recursos o acciones y medidas de eficiencia energética), estarán sujetos a la exención del pago de los derechos arancelarios aplicables a la importación de maquinaria, equipos, materiales e insumos. - Señala que las solicitudes de hidrógeno verde o azul deben estar sujetos a la reglamentación que emita el Gobierno Nacional. - Establece los requisitos y el procedimiento con el que la UPME evalúa las solicitudes y emite los certificados que permiten acceder a los incentivos tributarios de deducción de renta, exclusión del IVA, exención de derechos arancelarios y depreciación acelerada de proyectos de generación de energía eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía -FNCE; ii) acciones o medidas de gestión eficiente de la energía - GEE; y iii) proyectos de hidrógeno verde o azul.

Normatividad	Objetivo de la normatividad	Alcances e instrumentos asociados al hidrogeno
Decreto 1476 de 2022 (MME)	- Adoptar disposiciones dirigidas a promover la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso del hidrógeno.	- Define los mecanismos, condiciones e incentivos para promover el desarrollo local, la innovación, investigación, producción, almacenamiento, transporte, distribución y uso del hidrógeno destinado a la prestación del servicio público de energía eléctrica, almacenamiento de energía, y descarbonización de sectores como transporte, gas, hidrocarburos, minería e industria. - Define los Proyectos de Hidrógeno Verde como el conjunto de actividades que se desarrollan para la producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución, reelectrificación, investigación o uso final del Hidrógeno Verde. - Estos proyectos de producción de Hidrógeno Verde podrán utilizar energía eléctrica autogenerada o tomada de la red. La totalidad de la energía proveniente de la red debe ser respaldada con Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), para lo cual se deberá suscribir un contrato bilateral de suministro de energía a partir de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), además de contar con certificados de energía renovable expedidos por un tercero bajo estándares internacionales reconocidos y verificables. - Define los Proyectos de Hidrógeno Azul como el conjunto de actividades que se desarrollan para la producción, almacenamiento, acondicionamiento, distribución, reelectrificación, investigación o uso final del Hidrógeno Azul. Los proyectos de Hidrógeno Azul deberán contar con un sistema de Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono (CCUS) que permita la captura del dióxido de carbono generado a grandes escalas en fuentes fijas. - Establece que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Minas y Energía definirán el umbral máximo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para que el hidrógeno sea considerado de bajas emisiones. Así mismo, ambas entidades podrán adoptar un mecanismo público de certificación de origen del hidrógeno producido en el país, con el que se permita asegurar la unicidad y la trazabilidad de los insumos utilizados para la producción del hidrógeno y su intensidad de emisiones asociadas, así como cualquier otro atributo que se considere relevante monitorear. - El Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establecerán, en el marco de sus competencias, los lineamientos, requisitos y metodologías para el uso de formaciones geológicas para el almacenamiento de hidrógeno. - Los formatos para FNCER, GEE e hidrógeno son adoptados mediante circular externa y pueden ser objeto de modificaciones o actualizaciones exclusivamente por parte de la UPME.
Ley 2294 de 2023 (PND)	Proponer cinco transformaciones para el país, entre las que se encuentra la Transformación Productiva, Internacionalización y Acción Climática. Dentro de esta, se desarrolla tres catalizadores: ii) Transición económica para alcanzar carbono neutralidad y consolidar territorios resilientes al clima, iii) Transición energética justa, segura, confiable y eficiente, iv) Economía productiva a través de la reindustrialización y la bioeconomía.	- Considera que hidrógeno verde es también el producido con energía eléctrica autogenerada a partir de FNCER y energía eléctrica tomada del sistema interconectado nacional -SIN-, siempre y cuando la energía autogenerada con FNCER entregada al SIN sea igual o superior a la energía tomada del SIN; para este último caso, el Ministerio de Minas y Energía establecerá el procedimiento para certificar este balance a partir de los sistemas de medida ya establecidos en la regulación. - Define las Comunidades Energéticas como usuarios o potenciales usuarios de servicios energéticos podrán constituir Comunidades Energéticas para generar, comercializar y/o usar eficientemente la energía a través del uso de fuentes no convencionales de energía renovables -FNCER-, combustibles renovables y recursos energéticos distribuidos. - La infraestructura que se desarrolle con recursos públicos podrá cederse a título gratuito a las Comunidades Energéticas, en las condiciones que defina el Ministerio de Minas y Energía, en coordinación con las entidades competentes. - El Hidrógeno Blanco es aquel que se produce de manera natural, asociado a procesos geológicos en la corteza terrestre y que se encuentra en su forma natural como gas libre en diferentes ambientes geológicos ya sea en capas de la corteza continental, en la corteza oceánica, en gases volcánicos, y en sistemas hidrotermales, como en géiseres y se considera FNCER.
Decreto 2235 de 2023 (MME)	- Determinar los lineamientos, condiciones y requerimientos técnicos que han de cumplir los proyectos para la realización de estudios de evaluación del Hidrógeno Blanco y otros gases o sustancias asociadas y su posterior exploración y explotación.	- El Desarrollador que haya obtenido autorización para efectuar Estudios de Evaluación del Hidrógeno Blanco y otros gases o sustancias asociadas a éste, así como la exploración y/o explotación en área determinada, tendrá exclusividad frente a otros solicitantes mientras esta se encuentre vigente. - Puesta en marcha de instrumentos para fomentar e incentivar los trabajos de Estudios de Evaluación, Exploración, Explotación y el aprovechamiento de Hidrógeno Blanco y otros gases o sustancias asociadas a este recurso renovable
Resolución 2604 de 2009 (MME, Minprotección y MADS)	- Determinar los combustibles limpios teniendo como criterio fundamental el contenido de sus componentes.	- Se determina el hidrogeno como un combustible limpio. - Se reglamentan los límites máximos de emisión permisibles en prueba dinámica para los vehículos que se vinculen a la prestación del servicio público.
Resolución 000319 de 2022 (UPME)	- Establecer requisitos y procedimientos para la evaluación de las solicitudes de evaluación y emisión de los certificados que permitan acceder a los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014, asociado a	- La UPME podrá cobrar a aquellas personas naturales o jurídicas que utilicen o soliciten sus servicios técnicos o de planeación y asesoría relacionados con: "(a) Evaluación de proyectos de eficiencia energética y fuentes no convencionales de energía y gestión eficiente de la energía, para acceder a los incentivos tributarios". - Establece los requisitos y el procedimiento para acceder a los beneficios tributarios de descuento en el impuesto de renta, deducción de renta y exclusión del IVA para proyectos de gestión eficiente

Normatividad	Objetivo de la normatividad	Alcances e instrumentos asociados al hidrogeno
	proyectos en FNCE, GEE e Hidrógeno Verde y Azul.	de la energía (Recoge La Resolución UPME No. 196 de 2020). - Establece los requisitos y el procedimiento para acceder a los beneficios tributarios en inversiones en investigación, desarrollo o producción de energía a partir de Fuentes No Convencionales de Energía (Recoge la Resolución UPME No. 203 de 2020).
Resolución 40165 de 2024	- Establecer parámetros para el desarrollo del Programa de Sustitución de Leña, Carbón y Residuos por Energéticos de Transición de Gas Combustible para la Cocción de Alimentos	- Brindar los elementos técnicos que orientan la actuación del sector energético para avanzar en la sustitución de combustibles de uso ineficiente y altamente contaminantes CIAC. - Promoción de la reducción del consumo de leña, carbón y residuos a través de fuentes de energías renovables como el Biogás, el Biometano o el Hidrógeno o sus mezclas con gas natural, o que la solución energética a utilizar sea más eficiente y genere mayores beneficios. - Se definen el Hidrógeno o las mezclas de hidrógeno y gas natural, como siguientes gases Energéticos de transición de gas combustible. - Crea el Registro y Centro de transparencia e información de las comunidades energéticas, quienes se registrarán en el sistema que la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios disponga para tal fin. Dicha entidad establecerá términos y condiciones de registro, teniendo en cuenta que será un instrumento diferenciado y flexible acorde con la naturaleza jurídica y objetivos de las comunidades energéticas.

Fuente: Elaboración propia a partir de la normatividad relacionada.

3.4.7.3. Normalización técnica

Por último, con corte al 12 de noviembre de 2025 el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC a través del Comité de Normalización 259 - Hidrógeno⁴, ha adoptado 33 Normas Técnicas Colombianas (NTC) y dos Guías Técnicas Colombiana (GTC). Los principales temas para los que se han establecido requisitos y lineamientos están: 1) componentes del sistema de combustible para vehículos que funcionan con hidrógeno, 2) estaciones de llenado, 3) sistemas de generación de hidrógeno, 4) producción de contenedores rellenables, 5) sistemas de llenado y suministro de hidrógeno líquido en vehículos y 6) calidad del hidrógeno y 7) aspectos de seguridad de sistemas y componentes que se requieren para la producción, almacenamiento y transporte del hidrógeno (ICONTEC, 2025).

3.4.8. Mapeo de actores

La transición energética y las nuevas tendencias de sostenibilidad han llevado a la minería del carbón a buscar otras alternativas para su uso, uno de estos es la producción de hidrógeno azul a partir de dicho mineral. La gasificación del carbón acompañada de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) para la producción de hidrógeno azul, representa un desafío complejo que exige la articulación de múltiples actores, disciplinas y geografías. En este sentido, el presente mapeo tiene como propósito identificar los principales actores nacionales que participan o pueden participar en cada eslabón de esta cadena, así como analizar sus funciones, capacidades técnicas y relaciones potenciales en el contexto colombiano. Este mapeo aporta una herramienta estratégica de vigilancia y articulación de los distintos segmentos del mercado, permitiendo identificar alianzas tecnológicas, fuentes de inversión y modelos regulatorios a emular.

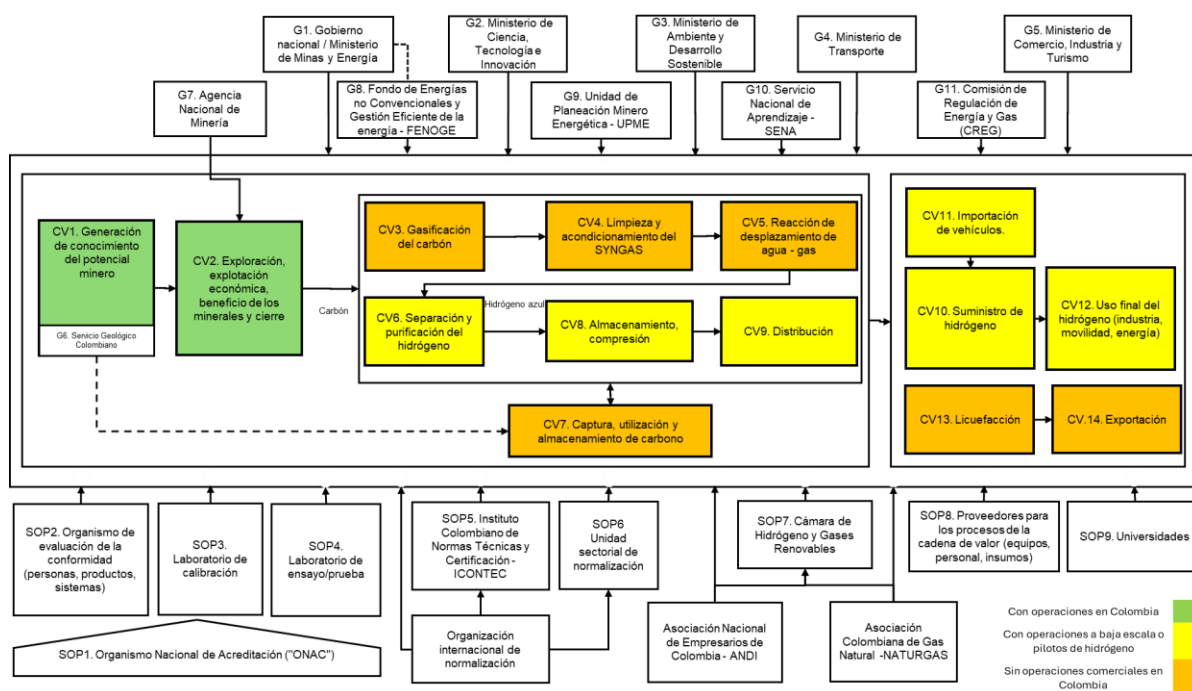
La cadena de producción de hidrógeno a partir del carbón se articula mediante eslabones definidos que requieren competencias en geología, minería, gasificación, ingeniería química, energía, transporte, logística, finanzas y gobernanza. En cada uno de esos eslabones operan distintos tipos de actores, como: gobiernos, empresas extractivas y de ingeniería, organismos de investigación, proveedores tecnológicos,

inversionistas, agencias reguladoras y organismos multilaterales, cuyos roles están interconectados y con fuertes sinergias.

Para la identificación de actores se tuvo en cuenta los procesos que conforman la cadena productiva de la producción de hidrógeno a partir de carbón, al igual que parte del marco normativo enunciado en el capítulo anterior.

La cadena de suministro planteada en el gráfico 55, considera las diferentes rutas tecnológicas disponibles (reformado de gas natural, electrólisis del agua y gasificación del carbón con CCUS); se relacionan las diferentes entidades gubernamentales (G) que fijan políticas, lineamientos o requisitos para la producción de hidrógeno, el paso a paso de la cadena de valor (CV) requeridos para el desarrollo del H₂ referenciados a su desarrollo en Colombia y por último, las organizaciones que prestan servicios o suministran productos de soporte (SOP) que facilitan que la cadena de valor pueda operar de forma correcta. (Anexo 6).

Gráfico 68. Procesos y actores de la cadena de producción de hidrógeno partir del carbón.



Fuente: elaboración propia a partir del marco legal e información del anexo 6.

Se evidencia que, en Colombia, no existen pilotos ni operaciones comerciales asociadas a los procesos resaltados en color naranja. No obstante, los procesos en color amarillo, asociados a las experiencias derivadas de los pilotos y de las operaciones a menor escala para la producción de hidrógeno a partir de agua y gas constituyen aportes valiosos para el futuro desarrollo de la cadena productiva del hidrógeno mediante gasificación del carbón.

En la siguiente tabla se destacan algunos actores asociados a los procesos con pruebas piloto u operaciones de pequeña escala en la cadena productiva del hidrógeno en el país.

Tabla 17. Actores en la cadena productiva de hidrógeno.

Eslabón o actor	Actores	Productos
CV1, G6	Servicio Geológico Colombiano - SGC	Conocimiento del potencial del país en los recursos mineros
CV2	Titulares mineros	Carbón con los requisitos necesarios para la gasificación.
CV3, CV4, CV5, CV7, CV13, CV14	No hay actores en operación en Colombia.	Gas de síntesis, gas de síntesis limpio, H ₂ adicionado y menor cantidad de dióxido de carbono, dióxido de carbono capturado y usado, hidrogeno líquido, hidrógeno exportado.
CV6, CV8, CV9	Universidad de la Sabana - PROMIGAS (Alianza Bio-PtX)	Biohidrógeno
CV6, CV8, CV9	Ecopetrol Electrolizador - Cartagena	Hidrógeno
CV6, CV8, CV9	Empresas Públicas de Medellín Planta de tratamiento Aguas Claras	Hidrogeno a partir biogás de las aguas residuales
CV6, CV8, CV9	Universidad de Antioquia y Universidad de La Guajira (Incitativa Power to Gas)	Hidrógeno
CV6, CV8, CV9	Hevolución	Hidrógeno
CV6, CV8, CV9, CV10, CV12	Promigas	Hidrógeno
CV10	Servicio Integrado de Transporte Público (SITP)	Suministro de hidrógeno - hidrogenara.
CV11	Ecopetrol Evolución	Vehículos importados
CV12	SITP hidrógeno Bus (uso de hidrógeno en movilidad).	Movilidad vehicular realizada con hidrógeno
CV12	Centro de Innovación Econova Cartagena movilidad	Movilidad vehicular realizada con hidrógeno

Fuente: elaboración propia.

La consolidación de la información revela que el desarrollo de la cadena del hidrógeno azul en Colombia no es una tarea exclusivamente tecnológica, sino de coordinación estratégica entre actores globales, nacionales y locales. Las instituciones gubernamentales tienen un rol central como articuladores, facilitadores y reguladores de la cadena, potenciando alianzas público-privadas, transfiriendo tecnología y promoviendo formación técnica en ingeniería de procesos energéticos y captura de carbono. De este modo, Colombia podría consolidarse como líder latinoamericano en la producción sostenible de hidrógeno azul a partir de carbón, transformando su sector minero hacia un modelo de mayor valor agregado y bajas emisiones.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el diagnóstico realizado se identificó que factores económicos, geopolíticos y energéticos direccionan la demanda global del carbón. La explotación del carbón durante el período 2020-2024 mantuvo tendencia creciente, alcanzando las 8.771 Mt en 2024, impulsada principalmente por China, India y los países de la Asociación de Naciones de Asia Sudoriental - ASEAN; sin embargo, en Europa y América del Norte la explotación y el consumo disminuyó en las últimas décadas, registrando su nivel más bajo en el 2024.

La evolución del consumo global de carbón para usos no energéticos también ha presentado crecimiento, impulsado principalmente por China, donde el aumento se atribuye al continuo crecimiento del sector de conversión del carbón, estrategia para disminuir la dependencia de las importaciones de petróleo y gas, elevando el consumo a 1.094 Mt, y en los países de la ASEAN, donde se registró un incremento del 13 %, totalizando 87 Mt, relacionado con la creciente demanda de carbón en la producción de níquel para la fabricación de baterías.

Es importante señalar que, con el fin de suplir los requerimientos energéticos que demanda la industria de China, principal consumidor de materias primas en el mundo (incluyendo minerales y energéticos), parte del carbón es utilizado en el país asiático en el proceso de fabricación de tecnologías de transición energética y de la cuarta revolución industrial, tales como centros de datos para la inteligencia artificial, vehículos eléctricos, aerogeneradores y paneles solares, entre otros, que demanda el mundo para hacer efectivas las políticas de transición energética con las que se han comprometido los diferentes países.

En el marco de la transición energética y las políticas de descarbonización, los países con recursos y reservas significativas de carbón pueden desempeñar un papel clave en la identificación de oportunidades de diversificación productiva que impulsen una economía más competitiva y sostenible. En este contexto, resulta fundamental explorar rutas de transformación del carbón distintas a la combustión y la carbonización, que permitan obtener productos con valor agregado y, al mismo tiempo, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Entre las alternativas tecnológicas a considerar se encuentran la gasificación de carbón con CCUS, la activación física o química, la extracción alcalina, la lixiviación ácida y la grafitización.

Las cifras presentadas en este documento sobre el consumo de carbón (termoeléctricas: 63 %; siderurgia y cemento: 29 %; gasificación: 4,6 %; y otros usos: 3,4 %) muestran que, pese a las iniciativas de varios países para promover aplicaciones no convencionales, los volúmenes destinados a estos usos siguen siendo marginales y se concentran principalmente en la gasificación del carbón, especialmente en China.

No obstante, se espera que la participación del carbón en usos no convencionales aumente progresivamente, impulsada por los programas e iniciativas que algunos países están desarrollando para aprovechar este recurso como materia prima en la producción de bienes con valor agregado y menores emisiones en comparación con sus usos tradicionales.

Colombia cuenta con reservas de carbón probadas y probables de 1.020,55 Mt según información ECRR, adicionalmente, es óptimo como materia prima para los diferentes usos alternativos, dado que el país cuenta con todos los rangos y calidades de carbón requeridos para cada uno de ellos y con propiedades especiales como es el caso del bajo contenido de azufre en Norte de Santander que optimiza los procesos.

El carbón es un recurso relevante en la balanza comercial del país, y en la economía de departamentos productores como el Cesar, La Guajira, Boyacá, Cundinamarca, Santander, Norte de Santander y Córdoba, entre otros. En 2024 representó el 14,3 % de las exportaciones colombianas y el 79,0 % de las regalías mineras recaudadas durante la vigencia, generando más de 67.700 empleos directos. Es relevante tener en cuenta que en el 2025, las exportaciones de carbón colombiano se redujeron en un 33,5 %, por factores relacionados con la sobreoferta mundial del energético, especialmente por parte de productores asiáticos; adicionalmente, otros factores a tener en cuenta como la caída de precios internacionales, la alta volatilidad cambiaria y los mayores costos de fletes reducen la competitividad de los carbones del interior del país; aun así, la situación se manifiesta como la oportunidad de diversificar el uso del carbón colombiano.

En este documento se empleó una metodología para priorizar los usos no convencionales del carbón con mayor potencial de desarrollo en el corto y mediano plazo, y para los cuales se recopiló información relevante de sus respectivas cadenas productivas. Para la priorización se aplicaron tres criterios (seleccionados entre varios propuestos en estudios de referencia sobre el desarrollo de usos no convencionales del carbón) para los que existía información suficiente que permitiera realizar una evaluación objetiva.

La aplicación de esta metodología permite abordar de manera sistemática y basada en evidencia la necesidad de definir y priorizar las cadenas productivas, contribuyendo así a la construcción de hojas de ruta orientadas a impulsar nuevos encadenamientos productivos.

El hidrógeno azul producido a partir del carbón colombiano se perfila como una ruta transitoria viable gracias a las propiedades fisicoquímicas del recurso, permitiendo generar un gas de síntesis apto para usos industriales y contribuir a la reducción de GEI en sectores como la siderurgia. Los avances tecnológicos actuales permiten reducir la huella de CO₂ mediante sistemas de captura más eficientes, haciendo de esta ruta una alternativa cada vez más competitiva frente al hidrógeno verde. Asimismo, la mineralización de CO₂ en rocas como basaltos y peridotitas se presenta como una opción prometedora, mientras se continúa evaluando con mayor precisión las unidades geológicas más aptas para el secuestro seguro y permanente del carbono.

Los carbones de bajo rango constituyen una materia prima con potencial estratégico para la obtención de sustancias húmicas de uso agrícola, contribuyendo a diversificar los usos del carbón y a fortalecer iniciativas de mejora y recuperación de suelos, incluso en áreas mineras.

Adicionalmente, se resalta que la cadena de valor propuesta presenta una implementación tecnológica relativamente sencilla, en la medida en que las etapas de extracción, purificación y formulación se sustentan en operaciones fisicoquímicas convencionales y en el uso de reactivos químicos de amplia disponibilidad comercial, lo que favorece su escalamiento progresivo y su integración con la infraestructura industrial existente.

En la producción, la calidad y el rendimiento del carbón activado se requieren carbones con capacidad de producir porosidad en la activación de acuerdo con el uso específico, se prefieren carbones con volátiles y oxígeno (lignitos a bituminosos altos en volátiles) y bajo contenido de cenizas, aunque el producto proveniente de antracitas ha dado buenos resultados. Así mismo, la calidad del producto se ve reflejada en el método de activación, la temperatura de activación y los pasos de pretratamiento y postratamiento.

El marco normativo aplicable al carbón activado en Colombia se compone de un conjunto de regulaciones sectoriales, normas técnicas y estándares internacionales que, aunque no conforman una legislación específica para este material, sí establecen los requisitos esenciales para su producción, calidad, comercialización y uso en sectores críticos como el del agua potable, la industria alimentaria, los procesos petroquímicos y el tratamiento de aguas residuales.

Cada etapa productiva en la obtención del carbón activado, desde el conocimiento geológico hasta la comercialización especializada, se articula con entidades gubernamentales que ejercen funciones de regulación, control, investigación, fomento productivo o supervisión ambiental y minera.

► Recomendaciones

Se recomienda promover una agenda nacional de investigación y desarrollo orientada a profundizar en los usos no convencionales del carbón, articulando las capacidades del Servicio Geológico Colombiano, las instituciones académicas, y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. Este trabajo conjunto permitiría transformar el carbón colombiano en productos derivados de alto valor con mayor competitividad en el mercado global. Impulsar esta diversificación ofrece una alternativa sólida frente a la volatilidad del mercado internacional del carbón.

Se recomienda intensificar y coordinar los esfuerzos de investigación en tecnologías de captura, uso y almacenamiento de CO₂ (CCUS), así como en procesos de mineralización del carbono, articulando al Servicio Geológico Colombiano, las instituciones académicas y MINCIENCIAS. Esta colaboración es clave para evaluar con precisión el potencial geológico del país y desarrollar soluciones que permitan producir hidrógeno azul a partir del carbón colombiano con menores emisiones y mayor competitividad. Fortalecer estas líneas de investigación no solo aportaría valor agregado a un recurso cuyo mercado global está en transformación, sino que también consolidaría esta ruta como un puente estratégico hacia un futuro energético más limpio, respaldado por innovación continua, infraestructura adecuada y políticas de apoyo.

Se recomienda impulsar proyectos piloto con financiamiento público-privado, orientados al desarrollo de nuevas cadenas productivas derivadas del carbón en las principales regiones carboníferas, mediante mesas técnicas regionales que articulen a las empresas mineras, autoridades ambientales y mineras, gobiernos locales y departamentales. Estos proyectos permitirían promover alternativas de diversificación económica con impacto directo en sectores como la agricultura, a través de la producción de sustancias húmicas, y en la gestión eficiente del recurso hídrico mediante soluciones a partir de carbón activado para agua potable y tratamiento de aguas residuales, fortaleciendo así la capacidad productiva y ambiental de los territorios.

Se recomienda avanzar en estudios de prefactibilidad que permitan evaluar rigurosamente la viabilidad económica, técnica y operativa de las cadenas productivas derivadas del carbón. Estos estudios deben incluir análisis detallados de inversiones tecnológicas (CAPEX), costos operativos (OPEX), requerimientos de infraestructura, rutas tecnológicas, escalabilidad industrial y comportamiento esperado de los mercados asociados. Profundizar en esta evaluación permitirá identificar los proyectos con mayor potencial, orientar la toma de decisiones de política pública y atraer inversión privada hacia usos no energéticos de alto valor para el carbón colombiano.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrews, R. (2021). *Carbon Forward: Advanced Markets for Value-Added Products from Coal*. National Coal Council Reports. 44.
- Fundación Heinrich Böll. (2022). *El Hidrógeno en Colombia Si se hace mal, podría ser peor*.
- Guo, J., Xuanke, L., Huitao, X., Zhu, H., Li, B., & Westwood, A. (2020). Molecular Structure Control in Mesophase Pitch via Co-carbonization of Coal Tar Pitch and Petroleum Pitch for Production of Carbon Fibers with both High Mechanical Properties and Thermal Conductivity. *American Chemical Society*.
- Martínez-Mendoza, K. L., Barraza Burgos, J. M., Marriaga-Cabrerales, N., Machuca-Martínez, F., Barajas, M., & Romero, M. (2020). Production and Characterization of Activated Carbon from Coal for Gold Adsorption in Cyanide Solutions. *Ingeniería e Investigación*, 34–44.
- Masto, H., & Xiao, W. L. (15 de 10 de 2013). *GE news*. Obtenido de Sinopec Qilu Plant in China Sets World Record Using GE Gasification Technology: https://www.ge.com/news/press-releases/sinopec-qilu-plant-china-sets-world-record-using-ge-gasification-technology?utm_source
- Nalbandian, H. (2014). *Non-fuel uses of coal*. Londres : IEA Clean Coal Centre.
- Green Hydrogen Organisation. (2023). *Green Hydrogen Standard: The global standard for green hydrogen and green hydrogen derivatives including green ammonia*. . https://gh2.org/sites/default/files/2023-01/GH2_Standard_A5_JAN%202023_1.pdf.
- Offshore Energy. (05 de 12 de 2023). *COP28: 39 countries endorse declaration for mutual recognition of hydrogen standards*. Obtenido de <https://www.offshore-energy.biz/cop28-39-countries-endorse-declaration-for-mutual-recognition-of>
- Springer. (2024). Alternative Fuels Infrastructure Regulation and hydrogen deployment in Europe. *En Advances in Renewable Energy Policy (pp. 25–42)*. Springer, 22-42.
- Ahrens, M., & Depree, C. (2010). A source mixing model to apportion PAHs from coal tar and asphalt binders in street pavements and urban aquatic sediments. *National Institute of Water and Atmospheric Research*, 1526-1535.
- Al-Akbari, R., Manasrah, A. D., & Nassar, N. N. (2024). *Production of humic and fulvic acid analogs through the ultrasonication of low-rank lignite coals*. Obtenido de Reaction Chemistry & Engineering: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/re/d3re00422h>
- Antracitas de Cundinamarca. (s.f.). Obtenido de <https://www.antracitasdecundinamarca.com/>

Aparicio Sánchez, L. K., & Valero Valero, N. (s.f.). EVALUACIÓN DE UN BIOACONDICIONADOR HÚMICO Y ÁCIDOS HÚMICOS COMO BIOESTIMULANTES DE *Brachiaria decumbens* EN UN TECNOSOL POST-MINERÍA.

Ardila, M., López, A., Triviño, P., Molina, C., & Barragán, I. (2018). Determinación del potencial de gasificación de carbones de la provincia Centro de Boyacá para combustión en horno túnel. *PROSPECTIVA*, vol 16 No 1 51-59.

Arenas Castiblanco, E., Chejne Janna, F., Espinel Sánchez, J., Fernández Hincapié, J., Giraldo Mesa, M., Londoño Giraldo, C., . . . Velásquez Vallejo, L. (2005). *UPB*. Obtenido de lanta generadora de gases calientes de uso en procesos industriales: Planta de gases. N.º de patente 22615: <https://investigacion.upb.edu.co/es/publications/planta-generadora-de-gases-calientes-de-uso-en-procesos-industria>

Ask-an-engineer GmbH & CO. KG. (2021). Obtenido de <https://aa-eng.de/es/sobre-nosotros/>

ASTM. (s.f.). *Advancing Standards Transforming Markets*. Obtenido de <https://store.astm.org/d0388-77.html>

Astrup Jensen, A., Hoffman, L., Møller, B., Schmidt, A., Christiansen, K., Elkington, J., . . . Berendsen, S. (1997). *Life Cycle Assessment. A guide to approaches, experiences and information sources*. European Environment Agency (EEA).

Barraza, J., Muñoz, N., & Barona, L. (2014). Asphaltenes and preasphaltenes from coal liquid extracts: feedstocks to obtain carbon mesophase. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 1.

Barraza, J., Portilla, A., & Piñeres, J. (2011). Direct liquefaction of vitrinite concentrates obtained by column flotation. *Fuel Processing Technology*, 776-779.

Barrera, R., Salazar, C., & Pérez, J. (2014). Thermochemical Equilibrium Model of Synthetic Natural Gas Production from Coal Gasification Using Aspen Plus. *International Journal of Chemical Engineering*.

Bastidas Barranco, M., Ortiz Benavides, O., Jaramillo Álvarez, G., & Chejne Janna, F. (2014). Multiobjective Methodology Applied in the Gasification of Coals Mixtures for the Analysis of the Synthesis Gas Composition. En D. Z. Duanling Li, *Advanced Materials Research* (págs. 906-909). Trans Tech Publication.

Bastidas, M., Buelvas, L. M., Márquez, M. I., & Rodríguez, K. (2010). Producción de Carbón Activado a partir de Precursores Carbonosos del Departamento del Cesar, Colombia. *Información Tecnológica Vol 21(3)*, 87-96.

Bayer, P., Heuer, E., Karl, U., & Finkel, M. (2005). Economical and ecological comparison of granular activated carbon (GAC) adsorber refill strategies. *Water Res.* 39 (9), 1719–1728.

- Bayona, G., Valencia, A., Mora, A., Rueda, M., Ortiz, J., & Montenegro, O. (2008). Estratigrafía y procedencia de las rocas del Mioceno en la parte distal de la cuenca antepais de los Llanos de Colombia. *Geología Colombiana*, No. 33 23-46.
- BBC News Mundo. (04 de Mayo de 2024). Obtenido de <https://www.bbc.com/mundo/articles/c3gx8ze2ylmo>
- Bernal, S., Esguerra, J., Galindo, J., Mejía, R., Rodríguez, E., Gordillo, M., & Delvasto, S. (2009). MORTEROS GEOPOLIMERICOS REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO BASADOS EN UN SISTEMA BINARIO DE UN SUBPRODUCTO INDUSTRIAL . *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 587-592 .
- Black Earth. (s.f.). *Black Earth: Leaders in Humic Innovation*. Obtenido de <https://blackearth.com/about/>
- Blandón, A. (1999). *El carbón y sus posibilidades de uso*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Blandón, A. (2007). *Contribución de la materia orgánica sedimentaria a la determinación del paleoambiente y del potencial de generación de hidrocarburos en los carbones de la Formación Amagá (Colombia)*. Medellín: Universidad de Génova .
- BP. (2025). *BP Statistical Review of World Energy Data 2025*. Obtenido de BP Statistical Review of World Energy Dat: <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Branislav Kandra, A. T. (7 de Mayo de 2024). *MPDI*. Obtenido de Effect of Humic Amendment on Selected Hydrophysical Properties of Sandy and Clayey Soils: <https://www.mdpi.com/2073-4441/16/10/1338>
- Brooks, B., Lomas, H., & Tahmasebi, A. (2024). Influence of coal particle composition and maceral associations on fluidity development during the coking process. *Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications*, DOI: 10.1177/03019233241307821.
- Burmistrz, P., Chmielniak, T., Czepirski, L., & Gazda-Grzywacz, M. (2016). Carbon footprint of the hydrogen production process utilizing subbituminous coal and lignite gasification. *Journal of Cleaner Production*, 858-865.
- Caballero Castaño, M., Valero, N. O., & Pantoja Guerra, M. (2022). Revisión: Posibilidades de Bioestimulación con Ácidos Húmicos en Plantas Utilizadas para Fitorremediación. *Ciencia e Ingeniería*, 1.
- Calgon Carbon. (2025). *Calgon Carbon A Kuraray Company*. Obtenido de Structural Dynamics of Activated Carbon: <https://www.calgoncarbon.com/activated-carbon/>
- Carbocoque. (31 de 10 de 2025). *Carbocoque*. Obtenido de Nuestro Producto: <https://www.carbocoque.com/site2/>

- Carlin, N. (2011). Co-combustion and Gasification of Coal and Cattle Biomass: a Review of Research and Experimentation. En N. Carlin, K. Annamalai, & H. Oh , *Green Energy. Progress in Green Energy* (págs. 123–179). Londres: Springer.
- Castaño, L., & Gómez, O. (2001). *Caracterización, origen, evolución y potencial de utilización de los carbones de la "Secuencia volcanoclástica de Aranzazu"*. Manizales: Universidad de Caldas.
- Castiblanco, O., & Milquez, H. (2021). Estudio y simulación de un gasificador con captura de CO₂ para la producción de hidrógeno azul partiendo de carbón colombiano. *Revista UIS Ingenierías*, Vol. 20, n.º 4, pp. 91-100.
- Castiblanco-Urrego , O., & Milquez-Sanabria, H. (2021). Estudio y simulación de un gasificador con captura de CO₂ para la producción de hidrógeno azul partiendo de carbón colombiano . *Revista UIS Ingenierías*, 91-100.
- Charles Swann Coal Merchants. (27 de Enero de 2025). Obtenido de The Science Behind Coal: How It Generates Heat: https://swannscoalsupplies.co.uk/blogs/previews/the-science-behind-coal-how-it-generates-heat?srltid=AfmBOooSCvkpyHvhOr4gj9T7XlisbyAwXCHE6goM-epf4GZ-K_M74tro
- Chejne, F., Lopera, E., & Londoño, C. (2011). Modelling and simulation of a coal gasification process in pressurized fluidized bed. *Fuel the science and technology*, 399-411.
- Chemviron. (13 de 10 de 2023). *World's largest activated carbon manufacturer expands plant capacity in the USA*. Obtenido de News: <https://www.chemviron.eu/worlds-largest-activated-carbon-manufacturer-expands-plant-capacity-in-the-usa/?utm>
- Chen, J., Wang, Q., Xu, Z., Jiaqiang , E., Leng , E., Zhan, F., & Gaoliang, L. (2021). Chen, Jingwei & Wang, Qiteng & Xu, Zhengyong & E, Jiaqiang & Leng, Erwei & Zhang, Feng & Gaoliang, Liao. (2021). Process in supercritical water gasification of coal: Process in supercritical water gasification of coal: A review of fundamentals, mechanisms,. *Energy Conversion and Management*. 237. 10.1016/j.enconman.2021.
- Chen, X., Matthews, H. S., & Griffin, W. M. (2021). Uncertainty caused by life cycle impact assessment methods: Case studies in process-based LCI databases. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Chikri , Y. A., & Wetzels , W. (2021). *DECARBONISATION OPTIONS FOR THE DUTCH ACTIVATED CARBON INDUSTRY*. La Haya.
- China Daily. (117 de 04 de 2025). *China Daily*. Obtenido de http://shanxi.chinadaily.com.cn/taiyuan/2025-04/17/c_895323.htm
- China Shenhua. (2024). *China Shenhua Energy Company Limited* . Obtenido de <http://www.csec.com/zgshwwEn/hgbd/ywtXListContent.shtml>

- Cicek, Z., Agudelo Mira, A., & Huang, Q. (2023). Process development for the extraction of rare earth elements from an acid mine drainage treatment sludge. *Resources, Conservation and Recycling*.
- Cleveland, C. (3 de Marzo de 2025). *Non-energy uses of fossil fuels*. (B. U. Sustainability, Ed.) Recuperado el 23 de 09 de 2025, de Boston University Institute for Global Sustainability - visualizingenergy.org - CC BY 4.0: <https://visualizingenergy.org/non-energy-uses-of-fossil-fuels/>
- Clickmania. (23 de Mayo de 2021). *De la captura a los nuevos usos del CO2; soluciones para mejorar la atmósfera*. Obtenido de <https://clickmica.fundaciondescubre.es/conoce/noticias/captura-de-co2/>
- ClimatePartner. (s.f.). *Carbon dioxide equivalent (CO2e)*. Obtenido de Climate Partner: <https://www.climatepartner.com/en/knowledge/glossary/carbon-dioxide-equivalent>
- Coal Age. (2 de 11 de 2023). *Coal Age*. Obtenido de Ramaco Acquires Development Rights for Graphene from NETL: <https://www.coalage.com/departments/breaking-news/ramaco-acquires-development-rights-for-graphene-from-netl/>
- Cobo, M., Barraza, C., Cantillo, N., & Uribe, M. (2022). *Recomendaciones para el desarrollo de la economía de hidrógeno en Colombia. Una estrategia Nacional de Hidrógeno*. Chía: Universidad de la Sabana.
- Coca, N. (16 de 04 de 2025). *Energy Tracker Asia*. Obtenido de China's Coal Plants Are Risking its Energy Transition: <https://energytracker.asia/china-coal-plants-are-risking-its-energy-transaction/>
- Congreso de la República de Colombia. (2014). *Función Pública*. Obtenido de Ley 1715 de 2014. Diario Oficial 49150 de mayo 13 de 2014: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- Congreso de la República de Colombia. (2019). *Mintransporte*. Obtenido de <https://mintransporte.gov.co/loader.php?IServicio=Tools2&ITipo=descargas&IFuncion=visorpdf&file=https%3A%2F%2Fmintransporte.gov.co%2Floader.php%3FIServicio%3DTools2%26ITipo%3Ddescargas%26IFuncion%3DexposeDocument%26idFile%3D28851%26tmp%3Da34153072b366515e>
- Congreso de la República de Colombia. (2020). *Función Pública*. Obtenido de Ley 2069 de 2020: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=160966>
- Congreso de la República de Colombia. (2021). *Función Pública*. Obtenido de Ley 2099 de 2021. Diario Oficial No. 51.744: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>
- Congreso de la República de Colombia. (2021). *Función Pública*. Obtenido de Ley 2099 de 2021: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>

- Congreso de la República de Colombia. (2021). *MINAMBIENTE*. Obtenido de Ley 2169 de 2021: <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/ley-2169-de-2021/>
- Congreso de la República de Colombia. (2023). *Función Pública*. Obtenido de Ley 2294 de 2023: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=209510>
- Consejo Nacional de Estupefacientes . (2015). *SUIN-Juriscol* . Obtenido de RESOLUCIÓN 0001 DE 2015: <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Resolucion/30031758>
- Council, H. (2021). *Vías de descarbonización del hidrógeno: una evaluación del ciclo de vida*. Bruselas, Bélgica: Consejo de Hidrógeno.
- CQM Consultoría SAS. (2022). *Estudio de modelos de negocio para la producción de hidrógeno azul en Colombia*.
- CREG. (2022). *Gestor Normativo Alejandría 2.0*. Obtenido de RESOLUCIÓN 40303 DE 2022: https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_minminas_40303_2022.htm
- Cristian, S., Arenas, E., Chejne, F., Londoño, C. A., Cisneros, S., & Quintana, J. C. (2016). A new model for coal gasification on pressurized bubbling fluidized bed gasifiers. *Energy Conversion and Management*.
- Cubillos-Hinojosa, J. G., Valero, N. O., & Melgarejo, L. M. (2015). *Assessment of a low rank coal inoculated with coal solubilizing bacteria as an organic amendment for a saline-sodic soil*. Obtenido de Chemical and Biological Technologies in Agriculture: <https://doi.org/10.1186/s40538-015-0048-y>
- Cubillos-Hinojosa, J. G., Valero, N., & Peralta Castilla, A. (2017). Efecto de un carbón de bajo rango inoculado con bacterias . *Revista Facultad Nacional de Agronomía*.
- Dai, S., Bechtel, A., Eble, C., Flores, R., French, D., Graham, I., . . . O ´ Keefe, J. (2020). Recognition of peat depositional environments in coal: A review. *International Journal of Coal Geology*, 219 103383.
- Dakota Gasification Company. (s.f.). *Gasification*. Obtenido de <https://www.dakotagas.com/about-us/gasification/index>
- Das, S., & Nagapurkar, P. (2021). *SUSTAINABLE COAL TAR PITCH CARBON FIBER MANUFACTURING* . US DEPARTMENT OF ENERGY, Fossil Energy Office.
- Daymsa. (s.f.). Obtenido de An amazing story with a promising beginning: <https://daymsa.com/en/about-us/>
- de López, H. A., Florián, M., & Garzón, W. (1982). Estabilización de Fibras de Brea de Carbón. *Revista Colombiana de Química, Bogotá (Colombia), Volumen 21. Nos. 1 - 2*.

Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2022 - 2026. Colombia, Potencia Mundial de la Vida.* . Bogotá.

DNP. (2022). *Departamento Nacional de Planeación*. Obtenido de POLÍTICA PARA IMPULSAR LA COMPETITIVIDAD AGROPECUARIA:
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4098.pdf>

DNP. (2023). *Departamento Nacional de Planeación*. Obtenido de
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/plan-nacional-de-desarrollo-2022-2026-colombia-potencia-mundial-de-la-vida.pdf>

DNP, D. N. (2023). *Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026: Colombia potencia de la vida*. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-03-17-bases-plan-nacional-desarrollo-web.pdf>

DOE. (01 de Agosto de 2022). *U.S. Department of Energy's (DOE)*. Obtenido de <https://netl.doe.gov/node/11930>

DOE. (2025). *Coal to Carbon Fiber (C2CF) Continuous Processing for High Value Composites - FINAL SCIENTIFIC / TECHNICAL REPORT*. Lexington.

DOE. (2025). *Department of Energy*. Obtenido de Hydrogen Program:
<https://www.hydrogen.energy.gov/program-areas/production>

EC. (2023). *European Commission*. Obtenido de https://energy.ec.europa.eu/topics/clean-energy-transition/eu-coal-regions-transition_en

ECCEU, E. C. (21 de 12 de 2023). *Gas package: Council and Parliament reach deal on future hydrogen and gas market*. Obtenido de <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/12/08/gas-package-council-and-parliament-reach-deal-on-future-hydrogen-and-gas-market>

Ecocarbón. (1995). *El carbón. Normas generales, muestreo y análisis*. Bogotá: Ecocarbón.

Eddy, L., Xuan Luong, D., Beckham, J. L., Wyss, K. M., Cooksey, T. J., Scotland, P., . . . Tour, J. M. (2023). Automated Laboratory Kilogram-Scale Graphene Production from Coal. *Small Methods*.

EDGAR. (2025). *EDGAR - Base de datos de emisiones para la investigación atmosférica global*. Obtenido de https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg2025

El Qada, E., Allen, S., & Walker, G. (2008). Influence of preparation conditions on the characteristics of activated carbons produced in laboratory and pilot scale systems. *Chemical Engineering Journal*, Volume 142, Pages 1-13.

Energy, D. o. (2022). *H2A: Modelos de producción de análisis de hidrógeno*.
<https://www.nrel.gov/hydrogen/h2a-production-models>.

- ESingeniería. (s.f.). *Captura y Almacenamiento del CO₂ en forma de roca*. Obtenido de <https://esingenieria.net/captura-y-almacenamiento-de-co2-en-forma-de-roca/>
- Eslava Colmenares, W. (2020). *Revisión documental: La nanotecnología y su influencia en la construcción de la vía terciaria que conduce a la vereda La Balsita, sector Diamante del municipio de Agua de Dios, Cundinamarca*. Girardot: Corporación Universitaria Minuto de Dios.
- Estupiñán, H. A., Vásquez Quintero, C., & Pulido, J. (2006). Obtención de un material carbonáceo activado de antracita para posibles aplicaciones en hidrometalurgia. *Revista Facultad de Ingeniería N.o 37*, 31-40.
- European Council Council of the European Union. (21 de 12 de 2023). *Gas package: Council and Parliament reach deal on future hydrogen and gas market*. Obtenido de <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2023/12/08/gas-package-council-and-parliament-reach-deal-on-future-hydrogen-and-gas-market>
- FENOGE. (2022). *Buenas prácticas en el desarrollo temprano de una planta de amoníaco de bajas emisiones*.
- Flórez, N., & Carrillo, C. (1994). *Estratigrafía de la sucesión litológica basal del Cretácico del Valle Superior del Magdalena*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Franco, C., Lozano-Pérez, A. S., Mendieta-Reyes, N. E., & Guerrero-Fajardo, C. A. (2023). Graphene oxide obtention via liquid phase exfoliation from high-rank coal: A comparison of mineral matter removal by alkaline bath. *MethodsX*.
- Franco, C., & Guerrero Fajardo. (2022). *Exfoliación en fase líquida de carbón de alto rango para obtener óxido de grafeno - Tesis doctorado*.
- Fúquen, J. (2011). *Geología de las planchas 98- Durannia y99- Villa del Rosario. Norte de Santander- Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- Gaurav, S., Sharma, S., Kumar, A., Lai, C. W., Naushad, M., Shehnaz, . . . Stadler, F. J. (2022). Activated Carbon as Superadsorbent and Sustainable Material for Diverse Applications. *Adsorption Science & Technology*.
- Geoestudios. (2008). *Levantamiento de columnas estratigráficas y análisis petrográficos, petrofísicos, bioestratigráficos y geoquímicos en las áreas de Pasto- El Bordo, Cali- Buga y Buga- Cartago. (Cuenca Cauca- Patía)* . Bogotá: ANH.
- Google Patents. (s.f.). Obtenido de roceso de preparación de catalizadores útiles en la licuefacción directa de carbón y el catalizador así obtenido: <https://patents.google.com/patent/WO2010026530A2/es>
- Gordillo, G., & Annamalai, K. (2012). Dairy Biomass-Wyoming Coal Blends Fixed Gasification Using. *Journal of Combustion*, 7.

- Gordillo, G., Annamalai, K., & Carlin, N. (2009). Adiabatic fixed-bed gasification of coal, dairy biomass, and feedlot biomass using an air–steam mixture as an oxidizing agent. *Renewable Energy*.
- Government of India. (2022). *Roadmap for coal to hydrogen production*.
- Grupo Coquecol. (2025). *Informe de Gestión y Sostenibilidad 2022*.
https://www.grupocoquecol.com/wp-content/uploads/2023/04/informe_abril25_digital.pdf.
- Gu, H., Bergman, R., Anderson, N., & Alanya-Rosenbaum, S. (2018). Life cycle assessment of activated carbon from woody biomass. *Wood and Fiber Science*, 50(3): 229-243.
- Guatame, C., & Rincón, M. (2021). Coal petrology analysis and implications in depositional environments from upper Cretaceous to Miocene: a study case in the Eastern Cordillera of Colombia. *International Journal of Coal Science & Technology*, Volume 8, pages 869–896.
- Guatame, C., & Sarmiento, G. (2004). Interpretación del Ambiente Sedimentario de los Carbones de la Guaduas en el Sinclinal Checua-Lenguazaque apartir del análisis petrográfico. *Geología Colombiana*, No 29 41- 57.
- Gyanendra, K., & Kumar, A. (2024). *LCA study of Humics from Extraction to the Point of Delivery in the UK. Final Report*. Earthood Services Limited .
- Havukainen, J., Uusitalo, V., Koistinen, K., Liikanen, M., & Horttanainen, M. (2018). Carbon Footprint Evaluation of Biofertilizers. *Sus. Dev. Plann. Vol. 13, No. 8, 1*.
- Hernández, O., Zapata, V., Salazar, E., & Garzón, F. (2009). *Proyecto Cartografía geológica y modelamiento estructural de las cuencas de Urabá y Sinú San Jacinto a partir de la interpretación de inágenes de sensores reemotos y monitoreo sísmico*. Bogotá: ANH.
- Herrera, A. (2022). *Diseño y Construcción de un Quemador Ciclónico de Biomasa para el Laboratorio de Combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/db400159-3634-43e6-ad71-242c138897d3/content>
- HESC. (21 de 04 de 2022). *Successful Completion of Pilot Project Report. The Fuel of the Future is Here*. Obtenido de Report: Successful Completion of the HESC Pilot Project:
<https://www.hydrogenenergysupplychain.com/report-successful-completion-of-the-hesc-pilot-project/>
- Hoffmann, M. H.-M. (2018). *Evaluation of the possibilities of using humic acids obtained from lignite*. Obtenido de Journal of Soils and Sediments / Springer:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11368-017-1907>
- Huijin Li, S. D. (2023). *Extraction of Humic Acids from Lignite and Its Use as a Biochar*. Obtenido de ACS Omega: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03593>

HUMA. (s.f.). Obtenido de Huma Humates: <https://huma.us/huma-humates/>

Humintech. (s.f.). Obtenido de EXPERTS IN HUMIC SUBSTANCES APPLICATIONS:
<https://www.humintech.com/>

Hussain, Z., Dwivedi, D., & Kwon, I. (2024). Recovery of rare earth elements from low-grade coal fly ash using a recyclable protein biosorbent. *Bioeng. Biotechnol.* 12:1385845.

ICA. (21 de 01 de 2003). *Instituto Colombiano Agropecuario*. Obtenido de Normas ICA- Resoluciones MSF y RT - 2003 - 2003R150: <https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-ica/resoluciones-oficinas-nacionales/2003/2003r150>

ICA. (2003). *Instituto Colombiano Agropecuario*. Obtenido de Resoluciones MSF Y RT - 2003 - 2003R150: <https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-ica/resoluciones-oficinas-nacionales/2003/2003r150>

ICA. (21 de 11 de 2025). *Instituto Colombiano Agropecuario* . Obtenido de DNP-SUCOP - PN-2025-24108: <https://www.sucop.gov.co/entidades/ica/Normativa?IDNorma=24108>

ICONTEC. (12 de 11 de 2025). *e-colleccion - ICONTEC*. Obtenido de ELIGE:
<https://ecollection.icontec.org/normagrid.aspx>

ICSC. (2017). *International Center for Sustainable Carbon - ICSC*. Obtenido de International Center for Sustainable Carbon - ICSC: <https://www.sustainable-carbon.org/blogs/visiting-the-worlds-biggest-single-coal-to-liquid-project-in-yinchuan-china/>

ICSC. (2023). *The Hydrogen Economy and the Role of Coal*. IEA.

IEA. (2021). An Energy sector Roadmap to Carbon Neutrality in China. *International Energy Agency*.

IEA. (2021). *Opportunities for Hydrogen Production with CCUS in China*. International Energy Agency.

IEA. (2022). *IEA*. Obtenido de Opportunities for Hydrogen Production with CCUS in China:
<https://www.iea.org/reports/opportunities-for-hydrogen-production-with-ccus-in-china>

IEA. (2023). *Net Zero Roadmap, A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach*.

IEA. (2024). *International Energy Agency (IEA)*. Obtenido de IEA Coal Report 2024:
<https://www.iea.org/reports/coal-2024>

IEA. (2025). *Global Energy Review 2025*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>

IEA. (11 de 11 de 2025). *Global Hydrogen Review 2025*. Obtenido de Políticas:
<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025/policies>

- IEA. (Septiembre de 2025). *International Energy Agency*. Obtenido de EIA - Glosario:
<https://www.eia.gov/tools/glossary/index.php?id=coal>
- IEA. (05 de 09 de 2025). *Low Carbon Hydrogen Standard*. Obtenido de International Energy Agency:
<https://www.iea.org/policies/27736-low-carbon-hydrogen-standard>
- IESR. (22 de 08 de 2024). *Institute for Essential Services Reform - IESR*. Obtenido de A Story from Shanxi: Hydrogen Pioneering in Shanxi: <https://iesr.or.id/en/a-story-from-shanxi-hydrogen-pioneering-in-shanxi/>
- IHSS. (2007). *International Humic Substances Society*. Obtenido de What are humic substances:
<https://humic-substances.org/what-are-humic-substances-2/>
- IHSS. (2025). Obtenido de <https://humic-substances.org/isolation-of-ihss-soil-fulvic-and-humic-acids/#products>
- Imangazy, A. M., & Kaidar, B. (2021). OBTAINING CARBON FIBERS BASED. *Chemical Journal of Kazakhstan*, 151 – 159.
- IMARC. (22 de 12 de 2025). *Activated Carbon Prices, Trend, Chart, Demand, Market Analysis, News, Historical and Forecast Data Report 2025 Edition*. Obtenido de
<https://www.imarcgroup.com/activated-carbon-pricing-report>
- Indonesian Mining Journal. (2011). Production of Activated Carbon From Subbituminous Coal Using Rotary Kiln and Cyclone Burner.
- Industrias Vasar S.A.S. (s.f.). Obtenido de <https://induvasar.com/productos-agricolas-leonardita-mejorar-crecimiento-plantas-cultivos/>
- International Humic Substances Society. (2007). Obtenido de International Humic Substances Society:
<https://humic-substances.org/what-are-humic-substances-2/>
- IPCC. (2018). Obtenido de https://www.weforest.org/blog/opinion/ippc-global-warming-15-c-special-report-6-oct-2018/?utm_source=google&utm_medium=Grants&utm_campaign=P.Max%3A+WeForest_EN&utm_term=&utm_content=&gad_source=1&gad_campaignid=22972166376&gbraid=0AAAAADrYVLdn_APOfPCQOvyq
- IRENA & AEA. (2022). *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*.
- IRENA. (11 de 11 de 2025). *International Renewable Energy Agency. Policies for green hydrogen*. Obtenido de Overview: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Policy/Policies-for-green-hydrogen>
- Jiang, L., Hu, S., Shatir, A., Hassan, S., Xu, K., Shuai, C., . . . Xiang, J. (2018). Hydrogen-Rich Gas Production from Steam Gasification of Lignite Integrated with CO₂ Capture Using Dual

- Calcium-Based Catalysts: An Experimental and Catalytic Kinetic Study. *Energy & Fuels*, Vol 32/Issue 2.
- Jlménez, G., González, F., Mantilla, L., Rangel, A., & Rubiano, J. (2008). Facies sedimentarias y parámetros geoquímicos para el intervalo Paleoceno superior; Transecta Casanare- Arauca (Piedemonte Llanero, Colombia). *Boletín de Geología*, vol.30 No.2 .
- Jiménez, J. A., Villalba, Ó. A., Rodríguez, L. I., Hernández, O., Agámez, Y. Y., & Díaz, J. d. (2008). CATALIZADORES DE Co, Fe Y Ni SOPORTADOS SOBRE COQUE PARA LA LICUEFACCIÓN DIRECTA DE CARBÓN. *Revista Colombiana de Química*, 233-242.
- JINGFENG. (s.f.). *JINGFENG HUMIC ACID*. Obtenido de Leonardite Humic Acid vs Peat and Compost Which Wins for Soil Health: <https://www.humicchina.com/blog/leonardite-humic-acid-vs-peat-and-compost-which-wins-for-soil-health.html>
- Joseph, B., Kaetzel, K., Hensgen, F., & Schafer, B. (2020). Sustainability assessment of activated carbon from residual biomass used for micropollutant removal at a full-scale wastewater treatment plant. *Environ. Res. Lett.* 15 (6).
- Kaidar, B. B., Smagulova, G. T., Imash, A. A., Zhaparkul, S., & Mansurov, Z. A. (2021). *Pitch-based carbon fibers: preparation and application*.
- Kamnitzer, R. (2024). Storing CO₂ in rock: Carbon mineralization holds climate promise but needs scale-up. *Global Planetary Boundaries*, <https://news.mongabay.com/2024/12/storing-co2-in-rock-carbon-mineralization-holds-climate-promise-but-needs-scale-up/>.
- Keboletse, K., Ntuli, F., & Oladijo, O. (2021). Influence of coal properties on coal conversion processes- coal carbonization, carbon fiber production, gasification and liquefaction technologies: a review. *Int J Coal Sci Technol*, 8(5):817–843.
- Kumar, R., Nayak, K. S., & Vishal, V. (2024). A critical meta-analysis of CO₂-water-rock interaction in basalt for CO₂ storage: A review based on global and Indian perspective. *Marine and Petroleum Geology*, Volume 168, 107002.
- L, L., Liu, Z., & Huang, Z. (2007). Effect of coal rank on the properties of coal-based activated carbon honeycomb monoliths. *Carbon*, Volume 45, Issue 6, 1377.
- Li, J., Wei, Y., Liu, L., Li, X., & Yan, R. (2022). The carbon footprint and cost of coal-based hydrogen production with and without carbon capture and storage technology in China. *Journal of Cleaner Production*, vol 362.
- Liam Bullock, D. B. (Agosto de 2023). *Ethic*. Obtenido de <https://ethic.es/2023/08/rocas-trituradas-para-capturar-dioxido-de-carbono/>
- LÓPEZ, J. R. (2021). *Evaluación del potencial del carbón para su uso como fertilizante con micronutrientes para el suelo*. Obtenido de Universidad de Zaragoza : chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://zaguan.unizar.es/record/101128/files/TESIS-2021-115.pdf?

- Luanwuthi, S., Iamprasertkun, P., Akkharaamnuay, T., Kunyawut, C., Phukhrongthung, A., & Puchongkawarin, C. (2024). Techno-economic and Environmental Assessment of Activated Carbon Electrodes for Supercapacitors from Oil Palm Leaves. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12 (39), 14446-14458.
- Macías Naranjo, J. R., Chejne Janna, F., Montoya Arbeláez, J. I., & Blanco Leal, A. (2014). Gasificación de bagazo de caña y carbón en planta piloto. *Revista Mutis* 4(1);, 24-32.
- MADR. (09 de 09 de 2025). *Minagricultura-Normatividad*. Obtenido de Resoluciones: <https://www.minagricultura.gov.co/Normatividad/Resoluciones/RESOLUCIO%CC%81N%20N0%20000295%202025%20ANEXOS.pdf>
- MADS. (2024). *Plan Estratégico Sectorial. 2023 - 2026*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Malagón M, M. L., Yolanda Rico, R., de López, H., & Caicedo M., L. A. (2001). Obtención de Fibras y Gránulos de Carbono para la Inmovilización de Enzimas. *Revista Ingeniería e Investigación* No. 48.
- Marin, D., & Marchesan, S. (2022). Carbon Graphitization: Towards Greener Alternatives to Develop Nanomaterials for Targeted Drug Delivery. *Biomedicines* .
- Martínez Mendoza, K. L. (2018). *CARBONES COLOMBIANOS COMO MATERIA PRIMA PARA LA PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO EMPLEADO EN LA ADSORCIÓN DE ORO DE SOLUCIONES CIANURADAS*. Santiago de Cali: Universidad del Valle - Proyecto de grado maestría.
- Marx, J., Schreiber, A., Zapp, P., & Walachowicz, F. (2018). Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Permanent Magnet Production from Different Rare Earth Deposits. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. Vol. 6.
- Masto, H., Darling, K., & Coleman, C. (12 de 08 de 2010). *GE news*. Obtenido de One of the World's Largest Coal-to-Olefins Gasification Units Starts Up in China: <https://www.ge.com/news/press-releases/one-worlds-largest-coal-olefins-gasification-units-starts-china>
- Mejía, L. J. (2014). *El carbón, atributos, extracción y usos en Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Mendoza-Rodríguez, G., Buatois, L., Rincón-Martínez, D., & Mángano, M. (2025). Ichnology of a tropical delta and associated strandplain: the Oligocene–Miocene Ciénaga de Oro Formation of Colombia. *Ichnos*, 1-28.

- MINCIENCIAS. (26 de 09 de 2025). *Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación*. Obtenido de Datos abiertos. Producción Grupos Investigación: https://www.datos.gov.co/Ciencia-Tecnolog-a-e-Innovaci-n/Producci-n-Grupos-Investigaci-n/33dq-ab5a/about_data
- MinHacienda, MinMinas, MinComercio. (2022). *Departamento Administrativo de la Función Pública*. Obtenido de Decreto 895 de 2022: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural . (2015). *Función Pública. EVA - Gestor normativo*. Obtenido de Decreto 1071 de 2015: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma>
- Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2021). *Función Pública*. Obtenido de Decreto 1732 de 2021: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma>
- Ministerio de Minas y Energía. (2015). *Función Pública*. Obtenido de Decreto 1073 de 2015: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php>
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Hoja de Ruta de Hidrógeno en Colombia*. Obtenido de Energía: https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf
- Ministerio de Minas y Energía. (2022). *Función Pública*. Obtenido de Decreto 1537 de 2022: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php>
- Ministerio de Minas y Energía. (2022). *Función Pública*. Obtenido de Gestor Normativo : <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php>
- Ministerio de Minas y Energía. (2024). *SUIN-Juriscol* . Obtenido de RESOLUCIÓN 40165 DE 2024: [https://www.suin-juriscol.gov.co/clp/contenidos.dll/Resolucion/30051673?fn=document-frame.htm\\$f=templates\\$3.0](https://www.suin-juriscol.gov.co/clp/contenidos.dll/Resolucion/30051673?fn=document-frame.htm$f=templates$3.0)
- Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2023). *Hoja de Ruta de la Transición Energética Justa (TEJ)*. Obtenido de https://www.minenergia.gov.co/documents/13272/Hoja_de_ruta_transicion_energetica_justa_TEJ_2025.pdf
- MinMinas, MinAmbiente. (2020). *Resolución número 40177 de 2020*. Obtenido de MinAmbiente: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/Resolucion-40177-2020-minminas.pdf>
- MinMinas, MinProtección Social, MinAmbiente. (2009). *MinAmbiente*. Obtenido de Resolución 2604 de 2009: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-2604-de-2009.pdf>
- Mitsubishi Chemical Group. (2025). Obtenido de <https://www.m-chemical.co.jp/carbon-fiber/en/about/method/>

- MME. (2023). (*Ministerio de Minas y Energía de Colombia, 2023*. Obtenido de Hoja de Ruta de la Transición Energética Justa (TEJ): https://www.minenergia.gov.co/documents/13272/Hoja_de_ruta_transicion_energetica_justa_TEJ_2025.pdf
- MME. (09 de 10 de 2023). *Ministerio de Minas y Energía*. Obtenido de https://minenergia.gov.co/documents/13272/Hoja_de_ruta_transicion_energetica_justa_TEJ_2025.pdf
- Modiga, A., Eterigho-Ikelegb, O., & Bada, S. (2024). Investigation of rare earth elements from coal and coal. *International Journal of Coal Science & Technology*.
- Montaño, P., Nova, G., Bayona, G., Mahecha, H., Ayala, C., Jaramillo, C., & Parra, F. (2016). Análisis de las secuencias y procedencia en sucesiones sedimentarias de grano fino; un ejemplo de la formación Umir y base de la formación Lisama, en el sector de Simacta (Santander, Colombia). *Boletín de Geología*, vol. 38, núm. 1, pp. 51-72.
- Montes, C., Bayona, G., Jaramillo, C., Ojeda, C., Molina, M., & Herrera, I. (2005). Uplift of the Sierra Nevada de Santa Marta and subsidence in the Cesar-Ranchería valley: Rigid-beam pivot model. *6ª International Symposium of Andean geodynamics* (págs. 520-523). https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers09-03/010040292.pdf.
- Munoz-Morales, M., Sanchez-Ramos, D., Medina-Díaz, H. L., Lopez-Bellido, F. J., Alonso-Azcarate, J., Fernández - Morales, F. J., & Rodríguez, L. (2025). Are abandoned mine tailings a valuable resource for recovering Rare Earth Elements? Life cycle assessment and cost analysis. *Journal of Cleaner Production*.
- Munuera, J., Britnell, L., Santoro, C., Cuéllar-Franca, R., & Casiraghi, C. (2021). A review on sustainable production of graphene and related life cycle assessment. *2D Materials*, 35.
- Nagapurkar, P., & Lara-Curzio, E. (2023). Technoeconomic and life cycle energy analysis of carbon fiber manufactured from coal via a novel solvent extraction process. *International Journal of Coal Science & Technology*.
- Nalbandian, H. (2014). *Non-fuel uses of coal*. Londrés: IEA Clean Coal Centre.
- Nalbandian, H. (2014). *Non-fuel uses of coal*. Londres: IEA Clean Coal Centre.
- NASA. (s.f.). *National Aeronautics and Space Administration*. Obtenido de Technology Readiness Levels: <https://esto.nasa.gov/trl/>
- NCA. (2019). *National Coal Council. Coal in a New Carbon Age. Powering a Wave of Innovation in Advanced Products & Manufacturing*.
- NETL. (30 de 09 de 2020). *National Energy Technology Laboratory*. Obtenido de NETL Coal-to-Graphene Project Wins Prestigious R&D 100 Award: <https://netl.doe.gov/node/10165>

- NETL. (2021). *Carbon Ore to Products Ore. Project Portfolio 2021*. Houston, Tx and Anchorage, AK.: National Energy Technology Laboratory.
- NETL. (2025 en SASOL). *National Energy Technology Laboratory*. Obtenido de British Gas/Lurgi Gasifier: <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/lurgi>
- NETL. (29 de 05 de 2025). *National Energy Technology Laboratory*. Obtenido de ETL Patents New Process for Extracting Critical Resources from Coal Fly Ash at High Quantities: <https://www.netl.doe.gov/node/14830>
- NETL. (2025, en GL Industrial Services, Leicestershire, UK). *National Energy Technology Laboratory*. Obtenido de British Gas/Lurgi Gasifier: <https://netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/bgl>
- NETL. (s.f.). *National Energy Technology Laboratory*. Obtenido de Gasifipedia - 10.5. Indirect Liquefaction Processes: <https://netl.doe.gov/research/carbon-management/energy-systems/gasification/gasifipedia/indirect-liquefaction>
- NETL. (s.f.). *National Energy Technology Laboratory*. Obtenido de <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/coal-to-sng-process>
- NETL, N. E. (2006). The NETL Turbine Handbook. En M. Ramezan, G. Stiegel, & H. G. McIlvried, 1.2 *Integrated Coal Gasification Combined Cycle (IGCC)*. Morgantown: National Energy Technology Laboratory.
- Nieweś, D., Huculak-Mączka, M., Braun-Giwerska, M., Marecka, K., Tyc, A., Biegun, M., . . . Hoffmann, J. (2022). *Ultrasound-Assisted Extraction of Humic Substances from Peat: Assessment of Process Efficiency and Products' Quality*. Obtenido de Molecules: <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/11/3413>
- Norit Activated Carbon. (2025). Obtenido de Activated Carbons: <https://norit.com/activated-carbons>
- Norton Rose Fulbright logo. (07 de 2025). *Understanding hydrogen in the EU*. Obtenido de <https://www.nortonrosefulbright.com/en-419/knowledge/publications/7b3fdaed/understanding-hydrogen-in-the-eu>
- Nowak, M. A., Dilo, P. A., & Srivastava, R. D. (2004). Coal Conversion. En M. Nowak, A. Dilo Paul, & R. D. Srivastava, *Encyclopedia of Energy* (págs. 425-434). Massachusetts, United States: Elsevier B.V.
- Núñez, M., & Saavedra, J. (2006). *Definición de un modelo est ´ tico para ls formaciones Barco y Catatumbo, Campo Sardinata, Cuenca Catatumbo, Colombia*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- OCDE. (2023). *Risk-based Regulatory Design for the Safe Use of Hydrogen*. París: OECD Publishing.

- Ochoa Díaz, R., Montañez, A., & Cuentas, J. (2016). Coal tar, material used in soil improvement for use in road engineering. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Office of Systems Engineering and Architecture. (2025). *Technology Readiness Assessment Guidebook*. Washinton, D.C.
- Offshore Technology*. (28 de 08 de 2008). Obtenido de Shenhua Coal to Liquids Plant, China: <https://www.offshore-technology.com/projects/shenhua/>
- Ohio University . (s.f.). *Research*. Obtenido de Coal to Graphene(C2G) Process: <https://www.ohio.edu/research/tto/technologies/environmental-science/coal-graphene-c2g-process>
- Olaya, I., León, K., Reyes, G., & Snatos, Y. (2024). *Caracterización sedimentológica del sector central de la formación Seca, en la parte occidental del sinclinal de San Pedro (Municipio de Caparrapí - Cundinamarca)*. Bucaramanga: UIS.
- Ozdoba, D. M., Blyth, J. C., Engler, R. F., & Schnitzer, M. (16 de 10 de 2025). *SOURCE CHARACTERIZATION OF HUMIFIED ORGANIC MATTERS*. Obtenido de <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/148034/docs/source-characterization-of-humified-organic-matters.pdf>
- Paredes, J., Romero, L., De Bedout, D., & Bernal, C. (2019). Análisis próximos y petrografía orgánica del carbón de la formación Los Cuervos en el sector de Chucarima (Chitagá, Norte de Santander) Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, No 45 .
- Patiño Mejía, Robinson Eduardo ; Guatame Aponte, Clara Liliana ; Monroy Vásquez, Willian Orlando ;. (2020). *TIERRAS RARAS EN LAS CUENCAS CARBONÍFERAS DE COLOMBIA*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- Pavloudakis, F., Karlopoulos, E., & Pagouni, C. (2023). THE EMERGENCE OF NON-ENERGY USES OF COAL AND THE FUTURE OF LIGNITE MINING IN A REGION OF LOW CARBON FOOTPRINT, A CASE STUDY. *Revista Minelor Mining Revue*, 63-78.
- Paz del Río. (31 de 10 de 2025). *Paz del Río es Colombia*. Obtenido de Otros productos : <https://www.pazdelrio.com.co/otros-productos/>
- Pérez-Bayer, J., Barrera-Zapata, R., & Salazar-Jiménez, C. A. (2016). Effect of Colombian coal rank and its feeding technology on substitute natural gas production by entrained gasification. *Revista Facultad de Ingeniería*, 41-53.
- Picula, D. (2024). The Use of Products from Leonardite to Improve Soil Quality in Condition of Climate Change. *Sciendo*, 15-22.

- Pinto, J., Mora, P., Reátiga, G., Rey, J., Toloza, S., Torres, D., . . . Zafra, C. (2010). *Geología Del Piedemonte Llanero en La Cordillera Oriental, Departamentos de Arauca y Casanare. Memoria*. Bogotá: Ingeominas.
- Portal Agrícola . (11 de 20 de 2025). Obtenido de Agroquímicos de Colombia :
<https://www.buscador.portalteconoagricola.com/vademecum/col/categorias?categoria=Extrato%20h%C3%BAmico>
- Preciado, J. E., Ortiz-Martinez, J. J., Gonzalez-Rivera, J. C., Sierra-Ramirez, R., & Gordillo, G. (2012). Simulation of Synthesis Gas Production from Steam Oxygen Gasification of Colombian Coal Using Aspen Plus. *Energie*.
- Prenzel, T. M., Hohmann, A., Prescher, T., Angerer, K., Wehner, D., Ilg, R., . . . Albrecht, S. (2024). Bringing Light into the Dark—Overview of Environmental Impacts of Carbon Fiber Production and Potential Levers for Reduction. *Polymers* 16, 12.
- Qizhong Chemical. (s.f.). *Qizhong Chemical*. Obtenido de Premium Granular Activated Carbon Manufacturer: <https://qizhongcarbon.com/product/extruded-activated-carbon/?utm>
- Ramaco Resources - Fluor Corporation. (2025). *Summary of Brook Mine Rare Earth Project Preliminary Economic Assessment (PEA) Report*.
- Rani, J., Kumari, S., & Paul, B. (2024). *Extraction and chemical characterization of humic acid produced from lignite coals of arid region of Gujarat, Western India*. Obtenido de Scientific Reports: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81861-6>
- Ratanaprommanee, C. (2016). *Chemical and biological properties of leonardite and its potential use for soil fertility and rice yield improvements*. Obtenido de https://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2016/soilna9122016cyrpm_tpg.pdf
- Reid, I. (2025). *Coal as a resource - gasification and chemicals*. Gloucester: International Centre for Sustainable Carbon.
- Rincón, J., Camacho, H., & Polanía, A. (1993). Evaluación de la reactividad hacia la gasificación del carbón del Cerrejón. *Revista Colombiana de Química*, VOLUM 22, No. 2.
- Rincón, J., Rincón, S., Guevara, P., Ballén, D., Morales, J. C., & Monroy, N. (2015). Producción de carbón activado mediante métodos físicos a partir de carbón de El Cerrejón y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales provenientes de tintorerías. *Rev. acad. colomb. cienc. exact. fis. nat. vol.39*.
- Ritchie, H., Rosado, P., & Roser, M. (Enero de 2024). *Greenhouse gas emissions*. Obtenido de Our World in Data: <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>
- Rivera, J., Mejia, J., Mejia de Gutierre, R., & Gordillo, M. (2014). Hybrid cement based on the alkali activation of by-products of coal. *Journal of Construction*, 31-39.

- Rodríguez, G., Zapata, G., & Bermúdez, J. (2013). *Cartografía geológica de la plancha 62 la Ye. Departamentos de Córdoba y Sucre. Servicio Geológico Colombiano*. Medellín: Servicio Geológico Colombiano.
- Rodríguez, J. (2012). *Identificación de las posibles fuentes de lignitos oxidados presentes en el sector Cruz de Murcia. Municipio de Paipa y sus posibles aplicaciones medio ambientales*. Bogotá: Universidad de la Sabana.
- Rodriguez, W. (2023). *Techno-economic and environmental analysis of alternative pathways for urea fertilizer production*. Master's thesis.
- Romero Farfán, M., Murillo Vega, H., & Trujillo Pinto, F. (2016). Feasibility for the use of coal tar as a new material for road surfaces (pavement) construction. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Rosso Murillo, J. (2013). Underground coal gasification technology impact on coal. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 9-24.
- Sanabria Grajales, L. E. (s.f.). *Nanomateriales y nanotecnología para la construcciones de vías*.
- Santos, A., Guedes, A., French, D., Futuro, A., & Valentim, B. (2022). Integrative Study Assessing Space and Time Variations with Emphasis on Rare Earth Element (REE) Distribution and Their Potential on Ashes from Commercial (Colombian) Coal. *Minerals 2022*.
- Schobert, H. (2013). Chemistry of Fossil Fuels and Biofuels. En H. Schobert, *Chemistry of Fossil Fuels and Biofuels* (págs. 415 - 434). Cambridge: Cambridge University Press.
- SGC. (2012). *El carbón colombiano. Recursos, reservas y calidad*. Bogotá: SGC.
- SGC. (2012). *Servicio Geológico Colombiano. El carbón colombiano. Recursos, reservas y calidad*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- SGC. (5 de noviembre de 2016). *Mapa potencial carbonífero*. Obtenido de https://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Mapa_Potencial_Carbonifero_Colombia/
- SGC. (08 de 06 de 2022). *Servicio Geológico Colombiano*. Obtenido de Proyecto de Investigación para el Aprovechamiento de carbones y subproductos (Fase tierras raras): <https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Proyecto-de-Investigacion-para-el-Aprovechamiento-de-carbones-y-subproductos.aspx>
- SGC. (10 de Noviembre de 2025). *Portal datos abiertos*. Obtenido de Portal datos abiertos: <https://datos.sgc.gov.co/maps/0fd8488d21d14cad952cbacbe3fa3164/explore?location=6.734600%2C-71.484000%2C6&path=>
- SGC. (s.f.). *Servicio Geológico Colombiano*. Obtenido de <https://datos.sgc.gov.co/maps/0fd8488d21d14cad952cbacbe3fa3164/explore?location=6.734600%2C-71.484000%2C6>

- Shanxi Jinfeng Biotechnology Co. (s.f.). *Shanxi Jinfeng Biotechnology Co.* Obtenido de <https://www.jinfeng-biotech.com/humic-acid/>
- Sheng Ming Cheng, X. C. (2025). *Síntesis de carbón activado a partir de carbón de Zhundong y su aplicación en el almacenamiento de hidrógeno.* Obtenido de Revista Internacional de Ciencia y Tecnología del Carbón : <https://link.springer.com/article/10.1007/s40789-025-00811-3?>
- Smolinski, A., Wochna, S., & Howaniec, N. (2022). Gasification of lignite from Polish coal mine to hydrogen-rich gas. *International Journal of Coal Science & Technology*, 9:77.
- Song, C., & Schobert, H. (1996). Non-fuel uses of coals and synthesis of chemicals and materials. *Elsevier*, 724-736.
- Speight, J. G. (2013). *The Chemistry and Technology of Coal*. Boca Ratón: Taylor & Francis Group.
- Speight, J. G. (2020). *Handbook of Gasification Technology Science, Processes, and Applications*. USA and Scrivener Publishing LLC.
- Spencer, W., Senanayake, G., Altarawneh, M., & Ibana, D. (2024). Review of the effects of coal properties and activation parameters on activated carbon production and quality. *Minerals Engineering*, 108712.
- Suneeta Carbons. (11 de 2025). *Carbon Basics*. Obtenido de Suneeta Carbons: <https://www.suneetacarbons.com/carbon-basics.html>
- Suneeta Carbons. (2026). *Suneeta Carbons*. Obtenido de Coal Based Granular & Powder Activated Carbon: <https://www.suneetacarbons.com/coal-based-granular-and-powder-activated-carbon.html>
- Syngaschem BV. (12 de 12 de 2016). Obtenido de <https://www.syngaschem.com/2016/12/12/synfuels-china-demonstrates-first-fischer-tropsch-products-from-the-new-shenhua-ningxia-coal-to-liquids-plant/?utm>
- Tan, K. (2003). *Humic Matter on soil and the environment- Genesis of humic matter*. New York: CRC press.
- TradeMap. (2025). Obtenido de https://www.trademap.org/Country_SelProduct.aspx?nvpm=3%7c%7c%7c%7c%7c2704%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c2%7c1%7c%7c1
- Tu, K. J. (2024). *Prospects of the Chinese coal chemical industry in an increasingly carbon-constrained world*. The Oxford Institute for Energy Studies.
- UIS, G. D. (2007). *Prospectividad de la cuenca Cesar Ranchería*. Bogotá: ANH.
- UN. (2025). *United Nations Statistics Division*.

- Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2022). *Gestor Normativo Alejandría 2.0*. Obtenido de RESOLUCIÓN 319 DE 2022:
https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_upme_0319_2022.htm
- Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2022). *UPME*. Obtenido de RESOLUCIÓN No. 000468 de 2022: https://www1.upme.gov.co/Normatividad/468_2022.pdf
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (s.f.). *ARTICLE 1. DEFINITIONS**. Obtenido de <https://unfccc.int/resource/ccsites/zimbab/conven/text/art01.htm>
- Universal Matter. (2023). *News*. Obtenido de <https://www.universalmatter.com/news/universal-matter-to-acquire-applied-graphene-materials-main-operating-businesses/>
- Universal Matter. (s.f.). *Our Proprietary Technology*. Obtenido de Universal Matter Advanced Materials : <https://www.universalmatter.com/our-proprietary-technology/>
- Universidad China de Minería y Tecnología, Universidad Politécnica de Henan, Universidad Central del Sur de Silvicultura y Tecnología. (31 de Marzo de 2019). *Extracción de ácido húmico de lignito mediante el método hidrotermal con KOH*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/7/1356?>
- Universidad de la Sabana. (2022). *Recomendaciones para el desarrollo de la economía del hidrógeno en Colombia*.
- Uribe, L., López, M., & González, A. (2013). ACTIVACIÓN DE CARBÓN MINERAL MEDIANTE PROCESO FÍSICO EN HORNO TUBULAR HORIZONTAL Y ATMÓSFERA INERTE. *Revista Colombiana de Materiales*, 25-40.
- USGS. (8 de Marzo de 2019). Obtenido de <https://www.usgs.gov/news/featured-story/making-minerals-how-growing-rocks-can-help-reduce-carbon-emissions>
- Valdés, C., Chejne, F., Marrugo, G., Macías, R., Gómez, C., Montoya, J., . . . Arenas, E. (2016). Co-gasification of sub-bituminous coal with palm kernel shell in fluidized bed coupled to a ceramic industry process. En *Applied Thermal Engineering* (págs. 1201-1209). T.S. Zha.
- Valero Valero, N. O. (2024). Carbón de bajo rango como mejorador del suelo y estimulador. *REVISTA PRODUCCIÓN + LIMPIA-Vol. 19 No 2 – julio/diciembre*.
- Vargas, V., Pardo, A., Gallego, N., Restrepo, S., & Muñoz, J. (2022). Procedencia de la Formación El Cerrito en el Cinturón Plegado de San Jacinto: implicaciones paleogeográficas para el Caribe colombiano. *Boletín de Geología*, vol. 44, No 3.
- Velandia, F. (2001). *Memoria Explicativa Mapa Geológico del Departamento del Huila -Ingeominas*. Bogotá: Ingeominas.

- Vélez, J., Chejne, F., Valdés, C., Emery, E., & Londoño, C. (2009). Co-gasification of Colombian coal and biomass in fluidized bed: An experimental study. En *FUEL the science and technology* (págs. 424-430). Elsevier.
- Vilén, A., Laurell, P., & Vahala, R. (2022). Comparative life cycle assessment of activated carbon production from various raw materials. *Journal of Environmental Management*, 324 116356.
- Ward, C., & Suárez-Ruiz, I. (2008). Chapter 1. Introduction to applied coal petrology. En C. Ward, & I. Suárez-Ruiz, *Applied Coal petrology* (págs. 1-18). Burlington: Elsevier.
- Wei, J., Chen, Z., Zhang, H., Fan, J., Zhang, Y., & Zhang, W. (2024). Energy, exergy and economic(3E) analyses of a CO₂ near-zero-emission power generation system with integrated supercritical water gasification of coal and SOFC. *Energy*, 301 131708.
- Wei, X.-Y., Zong, Z.-M., Fan, X., & Li, Z.-K. (2015). Coal-Based Products and Their Uses. En M. Riazi, & R. Gupta, *Coal production and processing technology* (págs. 383-412). Rajender .
- Wood Mackenzie. (2025). *Wood Mackenzie*. Obtenido de <https://www.woodmac.com/store/industry-sector/coal/>
- Wroclaw University of Science and Technology. (25 de Mayo de 2022). *Ultrasound-Assisted Extraction of Humic Substances from Peat: Assessment of Process Efficiency and Products' Quality*. Obtenido de <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/11/3413?>
- WSA. (2024). *World Steel Association*. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2024.pdf>.
- Yadav, B., & Shuhaib, T. (26 de Julio de 2024). *Coal Ministry Drives Initiatives to Boost Coal Gasification Projects Across the Nation*. Obtenido de Ministry of Coal: https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2037489&utm_source
- Yang, Y., Li, Y., Zhang, Y., Wang, M., Wang, P., & Liu, D. (2024). Process Condition Optimization and Structural Feature Analysis of Humic Acid Extraction from Weathered Lignite. *ACS Omega*.
- Yue, G., Junfu, L., & Yang, H. (2017). COAL COMBUSTION. En F. W. Yi Cheng, *Multiphase Reactor Engineering for Clean and Low-Carbon Energy Applications*. John Wiley & Sons, Inc.
- Zapata Benabithé, Z., Rojas Rodríguez, D. A., Arenas Castiblanco, E., Chejne Janna, F., Londoño Giraldo, C., & Pérez Schile, J. D. (2005). PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CARBÓN SUBBITUMINOSO EN REACTORES DE LECHO FLUIDIZADO POR PROCESO AUTOTÉRMICO. *DYNA*, 72(147), 47-56.
- Zhang, D., Mu, C., He, Y., Lai, W., Liu, H., Liu, Q., & Song, K. (2023). Preparation and characterization of high performance coal tar pitch-based carbon fiber. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 32(2), 128–140.

Zhang, L., Pan, J., Chen, H., Yang, F., Long, X., Yang, Y., & Zhou, C. (2025). Rare earth elements recovery and mechanisms from coal fly ash by column leaching using citric acid. *Separation and Purification Technology*.

Zuo, P., Shaobo, F., Xiaoqiang, H., Hongxian, N., Shijie, Q., & Shen, W. (2025). Preparation of pitch-based carbon fiber from medium coal tar pitch refined by wash oil. *Fuel*.

ANEXOS

Anexo 1. Criterios de selección de producción de los grupos de investigación MinCTI.

1. Se utilizó la base datos Producción_Grupos_Investigación_ extractada el 26-09-2025 del sitio https://www.datos.gov.co/Ciencia-Tecnolog-a-e-Innovaci-n/Producci-n-Grupos-Investigaci-n/33dq-ab5a/about_data
2. Se filtró la información de las columnas NME_TIPOLOGIA_PD, seleccionando las siguientes:
 - Artículos de investigación
 - Artículos
 - Capítulos de libros
 - Informe final de investigación
 - Libros, capítulo de libro de investigación
 - Libros de investigación
 - Tesis de doctorado
 - Consultoría científico-técnica
 - Informe técnico final
 - Consultorías
 - Patente de invención
 - Innovaciones en procedimiento y servicio
 - Patente modelo de utilidad
 - Innovación de procedimiento
 - Planta piloto

Para este documento investigativo se seleccionaron los registros de información uno a uno, utilizando el campo NME_PRODUCTO_PD, y teniendo como criterios los productos que estuvieran relacionados con los usos del carbón o los procesos asociados. Lo anterior para cubrir el ciclo de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i).

Posteriormente, se efectuó la búsqueda en la base de datos de los procesos y productos, tanto en inglés como en español, asociados a los usos no convencionales del carbón identificados en la tabla 2 - Usos convencionales y no convencionales del carbón. Finalmente, se determinó la temática del producto relacionado y, cuando fue posible, la materia prima utilizada.

Anexo 2. Producción científica a partir de la seleccionada conforme al anexo 1.

➤ Gas de síntesis, gasificación, licuefacción y amoníaco.

Se identificaron 50 documentos de producción científica y tecnológica relacionados con la producción de gas de síntesis, en los cuales, las principales materias primas referenciadas corresponden a: biomasa (46 %), carbón (26 %) y carbón vegetal (10 %), lo que representa el 82 % del total de materias primas mencionadas en los documentos asociados al gas de síntesis. Se destaca que la mayoría de los documentos en los que el carbón se emplea como materia prima corresponden a estudios de co-gasificación y co-combustión.

En cuanto a la gasificación, se identificaron cuatro documentos: tres en los que la materia prima es biomasa y uno que utiliza carbón; además, para licuefacción y la producción de amoníaco, se identificaron ocho y veinticuatro documentos, respectivamente. Los documentos sobre licuefacción hacen referencia explícita al carbón o a la vitrinita, uno de los cuales corresponde a una patente de invención, todos los documentos se asocian a procesos de licuefacción directa. En cuanto a los estudios sobre amoníaco consultados, no se encuentra mención si en la cadena de valor se empleó el carbón.

Tabla 18. Producción científica asociada a gas de síntesis.

Tema	Gas de síntesis
Materia prima	Cuenta de Materia prima
Biomasa	23
Carbón	13
Carbón vegetal	5
Material carbonoso	4
No identificado	1
Lodos de alcantarillado	1
Asfáltenos	1
Biogás y etanol	1
Crudo de petróleo	1
Total general	50

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

Los trece estudios en los que se utilizó el carbón como materia prima se listan en la siguiente tabla:

Tabla 19. relación de estudios en los que se utilizó carbón como materia para producir gas de síntesis.

Nombre del producto	Nombre de la tipología del producto	Nombre del grupo de investigación
1. Caracterización de carbones de la provincia centro de Boyacá para determinar su aplicabilidad en el proceso de gasificación para cocción de productos cerámicos en la Ladrillera Fénix Tunja S.A.S.	Informe técnico final	Grupo Interdisciplinario e Interinstitucional de Carbones y Carboquímica

Nombre del producto	Nombre de la tipología del producto	Nombre del grupo de investigación
2. Presentación de Informes de Avance Modelamiento y Diseño de un Gasificador de Carbones y Mezclas carbón Biomasa de la Provincia del Centro de Boyacá.	Informe Final de Investigación	Grupo Interdisciplinario e Interinstitucional de Carbones y Carboquímica
3. Consultoría para el estudio experimental del proceso de gasificación de carbón en Ladrillera Fénix SAS Tunja.	Consultoría científico-técnica	Grupo Interdisciplinario e Interinstitucional de Carbones y Carboquímica
4. Co-combustion and Gasification of Coal and Cattle Biomass: a Review of Research and Experimentation.	Capítulos de libro de investigación	Conversión de Energía
5. Simulation of synthesis gas production from steam oxygen gasification of Colombian bituminous coal using Aspen Plus.	Artículos	Conversión de Energía
6. Underground coal gasification technology impact on coal reserves in Colombia.	Artículos	Estudios en finanzas y economía financiera
7. Thermochemical equilibrium model of synthetic natural gas production from coal gasification using aspen plus.	Artículo de investigación	Grupo de Manejo Eficiente de la Energía, GIMEL
8. A new model for coal gasification on pressurized bubbling fluidized bed gasifiers.	Artículo de investigación	Grupo de Energía y Termodinámica
9. Adiabatic fixed bed Gasification of coal, dairy biomass, and feedlot biomass using an Air-Steam mixture as Oxidizing Agent.	Artículo de investigación	Conversión de Energía
10. Co-gasification of Colombian coal and biomass in fluidized bed: An experimental study.	Artículo de investigación	Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas
11. Co-gasification of sub-bituminous coal with palm kernel shell in fluidized bed coupled to a ceramic industry process.	Artículo de investigación	Grupo de Energía y Termodinámica
12. Modelling and simulation of a coal gasification process in pressurized fluidized bed.	Artículo de investigación	Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas
13. Multiobjective Methodology Applied in the Gasification of Coals Mixtures for the Analysis of the Synthesis Gas Composition.	Artículo de investigación	Grupo de Energías Alternativas y Biomasa

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

Tabla 20. Producción científica asociada a gasificación.

Tema	Gasificación
Materia prima	Cuenta de Materia prima
Biomasa	3
Carbón	1
Total general	4

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

Tabla 21. Relación Producción científica asociada a gasificación.

Nombre del producto	Nombre de la tipología del producto	Nombre del grupo de investigación
1. Adiabatic Gasification and Pyrolysis of Coffee Husk Using Air-Steam for Partial Oxidation.	Artículos	Conversión de Energía
2. Gasification from waste organic materials.	Artículos	Aprovechamiento energético de recursos naturales
3. Hydrogen production by gasification of biomass from copoazu waste.	Artículos	VOLTA - GMCDP
4. Dairy Biomass-Wyoming Coal Blends Fixed Gasification Using Air-Steam for Partial Oxidation.	Artículos	Conversión de Energía

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

Tabla 22. Producción científica asociada a gas.

Materia prima	Cuenta de Materia prima
Gases en la Cuenca de Amaga	1
Total, general	1

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

Tabla 23. Producción científica asociada a licuefacción.

Materia prima	Cuenta de Materia prima
Carbón	7
Vitrinita (componente maceral del carbón).	1
Total general	8

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

Tabla 24. Relación Producción científica asociada a licuefacción.

Nombre del producto	Nombre de la tipología del producto	Nombre del grupo de investigación
1. Process for making a catalyst suitable for direct coal liquefaction and the catalyst thereof.	Patente de invención	Laboratorio de Investigación en Combustibles y Energía
2. Modificación de la química superficial de un coque y su aplicación como soporte de catalizadores en la licuefacción directa de carbones. Informe final.	Informe Final de Investigación	Laboratorio de Investigación en Combustibles y Energía
3. Asphaltenes and preasphaltenes from coal liquid extracts: feedstocks to obtain carbon mesophase.	Artículo de investigación	Ciencia y Tecnología del carbón
4. Catalizador de Co, Fe y Ni soportados sobre coque para licuefacción directa del carbón.	Artículo de investigación	Grupo de Investigación en Procesos Químicos y Bioquímicos
5. Direct liquefaction of coal fractions having high concentration of vitrinite maceral.	Artículo de investigación	Ciencia y Tecnología del carbón
6. Direct liquefaction of vitrinite concentrates obtained by column flotation.	Artículo de investigación	Ciencia y Tecnología del carbón
7. Licuefacción directa de carbones enriquecidos en el maceral virinita procedentes de la mina El Cerrejón (Guajira - Colombia).	Informe Final de Investigación	Ciencia y Tecnología del carbón
8. Licuefacción catalítica directa de carbones. Efecto de la temperatura.	Artículo de investigación	Laboratorio de Investigación en Combustibles y Energía

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

Tabla 25. Producción científica asociada a amoníaco.

Materia prima	Cuenta de Materia prima
No se identifica relación con carbón	24
Total general	24

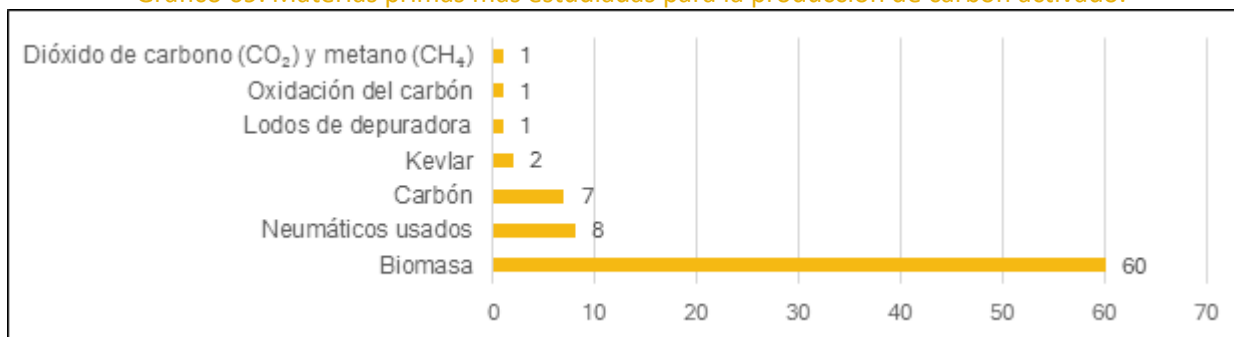
Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

➤ **Producción de carbón activado – usos y estudios relacionados**

En esta agrupación se incluyen las materias primas utilizadas para la producción de carbón activado, de manera complementaria se contabilizaron los estudios orientados a la identificación y validación de los diferentes usos potenciales del carbón activado.

A partir de la muestra seleccionada de producción científica, se identificó que la biomasa (75 %), los neumáticos usados (10 %) y el carbón (9 %) constituyen el 94 % de las materias primas más estudiadas para la producción de carbón activado.

Gráfico 69. Materias primas más estudiadas para la producción de carbón activado.



Fuente: elaboración propia a partir de depuración de la base de datos de la Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

Tabla 26. Materias primas utilizadas en los estudios de producción de carbón activado.

Tema	Producción de carbón activado
Materia prima	Cuenta
Biomasa	60
Neumáticos usados	8
Carbón	7
Kevlar	2
Lodos de depuradora	1
Oxidación del carbón	1
Dióxido de carbono (CO ₂) y metano (CH ₄)	1
Total general	80

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

Tabla 27. Relación de estudios en los que se utilizó carbón como materia para producir carbón activado.

Nombre del producto	Nombre de la tipología del producto	Nombre del grupo de investigación
1. Identificación de alternativas para Producción de carbón activado a partir de carbón del Cerrejón y su Análisis de mercado nacional e internacional.	Consultoría científico-técnica	Centro de Desarrollo Industrial Tecsol
2. Activación química del carbón de Montelíbano Cordoba con KOH.	Capítulo de libro	Procesos Químicos y Bioquímicos Sostenibles
3. Producción de carbón activado mediante métodos físicos a partir de carbón de El Cerrejón y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales provenientes de tintorerías.	Artículos	Biomasa y Optimización Térmica de Procesos - BIOT

Nombre del producto	Nombre de la tipología del producto	Nombre del grupo de investigación
4. Activated Carbon Production from Carbonaceous Precursors of the Department of Cesar, Colombia.	Artículo de investigación	Grupo de Energías Alternativas y Biomasa
5. Adsorción catalítica de NO a baja temperatura sobre monolitos de carbón activado.	Artículo de investigación	Química de Recursos Energéticos y Medio Ambiente
6. Producción de carbón activado a partir de precursores carbonosos del departamento del Cesar, Colombia.	Artículo de investigación	Grupo de Energías Alternativas y Biomasa
7. Synthesis of Activated Carbon Honeycomb Monoliths under Different Conditions for the Adsorption of Methane.	Artículo de investigación	Sólidos Porosos y Calorimetría Aplicada

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

Tabla 28. Producción científica asociada a usos y estudios del carbón activado

Tema	Cuenta
Usos y estudios	68
Total general	68

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

➤ Sustancias húmicas

Entre los usos no convencionales del carbón se encuentran las sustancias húmicas (ácidos húmicos y fúlvicos) las cuales se puedan extraer del lignito y de carbones sub bituminosos. Los estudios relacionados fueron realizados principalmente por el SGC en los departamentos de Córdoba y en el Piedemonte Llanero.

Tabla 29. Producción científica asociada a sustancias húmicas.

Tema / materia prima	Cuenta
Hongos biotransformadores de Lignito	1
Carbón de bajo rango	1
Ácidos húmicos	1
Carbón de bajo rango	1
ácidos húmicos y fúlvicos	1
Carbón	1
Biotransformación	1
Carbón	1
Enmienda	2
Carbón	1
Carbón de bajo rango	1
Total general	6

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

Tabla 30. relación de estudios asociados a la producción de sustancias húmicas a partir de carbón.

Nombre del producto	Nombre de la tipología del producto	Nombre del grupo de investigación
1. Production of Humic Substances through Coal - solubilizing Bacteria.	Artículo de investigación	Microbiología agrícola y ambiental
2. Informe final del Proyecto "Evaluación de Carbones Meteorizados Generados en el Cerrejón para su Aprovechamiento como Materia Prima en la Producción de Enmiendas Orgánicas".	Informe técnico final	Microbiología agrícola y ambiental
3. Uso de carbones meteorizados en el mejoramiento de las propiedades del suelo mediante transformación microbiana.	Tesis de doctorado	Fisiología del estrés y Biodiversidad en plantas y microorganismos
4. Aislamientos de hongos biotransformadores de Lignito, en Microhábitats influenciados por la actividad carbonífera, Cerrejón, Guajira-Colombia.	Artículos	Microbiología agrícola y ambiental
5. Aumento del contenido de ácidos húmicos en un carbón de bajo rango a través de oxidación con aire y con peróxido de hidrógeno y ácido nítrico.	Artículo de investigación	Carboquímica
6. Capítulo 7 efecto de un carbón de bajo rango y bacterias promotoras de crecimiento vegetal sobre el crecimiento temprano de dos gramíneas forrajeras de interés en el departamento del Cesar.	Capítulo de libro	Microbiología agrícola y ambiental

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

► Nanomateriales

En el caso del grafeno y de los demás nanomateriales, la producción científica consultada se enfocó en explorar sus posibles aplicaciones y en el desarrollo de tecnologías para su producción. Los nanomateriales identificados se encuentran los nanotubos, los óxidos de grafeno y las nanocintas de grafeno.

En cuanto a fibras de carbono y elementos de tierras raras, en la producción científica seleccionada no se identificaron documentos que estudien la obtención de estos materiales a partir de carbón.

Acorde con lo anterior, el panorama de producción científica en Colombia relacionado con los usos no convencionales del carbón, muestra un énfasis en los procesos de gasificación, producción de carbón activado y la obtención de sustancias húmicas.

Tabla 31. Producción científica asociada a nanomateriales.

Tema	Cuenta
Usos y estudios del grafeno	30
Usos y estudios de óxidos de grafeno	2
Síntesis de nanocintas de grafeno	2
Producción de grafeno	2
Nanofibras de carbono	1
Marco legal nanomateriales	1
Total general	38

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

Tabla 32. Producción científica asociada a estudios y aplicaciones de nanomateriales.

Tema	Cuenta
Estudios y aplicaciones de nanomateriales	12

Fuente: elaboración propia a partir de la base de datos seleccionada de Producción_Grupos_Investigación (MINCIENCIAS, 2025).

➤ Subproductos de coquización

A nivel nacional, es importante destacar las iniciativas de producción de subproductos derivados del proceso de coquización que desarrollan algunas empresas, generando valor a materiales que, de otro modo se convertirían en residuos. Algunos productos son:

Tabla 33. Uso de los subproductos de la coquización.

Organización	Subproducto	Usos
Coquecol S.A.S. C.I.	Cenizas de coque	Procesos de combustión en industrias cementeras y termoeléctricas.
Carbocoque S.A.	Finos de coque	Briquetas.
Acerías Paz del Río S.A.	Sulfato de amonio generado por depuración del gas de coquización.	Fertilizante.
	Naftalina amarilla	Utilizado en la producción de aditivos para la construcción, desinfectantes y en procesos de curtido de pieles.
	Brea de alquitrán	Se utiliza como aglomerante en pavimentos, aislamiento, producción de electrodos para hornos de arco eléctrico.
	Alquitrán	Es utilizado en mezclas para pavimentos y como materia prima para la producción de brea, naftaleno y aceite de creosota.

Fuente: elaboración propia a partir de (Grupo Coquecol, 2025), (Carbocoque, 2025), (Paz del Río, 2025).

➤ Iniciativas de usos no convencionales del carbón a nivel global.

En el panorama global existen distintos niveles de madurez en la transformación del carbón en productos no convencionales, de tal forma que es posible agruparlos en dos categorías:

- Empresas con operaciones ya consolidadas a escala comercial.
- Empresas que avanzan en iniciativas que aún se encuentran en fase piloto de desarrollo.

El grado de avance tecnológico, junto con las condiciones habilitantes en cada país para impulsar las cadenas productivas relacionadas, generan diferencias sustanciales en el desarrollo de cada una de las iniciativas. Entre los factores más relevantes se destacan:

- La disponibilidad de carbón con las especificaciones adecuadas para el uso previsto.
- Las ventajas competitivas del carbón frente a otras materias primas comúnmente empleadas.
- La capacidad de cumplir las especificaciones técnicas requeridas para cada aplicación.
- Los niveles de eficiencia alcanzados en los procesos de transformación.

De esta forma, los usos no convencionales que se han identificado con operaciones comerciales consolidadas se encuentran concentrados principalmente en países como China y Estados Unidos, los cuales cuentan con alto nivel de investigación y desarrollo industrial. De las cuales se destacan la producción de hidrógeno y gas natural mediante la gasificación del carbón, la producción de carbón activado, la extracción de sustancias húmicas y en menor grado la producción de carbón activado.

En cuanto a la gasificación del carbón, su expansión enfrenta desafíos relacionados con las emisiones generadas, así como con los costos de inversión y operación, factores que orientan la investigación para contar con soluciones económicamente viables que permitan el desarrollo de procesos más eficientes y sostenibles.

Se destaca que el proceso para la producción de carbón activado cuenta con madurez comercial, con tecnologías operativas y ampliamente probadas. No obstante, en la mayoría de las empresas identificadas, el carbón constituye una de las alternativas de materia prima para la producción de carbón activado. Así mismo, la extracción de sustancias húmicas a partir de leonardita, lignito y carbón humificado también sobresale como una de las industrias que ha alcanzado un alto nivel de madurez tecnológica.

En relación con la producción de fibras de carbono a partir de breas de alquitrán, se ha identificado que la utilización de aceite decantado como disolvente para obtener brea, podría tener ventajas en términos ambientales y de costos de producción respecto a la ruta tradicional a partir de resina polimérica sintética - PAN. En términos de costos, las estimaciones sitúan la producción mediante esta ruta entre 9,5 y 9,9 USD/kg, frente a los 20 - 30 USD/kg asociados a las fibras de carbono derivadas del PAN (Nagapurkar & Lara-Curzio, 2023). Los resultados disponibles confirman que la producción de fibras de carbono a partir de breas de alquitrán de carbón es técnicamente viable y presenta potencial para competir considerando aspectos ambientales y de costos, en comparación con la materia prima más utilizada actualmente, la cual corresponde al poliacrilonitrilo.

Tabla 34. Empresas con usos no convencionales del carbón con operaciones consolidadas.

Uso	País	Producto	Empresa	Producción
Carbón a gas	China	Producción de hidrógeno gris como subproducto del proceso de coquización. Fuente: (IESR, 2024).	Shanxi Meijin Energy	20.000 T/año H ₂ (99.99%) Fuente especificada no válida. (China Daily, 2025)
	Estados Unidos	Producción de Gas natural sintético (SGN, por sus siglas en inglés).	Dakota Gasification Company	Diariamente se procesan 18.000 t de lignito. La planta tiene capacidad de producir 170 millones de pies cúbicos de gas natural por día. (Dakota Gasification Company, s.f.)
Carbón activado	Estados Unidos	Producción de carbón activado granular (GAC) y en polvo (PAC) a partir de carbones bituminosos. (Calgon Carbon, 2025)	Calgon Carbon Corporation	Como referencia, en 2023 se incrementó la capacidad de producción hasta llegar a 100.000 toneladas de carbón activado por año. Esta capacidad está asociada únicamente a las dos plantas ubicadas en EE. UU. (Chemviron, 2023).
	Países Bajos	Producción de carbón activado a partir de lignitos, carbones bituminosos, sub-bituminosos, semi antracitas. (Norit Activated Carbon, 2025).	NORIT Activated Carbon	Como referencia en una de las plantas ubicada en Klazienaveen – Países Bajos la capacidad de producción en 2020 era de 15.000 toneladas de carbón activa año, sin

Uso	País	Producto	Empresa	Producción
				especificar a partir de que materia prima. (Chikri & Wetzels , 2021).
	China	Producción Carbón Activado en Polvo (PAC) y Carbón Activado Granular (GAC) a base de carbones bituminosos y antracitas.	Qizhong Chemical Co., Ltd.	La capacidad de producción anunciada en la página web, independiente de la materia prima utilizada, es de 35.000 T/ Año. (Qizhong Chemical, s.f.)
	Estados Unidos	Ácidos húmicos, fúlvicos y extractos orgánicos derivados de leonardita y otras fuentes orgánicas para usos agrícolas, mejoramiento de suelos y bioestimulación de cultivos (HUMA, s.f.).	Huma Inc	Sin información de fuente confiable.
Sustancias Húmicas	Alemania	Procesamiento industrial de leonardita para la producción de sustancias húmicas (ácidos húmicos, fúlvicos y humatos de potasio) mediante extracción alcalina optimizada (Humintech, s.f.).	Humintech gmbh	Sin información de fuente confiable.
	España	Producción de bioestimulantes húmicos y fúlvicos derivados de leonardita para agricultura, incluyendo formulaciones líquidas y granuladas registradas como insumos de uso agrícola (Daymsa, s.f.).	Daymsa	Sin información de fuente confiable.
Sustancias Húmicas	Canadá	Extracción y procesamiento de leonardita canadiense de alta pureza para producir humatos secos y líquidos destinados a agricultura y remediación ambiental. (Black Earth, s.f.).	Black Earth Humic	Sin información de fuente confiable.
	China	Producción a escala industrial de ácidos húmicos, fúlvicos y humatos potásicos provenientes de lignitos y leonarditas chinas mediante procesos de extracción alcalina y purificación. (Shanxi Jinfeng Biotechnology Co., s.f.)	Shanxi Jinfeng Biotechnology Co.	Se menciona una capacidad de producción de 100.000 t/año de gránulos de fertilizantes orgánicos 50.000 t/año de polvo, aunque sin especificar el producto y la materia prima.
Fibras de carbono	Japón	Producción de fibras de carbono de alto rendimiento (rigidez y conductividad térmica alta) a	Mitsubishi Chemical Group	Coquización de 9.300 Kt/año de carbón, obtención de 300 Kt/año de Alquitrán/brea, para producción de 1.300 t/año de

Uso	País	Producto	Empresa	Producción
		partir de brea del carbón (subproducto de la coquización). (Mitsubishi Chemical Group, 2025).		fibras de carbono (Mitsubishi Chemical Group, 2008).

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas en la tabla.

De otra parte, los usos no convencionales que incluyen la extracción de elementos de tierras raras y la producción de grafeno relacionados con empresas que avanza en fase piloto de proyectos demostrativos se listan en la Tabla 8. A nivel internacional se observa un creciente interés por desarrollar tecnologías con especial atención en los aspectos ambientales, que permitan la obtención de elementos con alto valor, a partir de residuos del carbón, con estudios que van desde la validación experimental hasta la demostración en planta piloto. Las principales iniciativas identificadas se relacionan en la siguiente tabla.

Tabla 35. Iniciativas de usos no convencionales del carbón en fase piloto.

Uso	País	Producto	Empresa - organización	Producción
Elementos de Tierras raras	Estados Unidos	Producción y/o extracción de minerales críticos Escandio (Sc), Galio (Ga) y Germanio (Ge) a partir de arcillas y shales carbonosos que respaldan mantos de carbón. (Ramaco Resources - Fluor Corporation, 2025).	Ramaco Resources Inc. & Fluor Corporation	Producción proyectada mayor a 1.000 t/año (IEA, 2024)
Elementos de Tierras raras	Estados Unidos	Desarrolla tecnologías, su patente de extracción de REE en cenizas del carbón utilizando ácidos inorgánicos suaves alcanza niveles de extracción que oscilan entre el 80% y el 100%.	NETL (National Energy Technology Laboratory)	A partir de las cenizas generadas de la combustión del carbón en USA, se estima una producción potencial de 8.910 toneladas métricas anuales de óxidos de tierras raras. (NETL, 2025)
Grafeno	Estados Unidos	La empresa ha demostrado una novedosa tecnología denominada Flash Joule Heating (FJH) para la producción de grafeno de alta calidad, a partir de materiales a base de carbono incluidos desechos (Universal Matter).	Universal Matter	Planta con capacidad de producción esperada de 1 t/día de grafeno (Universal Matter, 2023) .

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas en la tabla.

Anexo 3. Niveles de Madurez Tecnológico

Tabla 36. TRL con su correspondiente descripción

TRL	Descripción
1: principios básicos observados y reportados.	Asociado a la investigación científica básica y se inicia la transición a la investigación aplicada. Algunas de las herramientas descriptivas están asociadas a formulaciones matemáticas o algoritmos.
2: Concepto de tecnología y/o aplicación formulada – Investigación aplicada.	La teoría y principios científicos se orientan en áreas específicas de aplicación para definir el concepto. Esta fase incluye la formulación del concepto de la tecnología, su aplicación y su puesta en práctica. Se hacen los primeros avances en el plan de desarrollo. Incluye estudios y experimentos de menor alcance que proporcionan información para las pruebas de conceptos de la tecnología que se esperan desarrollar posteriormente. Puede incluir la formulación de aplicaciones de las tecnologías y el uso de herramientas para la simulación o análisis. Sin embargo, todavía no se cuenta con pruebas de validación.
3: Prueba de concepto de las características analíticas y experimentales.	Contempla la realización de actividades de investigación y desarrollo (I+D), entre las que se encuentran: pruebas analíticas, pruebas de concepto o a escala en laboratorio, que buscan demostrar la factibilidad técnica de los conceptos tecnológicos. Incluye la medición de parámetros y comparación con predicciones analíticas de subsistemas críticos a través de pruebas de laboratorio. En esta etapa los conceptos y los procesos se demuestran a escala de laboratorio. Esta fase implica la validación de los componentes de una tecnología específica, sin que implique la integración de todos los componentes en un sistema completo.
4: Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio.	En esta fase se busca determinar si los componentes individuales cuentan con la capacidad para operar de forma integrada como un sistema. Incluye la construcción de prototipos a nivel de laboratorio y en entorno controlado. Esta etapa proporciona datos para determinar el potencial de ampliación, dado que existe un ciclo de vida validado preliminarmente y modelos de evaluación económica preliminares.
5: Validación de los sistemas, subsistemas o componentes en un entorno relevante.	Las unidades básicas de las tecnologías se integran de forma que la arquitectura será similar a lo que operará en una situación real, esto implica que se pueden realizar simulaciones en un entorno real que puede generar datos adicionales para mejorar los modelos técnicos y económicos del diseño en TRL 3, considerando además aspectos regulatorios, ambientales y de seguridad. El sistema aún opera a nivel de laboratorio.
6: Validación de sistema, subsistema, modelo o prototipo en condiciones cercanas a las reales.	Se cuenta con prototipos piloto que pueden cumplir los requerimientos de diseño dentro de un sistema, esto significa que ya han superado pruebas de factibilidad en un ambiente de operación real. Puede haber ampliación de los para demostrar su potencial industrial en ambientes reales. En esta fase se puede disponer de documentación básica, sin embargo, al contar con un prototipo probado se puede completar y precisar la documentación, al igual que la evaluación de ciclo de vida y económica. El prototipo debe ser capaz de desarrollar todas las funciones exigidas en los requerimientos definidos para el sistema.
7: Demostración de sistema o prototipo validados en el entorno operativo real.	En esta fase el sistema está cerca o puede operar a escala precomercial. Se pueden identificar aspectos de fabricación, evaluación del ciclo de vida y evaluación económica de las tecnologías, ya que se cuenta con la mayor parte de funciones disponibles para pruebas. La documentación debe dar cuenta de la demostración de que la tecnología funciona y puede operar a la escala previamente indicada. Finalmente, incluye la primera corrida piloto y pruebas finales reales.
8: Sistema completo y calificado a través de pruebas	Sistemas integrados, tecnologías probadas y bajo condiciones supuestas, que demuestran el potencial a nivel comercial alcanzado en muchos casos, el final del desarrollo del sistema. Los aspectos operativos y de fabricación han sido resueltos, igualmente se cuenta con manuales

TRL	Descripción
y demostraciones en ambientes operacionales.	de operación y de mantenimiento. Se ha demostrado su potencial a nivel comercial. Puede significar el final del desarrollo del sistema.
9: Sistema probado y operando con éxito en un entorno real.	Tecnología/sistema probado y disponible para su producción en serie o comercialización. Puede operar en diferentes condiciones.

Fuente: Editado a partir del anexo 1 Especificaciones técnicas de la convocatoria para apoyar proyectos de I+D+i en recobro mejorado de hidrocarburos y al fortalecimiento de capacidades para esta temática en instituciones de educación superior – 2025 del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Anexo 4. Metodología de priorización para seleccionar los productos asociados a los usos no convencionales del carbón.

Tabla 37. Estructura de los criterios para la priorización de los productos asociados a usos no convencionales del carbón

	33,3%		33,3%	33,3%	
	30%	70%			
	Categoría 1. Madurez tecnológica (33.33%)		Categoría 2. Comercio exterior colombiano (33.33%)	Categoría 3. Impacto ambiental (33.33%)	
Producto	Nivel de madurez tecnológica - TRL Mundial	Nivel de madurez tecnológica - TRL Colombia	Balanza comercial	Huella ambiental Emisiones de CO ₂ Eq	TOTAL

Producto: Se relacionan los productos que se han identificado como usos no convencionales del carbón.

Categoría 1. Nivel de Madurez Tecnológica: expresado con valores que pueden estar en el rango 1 a 9. Se utilizan diferentes fuentes para establecer el avance tecnológico del carbón para el uso evaluado, lo anterior en el contexto del ciclo I+D+i. En este sentido se admiten fuentes de información no relacionados con artículos científicos, ya que pueden existir operaciones comerciales. Esta categoría se divide en TRL a nivel mundial y en Colombia.

Categoría 2. Comercio exterior colombiano. Para calificar este criterio se tienen en cuenta las cantidades de importaciones y exportaciones del producto listado en la primera columna de la tabla. Los valores que puede adoptar esta columna corresponden a:

3: no existen registros de importaciones ni exportaciones.

6: con balanza negativa. En este caso podría existir la posibilidad sustituir importaciones.

9: con balanza positiva. Se califica mayor debido a que podría existir un escenario de una industria lo suficientemente madura que genera excedentes para la exportación.

A. **Categoría 3. Impacto ambiental:** expresado en emisiones de CO₂e conforme a las fuentes referenciadas. Teniendo en cuenta los valores extremos de referencia de emisiones de CO₂e para los usos no convencionales del carbón, ver anexo 5 Categoría: Niveles de Madurez Tecnológico, se establecieron 9 rangos. Los valores más bajos reciben una puntuación más alta y viceversa. Ver tabla.

Tabla 38. Rangos de CO₂e para la asignación de valores al criterio de impacto ambiental

Rango CO ₂ e	Calificación
0-5,78	9
5,78-11,56	8
11,56-17,33	7
17,33-23,11	6
23,11-28,89	5
28,89-34,67	4
34,67-40,44	3
40,44-46,22	2
46,22-52 o más	1

Fuente: elaboración propia

Las ponderaciones para obtener el valor total se distribuyeron de forma uniforme entre las tres categorías, esto es 33,33%. La categoría de Nivel de Madurez Tecnológica se dividió entre las referencia mundial y Colombia, con ponderaciones del 30% y 70 % respectivamente, lo anterior para dar más importancia al avance en la madurez de la cadena productiva en Colombia.

Anexo 5. Información de soporte para la calificación de los criterios de priorización de los usos no convencionales del carbón.

B. Categoría: Niveles de Madurez Tecnológico

➤ Hidrógeno

Tabla 39. Soporte calificación de TRL para la producción de hidrógeno a partir de carbón - mundial

Empresa / Proyecto / Estudio	País	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
Sector industrial en China (producción masiva de H ₂ a partir de carbón)	China	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. China produce a gran escala hidrógeno obtenido por rutas relacionadas con carbón	(IEA, 2022)
Shanxi Meijin Energy (hidrógeno derivado de coque/carbón en Shanxi)	China	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Compañía regional que produce H ₂ (clasificado como hidrógeno gris) a partir de procesos de coque y carbón.	(IESR, 2024)
Dakota Gasification Company — Great Plains Synfuels Plant – gas natural sintético	Estados Unidos	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Planta comercial operativa desde 1984, produce gas natural sintético (SNG, por sus siglas en inglés) a partir de lignito.	(NETL, s.f.) (Dakota Gasification Company, s.f.)
Synfuels China / Shenhua Ningxia CTL (Coal-to-Liquids & syngas / productos químicos)	China	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Planta CTL que utiliza múltiples gasificadores para producir syngas con tecnologías de <i>Fischer-Tropsch</i> .	(Syngaschem BV, 2016) (Offshore Technology, 2008)
Shenhua Baotou Coal-to-Olefins Project	China	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Planta de gasificación en operación que produce syngas para olefinas / polímeros.	(Masto, Darling, & Coleman, GE news, 2010)
Sinopec Qilu Plant	China	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Planta comercial que opera gasificadores para producir syngas que se usa para fabricar metanol y otros químicos.	(Masto & Xiao, GE news, 2013)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas

Tabla 40. Soporte calificación de TRL para la producción de hidrógeno a partir de carbón - Colombia.

Empresa / Proyecto / Estudio	Descripción	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
Patente. Universidad Pontificia Bolivariana.	Reactor gasificador / combustor que comprende medios de combustión de carbón en lecho fluidizado para suministrar aire caliente necesario en el proceso de secado	7	Demostración de sistema o prototipo validados en el entorno operativo real. Sistema completo de cogasificación carbón-biomasa en lecho fluidizado, diseñado para integrarse a procesos industriales cerámicos, demostrando su funcionamiento en entorno real y aportando beneficios productivos y ambientales, lo que corresponde a una demostración tecnológica a escala industrial precomercial.	(Arenas Castiblanco, y otros, 2005)

Empresa / Proyecto / Estudio	Descripción	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
Gasificación de bagazo de caña y carbón en planta piloto.	Pruebas de gasificación de carbón y cogasificación de carbón-bagazo de caña en planta piloto que opera en régimen de lecho fluidizado. Gas de síntesis.	6	Validación de sistema, subsistema, modelo o prototipo en condiciones cercanas a las reales. Demostración de un sistema o prototipo a escala piloto o relevante, con validación de desempeño en condiciones controladas	(Macías Naranjo, Chejne Janna, Montoya Arbeláez, & Blanco Leal, 2014)
Estudio y simulación de un gasificador con captura de CO ₂ para la producción de hidrógeno azul partiendo de carbón colombiano	Diseño y la simulación de un gasificador de carbón con captura de dióxido de carbono para la obtención de hidrógeno.	3	Prueba de concepto de las características analíticas y experimentales. Prueba de concepto validada mediante simulación avanzada o experimento de laboratorio inicial.	(Castiblanco-Urrego & Milquez-Sanabria, 2021)
Efecto del rango de carbones colombianos y su tecnología de alimentación en la producción de gas natural sustituto, mediante gasificación en lecho arrastrado	Estudio del efecto del rango del carbón usado (desde subbituminoso hasta semiantracita) y de la tecnología de alimentación (seca o húmeda) sobre el proceso de producción de gas natural sustituto (GNS)	3	Prueba de concepto de las características analíticas y experimentales. El estudio desarrolla un modelo termoquímico completo en Aspen Plus para evaluar la viabilidad del proceso de gasificación de carbón hacia gas natural sustituto (GNS), utilizando datos de carbones reales, pero sin validación experimental. La tecnología se encuentra demostrada en entorno virtual y con análisis de sensibilidad, pero aún no validada físicamente.	(Pérez-Bayer, Barrera-Zapata, & Salazar-Jiménez, 2016)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas.

En la tabla 40 “Matriz de priorización” se toma el valor de 3 debido a que los TRL 7 y 6 corresponden a cogasificación.

➤ Carbón activado

Tabla 41. Soporte calificación de TRL para la producción de carbón activado a partir de carbón - Mundial.

Empresa / Proyecto / Estudio	País	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
Calgon Carbon Corporation	Estados Unidos	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Producción comercial - Operaciones globales. Carbón bituminoso (uso histórico y actual de carbones bituminosos como materia prima). Carbón activado granular (GAC, por sus siglas en inglés), carbón activado en polvo (PAC, por sus siglas en inglés)	(Calgon Carbon, 2025)
NORIT Activated Carbon	Países Bajos	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Producción comercial - Planta y red global. Lignito, sub-bituminoso, bituminoso, semi-antracita.	(Norit Activated Carbon, 2025)
Qizhong Chemical Co., Ltd.	China	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Producción comercial. Carbón bituminoso / antracita.	(Qizhong Chemical, s.f.)
Suneeta Carbons	India	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Producción comercial.	(Suneeta Carbons, 2026)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas.

Tabla 42. Soporte calificación de TRL para la producción de carbón activado a partir de carbón - Colombia

Empresa / Proyecto / Estudio	Descripción	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
Antracitas de Cundinamarca Ltda.	Producción de carbón activado de granulometrías 1/4", 1/8", 8-12, en polvo (PAC).	9	Producción comercial de carbón activado	(Antracitas de Cundinamarca, s.f.)
Producción de carbón activado a partir de carbón subbituminoso en reactores de lecho fluidizado por proceso autotérmico	Producción de carbón activado a partir de carbón mineral subbituminoso en un reactor de lecho fluidizado por proceso autotérmico.	5	Validación de los sistemas, subsistemas o componentes en un entorno relevante.	(Zapata Benabith, y otros, 2005)
Obtención de un material carbonáceo activado de antracita para posibles aplicaciones en hidrometalurgia	Obtención de carbón activado a partir de antracita con posibilidad de usarlo en hidrometalurgia.	5	Validación de los sistemas, subsistemas o componentes en un entorno relevante.	(Estupiñán, Vásquez Quintero, & Pulido, 2006)
Producción de Carbón Activado a partir de Precusores Carbonosos del Departamento del Cesar, Colombia	Montaje de una unidad experimental de activación para la obtención de carbones activados a partir de carbón bituminoso, endocarpio de coco y endocarpio de palma.	5	Validación de los sistemas, subsistemas o componentes en un entorno relevante.	(Bastidas, Buelvas, Márquez, & Rodríguez, 2010)
Producción de carbón activado mediante métodos físicos a partir de carbón de El Cerrejón y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales provenientes de tintorerías	Activación física de carbones provenientes de El Cerrejón para evaluar diferentes condiciones de activación, y de esta forma, obtener carbones activados con varias propiedades de interés.	5	Validación de los sistemas, subsistemas o componentes en un entorno relevante. Validación de tecnología o	(Rincón, y otros, 2015)
Activación de carbón mineral mediante proceso físico en horno tubular horizontal y atmósfera inerte	Determinación de las condiciones favorables para lograr la activación de las partículas de carbón, mediante un proceso térmico y vapor de agua a nivel de laboratorio.	4	Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio. Se demuestra el principio técnico y se obtienen datos medibles de desempeño.	(Uribe, López, & González, 2013)
Carbones colombianos como materia prima para la producción de carbón activado empleado en la adsorción de oro de soluciones cianuradas	Producción y caracterización de carbón activado a partir de carbón mineral colombiano explotado en siete regiones carboníferas de Colombia.	4	Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio Validación de componentes o materiales en entorno de laboratorio controlado.	(Martínez Mendoza, 2018)
<i>Production and Characterization of Activated Carbon from Coal for Gold Adsorption in Cyanide Solutions</i>	Investigación experimental aplicada al desarrollo de carbones activados a partir de carbón colombiano para adsorción de oro.	4	Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio Validación tecnológica en laboratorio	(Martínez-Mendoza, y otros, 2020)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas.

Se tomó el mayor valor de los TRL relacionados.

➤ Elementos de tierras raras

Tabla 43. Soporte calificación de TRL para la producción de tierras raras a partir de carbón - Mundial.

Empresa / Proyecto / Estudio	País	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
Patente: Proceso de lixiviación por etapas de elementos de tierras raras a partir de materiales de ceniza utilizando ácidos inorgánicos suaves en condiciones ambientales.	Estados Unidos	6	Validación de sistema, subsistema, modelo o prototipo en condiciones cercanas a las reales. Demostración de sistema o proceso en entorno relevante o planta piloto. NETL desarrolló un proceso para extraer, en grandes cantidades, elementos de tierras raras (REE) y minerales críticos (CM) a partir de las cenizas volantes del carbón.	(NETL, 2025)
Ramaco Resources Inc. Brook Mine, Sheridan, Wyoming (EE. UU.).	Estados Unidos	4	Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio.	(Ramaco Resources - Fluor Corporation, 2025)
Process development for the extraction of rare earth elements from an acid mine drainage treatment sludge	Estados Unidos	4	Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio.	(Cicek, Agudelo Mira, & Huang, 2023)
Rare earth elements recovery and mechanisms from coal fly ash by column leaching using citric acid	China	4	Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio.	(Zhang, y otros, 2025)
Recovery of rare earth elements from low-grade coal fly ash using a recyclable protein biosorbent	Corea del Sur	4	Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio.	(Hussain, Dwivedi, & Kwon, 2024)
Extractability and mineralogical evaluation of rare earth elements from Waterberg Coalfield run-of-mine and discard coal	Sudáfrica	4	Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio.	(Modiga, Eterigho-Ikelegb, & Bada, 2024)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas

Se tomó el mayor valor de los TRL relacionados.

Tabla 44. Soporte calificación de TRL para la producción de tierras raras a partir de carbón - Colombia.

Empresa / Proyecto / Estudio	Descripción	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
Extractability and mineralogical evaluation of rare earth elements from Waterberg Coalfield run-of-mine and discard coal	Entendimiento de la distribución (fraccionamiento) y enriquecimiento de REE desde carbón colombiano hasta las diferentes fracciones de cenizas	3	Prueba de concepto de las características analíticas y experimentales.	(Santos , Guedes, French, Futuro , & Valentim, 2022)
Proyecto de Investigación para el Aprovechamiento de carbones y subproductos (Fase tierras raras) Noticias	Muestreo y caracterización de campo dentro de un proyecto de investigación aplicada del Servicio Geológico Colombiano	3	Prueba experimental del concepto o validación analítica en laboratorio/entorno controlado	(SGC, 2022)
Tierras raras en las cuencas carboníferas de Colombia	Revisión de los puntos relevantes respecto a los fundamentos geológicos, químicos, geoquímicos y analíticos en lo concerniente a los elementos de tierras raras en carbón en el mundo.	2	Concepto de tecnología y/o aplicación formulada – Investigación aplicada	(Patiño Mejía, Robinson Eduardo ; Guatame Aponte, Clara Liliana ; Monroy Vásquez, Willian Orlando ;, 2020)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas

Se tomó el mayor valor de los TRL relacionados.

➤ Fibras de carbono

Tabla 45. Soporte calificación de TRL para la producción de fibras de carbono a partir de carbón - Mundial.

Empresa / Proyecto / Estudio	País	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
Mitsubishi Chemical Group	Japón	9	Producción de fibras de carbono de alto rendimiento (rigidez y conductividad térmica alta) a partir de brea del carbón (subproducto de la coquización). Coquización de 9.300 Kt/año de carbón, obtención de 300 Kt/año de Alquitrán/brea, para producción de 1.300 t/año de fibras de carbono.	(Mitsubishi Chemical Group, 2025) (Mitsubishi Chemical Group, 2008).
<i>Sustainable Coal Tar Pitch Carbon Fiber Manufacturing</i>	Estados Unidos	5	Validación de los sistemas, subsistemas o componentes en un entorno relevante. Evaluación a escala conceptual/piloto (no industrial), basada en simulaciones con software HSC Chemistry y datos experimentales iniciales.	(Das & Nagapurkar, 2021)
Coal to Carbon Fiber (C2CF) Continuous Processing for High Value Composites - final scientific / technical report	Estados Unidos	5	Validación de los sistemas, subsistemas o componentes en un entorno relevante. Se hicieron pruebas de hilado y fabricación de composites funcionales.	(DOE, 2025)
<i>Preparation and characterization of high performance coal tar pitch-based carbon fiber</i>	China	4	Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio. Proceso experimental avanzado para la producción de fibras de carbono a partir de brea de alquitrán de carbón, y presenta resultados de desempeño medidos en laboratorio (resistencia, módulo elástico y conductividad térmica).	(Zhang, y otros, 2023)
<i>Molecular Structure Control in Mesophase Pitch via Co-carbonization of Coal Tar Pitch and Petroleum Pitch for Production of Carbon Fibers with both High Mechanical Properties and Thermal Conductivity</i>	China	4	Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio. Se fabricaron fibras funcionales y se midieron propiedades físicas.	(Guo, y otros, 2020)
<i>Pitch-based carbon fibers: preparation and applications</i>	República de Kazajistán	3-4	Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio. Principios científicos validados, posible demostración inicial de factibilidad. Componentes o procesos validados en entorno controlado.	(Kaidar, Smagulova, Imash, Zhaparkul, & Mansurov, 2021)
<i>Preparation of pitch-based carbon fiber from medium coal tar pitch refined by wash oil</i>	China	3 - 4	Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio. Se estudia la obtención de CNF desde breas isotrópicas y mesofásicas, y se analizan limitaciones del proceso. Se mencionan ensayos sobre estructura, pureza y propiedades de los CNF, pero sin validación a escala piloto.	(Zuo, y otros, 2025)
<i>Obtaining carbon fibers based On coal tar by electrospinning method</i>	República de Kazajistán	3	Prueba de concepto de las características analíticas y experimentales. Se preparó el precursor, se procesó y se obtuvieron fibras de carbono con caracterización estructural.	(Imangazy & Kaidar, 2021)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas

Se tomó el mayor valor de los TRL relacionados.

Tabla 46. Soporte calificación de TRL para la producción de fibras de carbono a partir de carbón - Colombia.

Empresa / Proyecto / Estudio	Descripción	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
Obtención de Fibras y Gránulos de Carbono para la Inmovilización de Enzimas	Se prepararon fibras y gránulos de carbono a partir de brea de carbón. Lo anterior, previa filtración y estabilización.	4	Validación de componentes o procesos en entorno de laboratorio. Prepararon de fibras y gránulos de carbono a partir de brea de carbón.	(Malagón M, Yolanda Rico, de López, & Caicedo M., 2001)
Estabilización de fibras de brea de carbón	Se prepararon diferentes tipos de breas a partir de brea del Paz del Río.	4	Validación de componentes o procesos en laboratorio. Se elaboraron fibras, se caracterizaron en términos de composición y se evaluó el desempeño en condiciones de laboratorio.	(de López, Florián, & Garzón, 1982)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas

➤ Sustancias húmicas

Tabla 47. Soporte calificación de TRL para la producción de sustancias húmicas a partir de carbón - Mundial.

Empresa / Proyecto / Estudio	País	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
HUMINTECH GmbH	Alemania	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Producción comercial a partir de Leonardita - extracción industrial.	(Humintech, s.f.)
Black Earth (Black Earth Humic / Humalite)	Canadá	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Producción comercial a partir de Leonardita / depósitos de humates (Canadá) — materia prima mineral.	(Ozdoba, Blyth, Engler, & Schnitzer, 2025)
Daymsa (Daymsa Leonardite)	España	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Producción comercial. Leonardita — minería y procesamiento de depósitos regionales.	(Daymsa, s.f.)
Huma / Mesa Verde Humates (Huma, Inc.)	Estados Unidos	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Producción comercial. Leonardita / humates de Nuevo México (depósitos locales)	(HUMA, s.f.)
Shanxi Jinfeng Biotechnology Co.	China	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. Producción comercial. Leonardita / lignito / carbón humificado (depósitos de Leonardita basados en carbón)	(Shanxi Jinfeng Biotechnology Co., s.f.)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas

Tabla 48. Soporte calificación de TRL para la producción de sustancias húmicas a partir de carbón - Colombia.

Empresa / Proyecto / Estudio	Descripción	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
Industrias Vasar S.A.S	Producción y comercialización de leonardita (sólida y líquida) extracción de ácidos húmicos y fúlvicos para uso agrícola (fertilizantes orgánicos).	9	Producción comercial de ácidos húmicos y fúlvicos	(Industrias Vasar S.A.S., s.f.)
Evaluación de un Bioacondicionador Húmico y Ácidos Húmicos como Bioestimulantes de Brachiaria Decumbens en un Tecnosol Post-Minería	Evaluación de un bioacondicionador húmico y ácidos húmicos extraídos de CBR como bioestimulantes del desarrollo de plantas de Brachiaria decumbens	6	Validación de sistema, subsistema, modelo o prototipo en condiciones cercanas a las reales. Tecnología demostrada en entorno operativo (mina / tecnosol) con evidencia de eficacia.	(Aparicio Sánchez & Valero Valero)
<i>Effect of a low rank coal inoculated with coal solubilizing bacteria for the rehabilitation of a saline-sodic soil in field conditions</i>	Trabajo posterior al estudio en invernadero de (Cubillos-Hinojosa, Valero, & Melgarejo, 2015) y corresponde a la fase de validación en condiciones de campo.	6	Validación de sistema, subsistema, modelo o prototipo en condiciones cercanas a las reales. Tecnología demostrada en entorno relevante (campo real agrícola), lista para fase piloto y desarrollo precomercial. Validación del proceso en condiciones reales de campo con materiales locales, en suelos degradados representativos, y con mediciones químicas, biológicas y físicas que confirman la eficacia del tratamiento.	(Cubillos-Hinojosa, Valero, & Peralta Castilla, 2017)
Carbón de bajo rango como mejorador del suelo y estimulador del crecimiento temprano de maíz	Uso de carbón de bajo rango (lignito) como bioestimulante en el crecimiento de plantas de Zea mays, realizado en condiciones de invernadero.	4-5	Validación de los sistemas, subsistemas o componentes en un entorno relevante Validación de concepto en entorno controlado (invernadero). El estudio se realizó en condiciones controladas (invernadero), sin validación en campo ni producción a escala piloto.	(Valero Valero, 2024)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas.

Se tomó el mayor valor de los TRL relacionados.

➤ Grafeno

Tabla 49. Soporte calificación de TRL para la producción de grafeno a partir de carbón - Mundial.

Empresa / Proyecto / Estudio	País	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
Ramaco Resources Inc.	Estados Unidos	9	Sistema probado y operando con éxito en un entorno real. La existencia de una patente concedida y transferida implica que la tecnología ha superado las etapas experimentales y de validación.	(Coal Age, 2023)

Empresa / Proyecto / Estudio	País	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
Universal Matter	Canadá / Estado Unidos	8	Sistema completo y calificado a través de pruebas y demostraciones en ambientes operacionales.	(Universal Matter, s.f.)
National Energy Technology Laboratory (NETL), DOE (proceso C2G)	Estados Unidos	8	Sistema completo y calificado a través de pruebas y demostraciones en ambientes operacionales. Carbon nanosheets / "graphene" producidos por proceso C2G (demostraciones de laboratorio y actividad piloto/licenciamiento).	(NETL, 2020)
Automated Laboratory Kilogram-Scale Graphene Production from Coal	Estados Unidos	6	Validación de sistema, subsistema, modelo o prototipo en condiciones cercanas a las reales. Se demuestra un sistema de calentamiento Joule instantáneo (FJH, Por Sus siglas en inglés) a escala de laboratorio que permite la síntesis de 1,1 kg de grafeno instantáneo a partir de coque metalúrgico (MC) a base de carbón en 1,5 h.	(Eddy, y otros, 2023)
Coal to Graphene (C2G) Process Ohio University	Estados Unidos	4-5	Validación de los sistemas, subsistemas o componentes en un entorno relevante. Tecnología validada en laboratorio, con demostración del proceso de obtención de grafeno a partir de carbón, pero sin evidencia pública de validación en entorno relevante o a escala piloto.	(Ohio University , s.f.)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas

Se tomó el mayor valor de los TRL relacionados.

Tabla 50. Soporte calificación de TRL para la producción de grafeno a partir de carbón - Colombia.

Empresa / Proyecto / Estudio	Descripción	TRL estimado	Características que respaldan TRL	Fuente
Exfoliación en fase líquida de carbón de alto rango para obtener óxido de grafeno	Factibilidad técnica demostrada de producir óxido de grafeno a partir de carbón colombiano semi-antracítico con rendimientos altos, usando un proceso reproducible y caracterizado	4-5	Validación de los sistemas, subsistemas o componentes en un entorno relevante. En el límite inferior de TRL 5, ya que el proceso presenta un protocolo reproducible y caracterización completa, lo que muestra un modelo experimental validado.	(Franco & Guerrero Fajardo, 2022)
Graphene oxide obtention via liquid phase exfoliation from high-rank coal: A comparison of mineral matter removal by alkaline bath	Obtención de óxido de grafeno a partir de carbón de alto rango mediante el método de exfoliación en fase líquida.	4	Validación de componentes/subsistemas en pruebas de laboratorio. La tecnología ha demostrado la producción de óxido de grafeno a partir de carbón colombiano en condiciones de laboratorio controladas, con rendimiento medido y parámetros definidos. No incluye validación en entorno relevante ni escalamiento piloto.	(Franco , Lozano-Pérez, Mendieta-Reyes, & Guerrero-Fajardo, 2023)

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas.

Se tomó el mayor valor de los TRL relacionados.

C. Categoría: comercio exterior.

Tabla 51. Balanza comercial de los productos asociados a usos no convencionales del carbón objeto de priorización.

Producto	Unidad	Importaciones	Exportaciones	Balanza comercial
Carbón activado 3802100000 – carbón activado.	Toneladas	2020: 795,06 2021: 778,26 2022: 887,98 2023: 946,06 2024: 932,43 Total = 4.339,79	2020: 589,22 2021: 1089,52 2022: 1070,45 2023: 706,23 2024: 111,5 Total = 3.566,92	Deficitaria
Sustancias húmicas 3824999900 - Las demás preparaciones aglutinantes para moldes o núcleos de fundición; productos químicos y preparaciones de la industria química o de las industrias conexas (incluidas las mezclas de productos naturales), no expresados ni comprendidos en otra parte.	Toneladas	2020: 54.047 2021: 65.630 2022: 62.923 2023: 53.437 2024: 69.480 Total = 305.517	2020: 18.306 2021: 23.579 2022: 27.187 2023: 26.885 2024: 17.037 Total = 112.994	Deficitaria
Hidrógeno 2804100000 – hidrógeno	Toneladas	2020: 12,17 2021: 11,41 2022: 142,99 2023: 153,87 2024: 0,27 Total = 320,71	2020: 3,91 2021: 0,002 2022: 0,03 2023: 0 2024: 0,11 Total = 4,052	Deficitaria
Grafeno No hay una subpartida colombiana para "grafeno" Partidas consultadas: 3801100000. Grafito artificial 3801200000. Grafito coloidal o semicolidoal 3801300000. Pastas carbonadas para electrodos y pastas similares, para el revestimiento interior de hornos. 3801900000. Los demás grafitos artificiales, coloidales o semicolidales; preparaciones a base de grafito o de otros carbonos, en pasta, bloques, plaquitas u otros semiproducidos.	Toneladas	2020: 3.620 2021: 5.270 2022: 4.450 2023: 5.220 2024: 5.160 Total: 23.720	2020: 60 2021: 40 2022: 20 2023: 0 2024: 30 Total: 150	Deficitaria
Fibras de carbono 6815100000 - Manufacturas de grafito o de otros carbonos para usos distintos de los eléctricos, 6815110000 - Fibras de carbono 6815120000 - Textiles de fibras de carbono 6815130000 - Las demás manufacturas de fibras de carbono 6815190000 - Las demás manufacturas de grafito o de otros carbonos para usos distintos de los eléctricos.	Toneladas	2020: 87 2021: 59 2022: 86 2023: 58 2024: 70 Total = 360	2020: 3 2021: 1 2022: 22 2023: 29 2024: 35 Total=90	Deficitaria
Elementos de tierras raras 2805300000 - Metales de las tierras raras, escandio e itrio, incluso mezclados o aleados entre sí 2846100000 - Compuestos de cerio 2846900000 - Los demás compuestos inorgánicos u orgánicos, de metales de las tierras raras, del itrio, del escandio o de las mezclas de estos metales.	Toneladas	2020: 9 2021: 16 2022: 2 2023: 7 2024: 6 Total = 40	2020: 4 2021: 6 2022: 2 2023: 0 2024: 0 Total = 12	Deficitaria

Fuente: Mapa Regional de Oportunidades - maro.com.co. y tableros e información estadística de comercio exterior - DIAN⁵. Noviembre de 2025.

D. Categoría: impacto ambiental

Tabla 52. Emisiones de CO₂e para los productos objeto de priorización - de la cuna a la puerta.

Producto	Estudio	kg CO ₂ e/kg de producto	Alcance	Fuente	Promedio en kg CO ₂ eq/kg de producto
Hidrógeno a partir de carbón (Con CCS).	<i>Carbon footprint of the hydrogen production process utilizing subbituminous coal and lignite gasification</i>	Tecnología: gasificación de flujo arrastrado Carbón sub-bituminoso. 4,1 (Shell) 5,2 (Texaco) Lignito 7,1 (Shell)	De la cuna a la puerta (Cradle-to-gate)	(Burmistrz, Chmielniak, Czepirski, & Gazda-Grzywacz, 2016)	<u>Carbón sub-bituminoso:</u> <u>4,65</u>
Carbón activado a partir de carbón	<i>Life cycle assessment of activated carbon from woody biomass</i>	18,28	De la cuna a la puerta (Cradle-to-gate)	(Gu, Bergman, Anderson, & Alanya-Rosenbaum, Life cycle assessment of activated carbon from woody biomass., 2018)	<u>10,54</u>
Carbón activado a partir de carbón	<i>Comparative life cycle assessment of activated carbon production from various raw materials</i>	El estudio de referencia: 9,5 [kg CO ₂ e/kg AC] Otros datos referenciados en este artículo: 11 [kg CO ₂ e/kg AC]. (Bayer, Heuer, Karl, & Finkel, 2005) 3,41 [kg CO ₂ e/kg AC]. (Joseph, Kaetzl, Hensgen, & Schafer, 2020)	De la cuna a la puerta (Cradle-to-gate)	(Vilén, Laurell, & Vahala, 2022)	
Óxidos de tierras raras a partir de relaves mineros abandonados	<i>Are abandoned mine tailings a valuable resource for recovering Rare Earth Elements? Life cycle assessment and cost analysis</i>	A partir de relaves mineros Escenario uno: 10.781,9 Escenario dos: 2.864,5 Minería tradicional 15,9 y 54,4 - Método ReCiPe ⁶ (Marx, Schreiber, Zapp, & Walachowicz, 2018) Otros métodos de evaluación de impacto: 9,2 y 67,2	De la cuna a la puerta (Cradle-to-gate) Tecnología: fitoextracción. Escenario 1: uso de técnicas convencionales de preparación y cultivo del terreno para que se produzca el crecimiento de S. rubra en los relaves mineros. Escenario 2: asume el crecimiento espontáneo de S. rubra en el área minera. No requiere insumos externos al cultivo. Otros datos referenciados en este artículo utilizando minería tradicional.	(Munoz-Morales, y otros, 2025)	Se utilizan la media de los valores de la minería tradicional. 36,68
Fibras de carbono a partir de brea de alquitrán de hulla	<i>Bringing Light into the Dark—Overview of Environmental Impacts of Carbon Fiber Production and Potential Levers for Reduction</i>	Escenarios globales: 13 - 29. Escenario China: 34.1	De la cuna a la puerta (Cradle-to-gate) ⁷	(Prenzel, y otros, 2024)	Media de los valores: 21

⁶ Método científico que convierte los datos brutos de emisiones industriales en impactos medibles y comprensibles en la salud humana y los ecosistemas. Fuente: <https://product.sustainability-directory.com/term/recipe-method/>

⁷ De acuerdo con los autores, la información referenciada está basada en la producción de fibra de carbono basada en PAN, sin embargo, es de precisar que la participación de otros materiales precursores (brea y rayón) en el mercado global es menor. Igualmente, plantean que las rutas de procesamiento para los diversos precursores son similares por lo que las estimaciones de las emisiones también son válidas para fibras precursoras alternativas.

Producto	Estudio	kg CO ₂ e/kg de producto	Alcance	Fuente	Promedio en kg CO ₂ eq/kg de producto
Sustancias húmicas a partir de Leonardita o lignito	<i>LCA study of Humics from Extraction to the Point of Delivery in the UK. Final Report.</i>	0,194 ⁸	De la cuna a la puerta (Cradle-to-gate)	(Gyanendra & Kumar, 2024)	Promedio de biofertilizantes y fertilizantes minerales: 2,71
Biofertilizantes a partir de biorresiduos y lodos	<i>Carbon footprint evaluation of biofertilizers</i>	Biofertilizantes Nitrógeno: 0,8. Fosforo: 1,8 Promedio: 1,3 Fertilizantes minerales Nitrógeno: 1,9–7,8 (Promedio=4,85) Fosforo: 2,3–4,5 (Promedio=3,4) Promedios fertilizantes minerales: 4,125	Evaluación de ciclo de vida (life cycle assessment, por sus siglas en inglés).	(Havukainen, Uusitalo, Koistinen, Liikanen, Horttanainen, 2018)	
Grafeno	<i>A review on sustainable production of graphene and related life cycle assessment</i>	A partir de grafito • Oxidación química -Con reducción química: 243 -Con reducción biológica: 60 -Con reducción termal: 140 <u>Promedio: 147</u> • Exfoliación -Electroquímica: 439 -Molienda de bolas en solución de melamina: 216 -Molienda de bolas en solución acuosa: 183 - Molienda de bolas en base seca: 85 <u>Promedio: 230</u> A partir de metano. 594 A partir de biomasa. 235 Promedio general: 353	Evaluación de ciclo de vida (life cycle assessment, por sus siglas en inglés).	(Munuera, Britnell, Santoro, Cuéllar-Franca, & Casiraghi, 2021)	353

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes referenciadas.

⁸ De acuerdo con el estudio, el valor es significativamente menor a las emisiones de los fertilizantes a base de nitrato (751 kg CO₂ eq.) al igual que de los fertilizantes químicos compuestos (862 kg CO₂ eq.).

Anexo 6. Relación de procesos y actores asociados a la cadena productiva de producción de hidrógeno a partir del carbón.

Tabla 53. eslabones y actores de la cadena productiva de producción de hidrógeno.

Eslabón o actor	Tipo de eslabón o actor	Actores	Productos	Documento	Artículo - numeral
SOP1	Actividades de soporte	Organismo nacional de acreditación	Certificado de acreditación	Decreto 1074 de 2015	Artículo 2.2.1.7.2.1. Definiciones. 16. Certificado de acreditación.
SOP2	Actividades de soporte	Organismo de evaluación de la conformidad.	Certificado de conformidad.	Decreto 1074 de 2015	Artículo 2.2.1.7.2.1. Definiciones. 17. Certificado de conformidad.
SOP3	Actividades de soporte	Laboratorios de calibración	Equipos de medición calibrados	Decreto 1074 de 2015	Artículo 2.2.1.7.2.1. Definiciones. 43. Laboratorio de calibración
SOP4	Actividades de soporte	Laboratorio de ensayo/prueba	Informe de ensayos o pruebas	Decreto 1074 de 2015	Artículo 2.2.1.7.2.1. Definiciones. 44. Laboratorio de ensayo/prueba.
SOP5	Actividades de soporte	Organismo Nacional de Normalización. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC	Documentos normativos que proporcionan recomendaciones o pautas en relación con situaciones repetitivas en un contexto dado.	Decreto 1074 de 2015	Artículo 2.2.1.7.2.1. Definiciones. 35. Guía técnica colombiana.
SOP5	Actividades de soporte	Organismo Nacional de Normalización. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC	Norma técnica colombiana aprobada o adoptada.	Decreto 1074 de 2015	Artículo 2.2.1.7.2.1. Definiciones. 58. Norma técnica colombiana.
SOP5	Actividades de soporte	Organismo Nacional de Normalización. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación - ICONTEC	Norma nacional.	Decreto 1074 de 2015	Artículo 2.2.1.7.2.1. Definiciones. 60. Norma nacional.
SOP6	Actividades de soporte	Unidad sectorial de normalización.	Norma técnica sectorial.	Decreto 1074 de 2015	Artículo 2.2.1.7.2.1. Definiciones. 61. Norma técnica sectorial.
SOP7	Actividades de soporte	Cámara de Hidrógeno y Gases Renovables	Acciones para la promoción del hidrógeno realizadas.	https://www.andi.co.m.co/Home/Camara/1044-camara-de-hidrogeno-andi-naturgas	No aplica
SOP8	Actividades de soporte	Proveedores para los procesos de la cadena de valor (equipos, personal, insumos)	Equipos para la cadena productiva del hidrógeno a partir del carbón, personal competente, insumos como catalizadores hierro-cromo y cobre-zinc	No aplica	No aplica
SOP9	Actividades de soporte	Universidades	artículos de investigación, estudios de la cadena de valor	No aplica	No aplica
CV10	Cadena de valor	Servicio Integrado de Transporte Público (SITP)	Suministro de hidrógeno - hidrogena.	https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/de-talle/en-marcha-primera-operacion-de-movilidad-sostenible-con-hidrogeno-de-bajas-emisiones-en-transporte-publico-en-colombia Ecopetrol ya produce hidrógeno verde de la más alta pureza para bus del SITP de Bogotá	No aplica
CV11	Cadena de valor	Ecopetrol Evolución	Vehículos importados	Llegó a Colombia el primer vehículo que funcionará con hidrógeno verde de Ecopetrol - Semana	No aplica

Eslabón o actor	Tipo de eslabón o actor	Actores	Productos	Documento	Artículo - numeral
				<u>Revolución, el proyecto colombiano de movilidad con hidrógeno verde – H2LAC</u>	
CV12	Cadena de valor	SITP hidrógeno Bus (uso de hidrógeno en movilidad).	Movilidad vehicular realizada con hidrógeno	https://www.arcgis.com/apps/dashboards/62c26d6da229415a9ed081dce07c5878 https://redmas.com.co/colombia/Un-ano-cumple-el-primer-bus-de-hidrogeno-en-Bogota-aun-sin-ruta-pero-asi-operara-20240311-0015.html	No aplica
CV12	Cadena de valor	Centro de Innovación Econova Cartagena movilidad	Movilidad vehicular realizada con hidrógeno	https://www.arcgis.com/apps/dashboards/62c26d6da229415a9ed081dce07c5878	No aplica
CV2	Cadena de valor	Titulares mineros	Carbón con los requisitos necesarios para la gasificación.	No aplica	No aplica
CV3, CV4, CV5, CV7, CV13, CV14	Cadena de valor	No hay actores en operación en Colombia.	Gas de síntesis, gas de síntesis limpio, H ₂ adicionado y menor cantidad de dióxido de carbono, dióxido de carbono capturado y usado, hidrogeno líquido, hidrógeno exportado.	No aplica	No aplica
CV6, CV8, CV9	Cadena de valor	Universidad de la Sabana - PROMIGAS (Alianza Bio-PtX)	Biohidrógeno	https://www.arcgis.com/apps/dashboards/62c26d6da229415a9ed081dce07c5878	No aplica
CV6, CV8, CV9	Cadena de valor	Ecopetrol Electrolizador Cartagena	Hidrógeno	https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/de-talle/Noticias+2021/el-grupo-ecopetrol-inicia-la-produccion-de-hidrogeno-verde-en-colombia https://www.arcgis.com/apps/dashboards/62c26d6da229415a9ed081dce07c5878	No aplica
CV6, CV8, CV9	Cadena de valor	Empresas Públicas de Medellín Planta de tratamiento Aguas Claras	Hidrogeno a partir biogás de las aguas residuales	https://www.arcgis.com/apps/dashboards/62c26d6da229415a9ed081dce07c5878 https://www.epm.com.co/institucional/linked-in/grupo-epm-en-la-ruta-del-hidrogeno-verde/	No aplica
CV6, CV8, CV9	Cadena de valor	Universidad de Antioquia y Universidad de La Guajira (Incitativa Power to Gas)	Hidrógeno	https://www.arcgis.com/apps/dashboards/62c26d6da229415a9ed081dce07c5878 https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/crean-planta-para-transformar-energias-alternativas-en-electrica-en-la-guajira-810785	No aplica

Eslabón o actor	Tipo de eslabón o actor	Actores	Productos	Documento	Artículo - numeral
CV6, CV8, CV9	Cadena de valor	Hevolución	Hidrógeno	https://www.arcgis.com/apps/dashboards/62c26d6da229415a9ed081dce07c5878 https://h2lac.org/wp-content/uploads/2022/11/Presentacion-Hevolucion-H2LAC.pdf	No aplica
CV6, CV8, CV9, CV10, CV12	Cadena de valor	Promigas	Hidrógeno	https://www.arcgis.com/apps/dashboards/62c26d6da229415a9ed081dce07c5878 https://www.larepublica.co/especiales/avance-en-el-hidrogeno-verde/promigas-produce-1-5-toneladas-de-hidrogeno-verde-al-ano-3954984	No aplica
CV1, G6	Cadena de valor, sector gubernamental	Servicio Geológico Colombiano - SGC	Conocimiento del potencial del país en los recursos mineros	Ley 685 de 2001	Artículo 42. Investigación del subsuelo.
G1	Gubernamental	Gobierno Nacional / Ministerio de Minas y Energía	Mecanismos, condiciones e incentivos para promover la innovación, investigación, producción, almacenamiento, distribución y uso de hidrógeno.	Ley 2169 de 2021	ARTÍCULO 21. Promoción a la producción y uso del hidrogeno
G1	Gubernamental	Gobierno Nacional / Ministerio de Minas y Energía	Certificación de la UPME para exenciones tributarias.	Ley 2169 de 2021	ARTÍCULO 21. Promoción a la producción y uso del hidrogeno
G1	Gubernamental	Gobierno Nacional / Ministerio de Minas y Energía	Política pública para la promoción de la investigación y desarrollo local de tecnologías para la producción científica para la producción, almacenamiento, distribución, acondicionamiento, reelectrificación, usos energéticos y no energéticos del hidrógeno y otras tecnologías de bajas emisiones.	Ley 2169 de 2021	ARTÍCULO 23. Apoyo a la investigación, desarrollo e innovación
G1	Gubernamental	Gobierno Nacional / Ministerio de Minas y Energía	Instrumentos para fomentar e incentivar los trabajos de investigación y explotación de minerales utilizados en la fabricación de equipos para la cadena del hidrógeno.	Ley 2169 de 2021	ARTÍCULO 23. Apoyo a la investigación, desarrollo e innovación
G1	Gubernamental	Gobierno Nacional / Ministerio de Minas y Energía	Reglamentación para la promoción y desarrollo de las tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS).	Ley 2169 de 2021	ARTÍCULO 22. Tecnología de captura, utilización y almacenamiento de carbono
G1	Gubernamental	Ministerio de Minas y Energía	Lineamientos que deberán desarrollar las entidades competentes con el fin de determinar los requisitos y condiciones técnicas de los proyectos de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS).	Ley 2169 de 2021	ARTÍCULO 22. Tecnología de captura, utilización y almacenamiento de carbono
G1	Gubernamental	Ministerio de Minas y Energía	Reglamentación para el almacenamiento del CO2 en el subsuelo para todos los sectores de la economía.	Ley 2169 de 2021	ARTÍCULO 22. Tecnología de captura, utilización y almacenamiento de carbono

Eslabón o actor	Tipo de eslabón o actor	Actores	Productos	Documento	Artículo - numeral
G1	Gubernamental	Gobierno Nacional / Ministerio de Minas y Energía	Mecanismos y metodologías de medición y verificación objetivas y transparentes que garanticen que las actividades directas de producción, almacenamiento, distribución, y uso de Hidrógeno Verde y Azul	Ley 2169 de 2021	ARTÍCULO 57. Cumplimiento de los compromisos nacionales e internacionales de Colombia en materia de reducción de emisiones.
G1	Gubernamental	Gobierno Nacional / Ministerio de Minas y Energía	Requisito de un sistema de Captura, Uso y Almacenamiento de Carbono (CCUS) en los proyectos de Hidrógeno Azul.	Decreto 1476 de 2022	Artículo 2.2.7.1.3. Proyectos de Hidrógeno Azul.
G1	Gubernamental	Ministerio de Minas y Energía, o la entidad que este delegue.	Ubicación, diseño, construcción, modificación y/o mejoras, calibración, aforo, pruebas y demás requisitos que deberán cumplir los interesados en construir infraestructura con dedicación al suministro de hidrógeno para uso vehicular definidos.	Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.10. Suministro de hidrógeno para uso vehicular
G1	Gubernamental	Ministerio de Minas y Energía	Requisitos técnicos de ubicación, diseño, construcción, modificación y/o mejoras, calibración, aforo y pruebas que deberán cumplir los interesados en construir infraestructura con dedicación al suministro de hidrógeno para uso vehicular.	Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.10. Suministro de hidrógeno para uso vehicular
G1	Gubernamental	Ministerio de Minas y Energía	Requisitos técnicos y obligaciones para las estaciones de servicio / puntos de suministro energético cumplidos.	Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.10. Suministro de hidrógeno para uso vehicular
G1	Gubernamental	Ministerio de Minas y Energía	Sistema de información para los agentes y actores de la cadena de valor del hidrógeno implementado, en la medida que se requiera.	Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.1.13. Reporte de información.
G1	Gubernamental	Gobierno Nacional / Ministerio de Hacienda y Crédito Público	Impuesto al carbono	Ley 1819 de 2016	ARTÍCULO 221. Impuesto al carbono
G1	Gubernamental	Gobierno Nacional / DIAN	Impuesto al Carbono recaudado y administrado.	Ley 1819 de 2016	ARTÍCULO 222. Reglamentado por el Decreto Nacional 1778 de 2021. BASE GRAVABLE Y TARIFA
G1	Gubernamental	Gobierno	Celdas de combustible de hidrógeno como una de las alternativas para obtener corriente para los vehículos eléctricos.	Ley 1964 de 2019	Artículo 2. Definiciones. Vehículo eléctrico: Un vehículo impulsado exclusivamente por uno o más motores eléctricos, que obtienen corriente de un sistema de almacenamiento de energía recargable, como baterías, u otros dispositivos portátiles de almacenamiento de energía eléctrica, incluyendo celdas de combustible de hidrógeno o que obtienen la corriente a través de catenarias. Estos vehículos no cuentan con motores de combustión interna o sistemas de generación eléctrica a bordo como medio para suministrar energía eléctrica.
G1	Gubernamental	Gobierno	Hoja de Ruta del Hidrógeno	No aplica	Acciones para la adopción del hidrógeno como vector energético en Colombia.
G1	Gubernamental	Financiera de Desarrollo Nacional (FDN)	Créditos para proyectos de fuentes no convencionales de energía renovable (FNCR), de líneas de transmisión, <u>de proyectos de hidrógeno verde (H2V)</u> , de almacenamiento de energía, recursos	CONPES 4137 de 2024	1. Introducción

Eslabón o actor	Tipo de eslabón o actor	Actores	Productos	Documento	Artículo - numeral
			de energía distribuida, infraestructura de medición avanzada (AMI) y electromovilidad. (Subrayado fuera de texto).		
G1	Gubernamental	Agencia Nacional de Infraestructura (ANI)	Viabilidad de la producción, almacenamiento, suministro y/o exportación de combustibles de cero emisiones en el Caribe colombiano, que considere el hidrógeno como un potencial energético.	CONPES 4118 de 2023	Línea de acción 2.3. Promoción del desarrollo de nueva infraestructura portuaria orientada a las nuevas tecnologías de producción de energías renovables para consumo propio y comercialización en el exterior
G1	Gubernamental	Agencia Nacional de Infraestructura (ANI)	Medidas e incentivos de ascenso tecnológico del sistema portuario, la generación de FNCER y el desarrollo de hubs energéticos en las zonas portuarias evaluadas	CONPES 4118 de 2023	Línea de acción 2.4. Ascenso tecnológico de los puertos para la descarbonización de la actividad y promoción para la construcción de infraestructura portuaria para la producción de hidrógeno verde
G1	Gubernamental	Organismo acreditado	Certificado de Origen	Decreto 1597 de 2024	ARTÍCULO 2.2.7.2.2. Definiciones.
G1	Gubernamental	Ministerio de Minas y Energía	Sistema Único de Información para el Desarrollo, Gestión y Promoción del Hidrógeno (Ecosistema H2 Colombia diseñado e implementado)	Decreto 1597 de 2024	ARTÍCULO 2.2.7.4.1 Creación del Sistema Único de Información para el Desarrollo, Gestión y Promoción del Hidrógeno.
G1, G3	Gubernamental	Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Umbral máximo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para que el hidrógeno sea considerado de bajas emisiones.	Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.1.4 Hidrógeno de Bajas Emisiones.
G1, G3	Gubernamental	Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Certificación de Origen del Hidrógeno	Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.1.5. Certificación de Origen del Hidrógeno.
G1, G3	Gubernamental	Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Lineamientos, requisitos y metodologías para el uso de formaciones geológicas para el almacenamiento de hidrógeno.	Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.1.6. Almacenamiento de hidrógeno en el subsuelo.
G1, G8	Gubernamental	Ministerio de Minas y Energía / Fondo de Energías no Convencionales y Gestión Eficiente de la energía - FENOGÉ.	Planes, programas y proyectos de Fuentes no Convencionales de Energía -FNCE	Ley 2099 de 2021	Artículo 10. Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la energía (FENOGÉ).
G1,G2, G3, G4, G5	Gubernamental	Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Transporte; Minas y Energía; Comercio, Industria y Turismo; Ciencia, Tecnología e Innovación.	Hidrógeno de bajas emisiones promocionado	Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.1.4 Hidrógeno de Bajas Emisiones.
G10	Gubernamental	Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA	Formación para el empleo	Ley 2099 de 2021	ARTÍCULO 53. Formación para el empleo.
G11	Gubernamental	Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)	Regulación actualizada del uso del hidrógeno destinado a la prestación de los servicios públicos domiciliarios de energía y gas. Condiciones establecidas para la inyección y transporte de hidrógeno en el Sistema Nacional de Transporte, en las redes de distribución de gas y	Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.1.7. Armonización regulatoria.

Eslabón o actor	Tipo de eslabón o actor	Actores	Productos	Documento	Artículo - numeral
			en los sistemas de transporte por poliductos.		
G11	Gubernamental	Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG)	Esquemas tarifarios para Proyectos de Hidrógeno de Bajas Emisiones y/o los Derivados del Hidrógeno definidos	Decreto 1597 de 2024	ARTÍCULO 2.2.7.5.1 , Esquemas tarifarios para Proyectos de Hidrógeno de Bajas Emisiones y/o los Derivados del Hidrógeno.
G2	Gubernamental	Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación	Programas de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTel) para promover la formación de capacidades científicas, técnicas y tecnológicas para la I+D+i, conexas con las tecnologías de la cadena de valor de la industria del hidrógeno establecidos.	Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.1.11. Fomento a la innovación.
G3, G4	Gubernamental	Ministerio de Transporte y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Requisitos técnicos y de seguridad para el transporte de hidrógeno por carretera actualizados, si es necesario.	Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.1.9. Transporte de hidrógeno por carretera
G4	Gubernamental	Ministerio de Transporte, en coordinación con el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Requisitos, procedimientos, condiciones, e incentivos, para el uso del hidrógeno en el sector transporte actualizados.	Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.1.8. Uso del hidrógeno en el sector transporte.
G5	Gubernamental	Ministerio de Comercio, Industria y Turismo	Condiciones para garantizar la importación de autopartes y repuestos para los vehículos propulsados con hidrógeno, si se requiere.	Decreto 1476 de 2022	ARTÍCULO 2.2.7.1.8. Uso del hidrógeno en el sector transporte.
G7	Gubernamental	Agencia Nacional de Minería	Títulos mineros, recaudo y distribución de contraprestaciones económicas, informes de fiscalización, acciones de control, promoción y fomento.	Ley 2099 de 2021	Artículo 24. El Ministerio de Minas y Energía promoverá la reconversión de proyectos de minera e hidrocarburos que contribuyan a la transición energética
G7	Gubernamental	Agencia Nacional de Minería	Industria minera promocionada, títulos mineros otorgados, contraprestaciones económicas recaudadas y distribuidas, Registro Minero Nacional actualizado, acciones de asistencia técnica ejecutadas, informes de fiscalización elaborados.	Ley 685 de 2001	Artículo 317. Autoridad Minera
G9	Gubernamental	Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME	Certificados para beneficios tributarios	Ley 2099 de 2021	ARTÍCULO 43. Certificados para beneficios tributarios.

Fuente: elaboración propia a partir de las fuentes legales referenciadas.



Agencia
Nacional de Minería



ANMcolombia



agencianacionaldeminería



Agencia Nacional de Minería



promocion@anm.gov.co

