

**Análisis técnico del proceso de coquización artesanal en hornos tipo colmena: revisión  
documental aplicada al caso de Norte de Santander**

Yerson Alexander Vivas Barragán

Asesor

Freddy Alfonso Herrera Rojas

Universidad Nacional Abierta a Distancia UNAD  
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI  
Ingeniería Industrial

2026

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar esta importante etapa de mi formación profesional. A mi familia, especialmente a mis padres, por su apoyo incondicional, sus consejos, sacrificios y por ser el motor que me impulsó a seguir adelante en los momentos más difíciles. Su confianza y amor han sido fundamentales para alcanzar cada una de mis metas. A mis docentes y tutores, quienes compartieron sus conocimientos, orientación y experiencia durante este proceso académico, contribuyendo significativamente a mi crecimiento personal y profesional. Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que, de una u otra manera, aportaron su apoyo, motivación y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación, haciendo posible la culminación de este logro.

Yerson Alexander Vivas Barragán

## Resumen

La presente monografía analiza el proceso de coquización del carbón mineral en hornos tipo colmena, la cual es una práctica artesanal que pese a sus limitaciones técnicas constituye una de las principales actividades económicas del departamento de Norte de Santander. Por lo cual, aporta a la economía regional, la generación de empleo y el Producto Interno Bruto departamental (Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2022). Sin embargo, enfrenta desafíos importantes relacionados con el impacto ambiental, su bajo nivel de formalización y el cumplimiento de la normativa sobre emisiones contaminantes (Ministerio de Ambiente., 2008). Por consiguiente, a través de este documento se describe las características fundamentales del proceso de coquización, su relevancia socioproductiva en el contexto local y las tensiones que surgen entre el desarrollo económico y las exigencias ambientales. Además, se examinan los marcos regulatorios vigentes y se identifican aspectos clave para avanzar hacia una actividad más sostenible (Vera Duarte, Briceño Guerrero, & Mendoza Pérez, 2023). De este modo, a través de este documento se analizan los beneficios económicos como los retos que impone su permanencia en el mercado actual.

**Palabras Clave:** Coquización, hornos, carbón mineral, impacto ambiental, economía regional.

### **Abstract**

This monograph analyzes the coking process of mineral coal in beehive-type ovens, an artisanal practice that, despite its technical limitations, constitutes one of the main economic activities in the department of Norte de Santander. As such, it contributes to the regional economy, job creation, and the departmental Gross Domestic Product (Mining and Energy Planning Unit [UPME], 2022). However, it faces significant challenges related to environmental impact, low levels of formalization, and compliance with regulations on pollutant emissions (Ministry of Environment, 2008). Accordingly, this document describes the fundamental characteristics of the coking process, its socio-productive relevance in the local context, and the tensions that arise between economic development and environmental requirements. In addition, it examines the current regulatory frameworks and identifies key aspects for advancing toward a more sustainable activity (Vera Duarte, Briceño Guerrero, & Mendoza Pérez, 2023). Thus, this document analyzes both the economic benefits and the challenges associated with its continued presence in the current market.

***Keywords:*** Coking, ovens, mineral coal, environmental impact, regional economy.

## Tabla de Contenido

Introducción.....	7
Justificación.....	8
Objetivos.....	10
Planteamiento del Problema.....	11
Marco Conceptual.....	13
Marco Teórico.....	19
Metodología.....	33
Conclusiones.....	54
Cronograma.....	56
Referencias Bibliográficas.....	57

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Matriz de Riesgos e Impactos</i> .....	25
<b>Tabla 2</b> <i>Matriz SIPOC</i> .....	31
<b>Tabla 3</b> <i>Matriz de Cumplimiento Normativo</i> .....	45
<b>Tabla 4</b> <i>Relación entre Objetivos Específicos, Técnicas Metodológicas y Productos de Análisis</i> .....	49
<b>Tabla 5</b> <i>Criterios Técnicos, Económicos, Ambientales y Sociales</i> .....	52
<b>Tabla 6</b> <i>Cronograma de Actividades</i> .....	56

## **Introducción**

La coquización artesanal en hornos tipo colmena ha sido históricamente una actividad clave para la economía del departamento de Norte de Santander. No obstante, este modelo productivo enfrenta actualmente serios desafíos en términos de eficiencia energética, control ambiental y cumplimiento normativo, por lo cual, resulta necesario analizar el proceso bajo criterios técnicos que permitan identificar sus principales limitaciones y valorar alternativas de modernización.

Por consiguiente, esta monografía se desarrolló bajo un enfoque de revisión documental, cuyo objetivo fue examinar de forma crítica el estado actual del proceso de coquización artesanal, y evaluar su impacto técnico, ambiental y productivo. Por ende, a partir del análisis de fuentes normativas, académicas y técnicas, se buscó aportar elementos para la comprensión integral del sistema y proponer orientaciones generales hacia su posible transformación sostenible.

## **Justificación**

El proceso de coquización del carbón mineral en hornos tipo colmena contribuye significativamente a la economía regional y en la generación de empleo, especialmente en zonas rurales (Tibú, Sardinata, san Faustino, entre otras). Sin embargo, esta actividad carece de documentación que ayude a comprender su impacto socioeconómico y ambiental en la región de Norte de Santander al igual que sus implicaciones más allá del ámbito técnico. Por consiguiente, mediante este documento se estructura un análisis del estado actual de este proceso productivo a través de una visión crítica y reflexiva.

Además, este análisis permite identificar las condiciones que han contribuido a la permanencia de este modelo de negocio en un mercado que cada vez es más exigente en términos de normatividad ambiental como de los diferentes factores que intervienen en el desarrollo económico y la sostenibilidad territorial de una región cuya economía depende significativamente de la cadena del carbón y sus derivados (Díaz & Ríos, 2022).

Por otra parte, aportar al debate sobre la necesidad de transición hacia modelos productivos más formales y sostenibles (transición energética), ya que a diferencia de otros estudios cuyo foco se centra exclusivamente en la dimensión ambiental o tecnológica, esta monografía adopta un enfoque descriptivo e interdisciplinario que permite identificar las condiciones estructurales, sociales y económicas que han dificultado los procesos de transformación en el sector. Así como los cuellos de botella institucionales, desafíos del mercado y vacíos de política pública que limitan la consolidación de alternativas sostenibles (Ramírez & Carrillo, 2023)

Por último, genera conocimiento basado en una revisión rigurosa de diferentes fuentes bibliográficas, estadísticas y normativas que aportan una base conceptual para investigadores y diferentes actores de interés que deseen formular estrategias de mejora para el sector coquizador sin desconocer los retos que implica su permanencia en el tiempo (Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, 2022).

Por lo anterior, el presente estudio no solo permite documentar y analizar un proceso de alto interés nacional, sino que también promueve una mirada crítica sobre su rol en el desarrollo económico local, en un momento donde la sostenibilidad se ha convertido en un criterio clave para el futuro de las economías extractivas, por consiguiente para poder evaluar este tema de gran importancia es imperativo analizar el estado actual del proceso de coquización del carbón mineral en hornos tipo colmena en el departamento de Norte de Santander, con el fin de identificar sus implicaciones económicas, sociales y ambientales para la región a partir de una revisión documental y normativa que permita comprender su impacto y pertinencia en el contexto del desarrollo regional sostenible.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Analizar el estado actual del proceso de coquización del carbón mineral en hornos tipo colmena en el departamento de Norte de Santander, con el fin de identificar sus implicaciones económicas, sociales y ambientales para la región, a partir de una revisión documental y normativa que permita comprender su impacto y pertinencia en el contexto del desarrollo regional sostenible.

### **Objetivos Específicos**

Realizar una revisión bibliográfica y normativa sobre el proceso de coquización del carbón mineral en hornos tipo colmena en Colombia, con énfasis en el caso de Norte de Santander.

Identificar, a partir de fuentes documentales, los factores económicos que han favorecido la permanencia de esta práctica en la economía regional.

Analizar los impactos sociales y ambientales asociados a los hornos tipo colmena según la literatura especializada y la normatividad vigente.

Examinar, desde un enfoque documental, la relación entre esta actividad y los retos del desarrollo regional sostenible en Norte de Santander.

## Planteamiento del Problema

Sin embargo, existe una problemática que amenaza su sostenibilidad empresarial, dado que en el 2023 el 50 % de los hornos colmena en Norte de Santander permanecieron apagados debido a la fuerte caída del precio internacional del coque, lo cual provocó una disminución del 29 % en las exportaciones al pasar de US\$ 475 millones en 2022 a US\$ 281 millones en el primer trimestre de 2023, lo que generó pérdidas económicas para las empresas coquizadoras y un aumento en el desempleo regional (Alerta Santanderes, 2024). Además, los coquizadores deben competir con países como China e Indonesia cuya producción de coque es parcialmente subsidiada, por lo tanto, esta es una desventaja significativa para los coquizadores de norte de santander, ya que ellos deben soportar la exigencia del mercado en cuanto calidad y costo beneficio. Lo que está generando una distorsión en los precios internacionales que ha afectado gravemente la competitividad colombiana (La Opinión, 2025) Adicionalmente, gran parte de las empresas coquizadoras de la región utilizan tecnologías rudimentarias que no cumplen con los estándares ambientales establecidos en la Resolución 909 de 2008 (Resolución 909 de 2008, 2008), especialmente en lo referente al control de emisiones atmosféricas (Ministerio de Ambiente, 2008). Por lo que, gran parte de la producción sigue operando en condiciones informales sin licencias ambientales ni registro ante la autoridad minera, lo que impide su inclusión en programas de mejora tecnológica o formalización productiva (Asociación Coquizadores de Norte de Santander., 2024). Por lo anterior, esta informalidad contribuye al deterioro ambiental y la vulnerabilidad social y económica de cientos de trabajadores y pequeños productores.

Por consiguiente, esta realidad pone en evidencia la necesidad de preservar una fuente clave de ingresos para miles de familias nortesantandereanas y la urgencia de alinear esta actividad con los principios de sostenibilidad y legalidad. Por lo cual, a través de este proyecto se

analiza esta coyuntura económica, social y ambiental que revida del proceso de coquización en hornos colmena. Por ende, al identificar sus impactos en la región Nortesantandereana y comprender los desafíos que enfrentan este gremio empresarial frente al cumplimiento normativo y a las exigencias del mercado internacional se contribuye a estructurar un debate académico sobre el futuro del sector coquizador y su papel en el desarrollo territorial de Norte de Santander.

### **Pregunta de investigación**

¿Cuál es el estado actual del proceso de coquización de carbón mineral en hornos tipo colmena en Norte de Santander y cuáles son sus implicaciones económicas, sociales y ambientales para la región?

## **Marco Conceptual**

### **Coquización**

La coquización es un proceso termodinámico (pirolisis) donde el carbón se calienta con un bajo flujo de aire para que se transforme en coque, el cual se utiliza en el proceso de altos hornos para la generación de hierro, este proceso es vital en norte de santander dado que el carbón de esta región posee un gran poder calorífico y es bajo en azufre, lo cual permite la el proceso de hierro y ferroaleaciones para la construcción de paneles solares, tecnologías, entre otros elementos de la industria global (Restrepo & Ospina, 2022).

### **Carbón Mineral**

El carbón mineral es una roca sedimentaria rica en carbono que es utilizada como fuente energética y materia prima en procesos industriales. Sin embargo, esto depende de su calidad como el poder calorífico, contenido de cenizas, volátiles y humedad. Por ejemplo, el carbón de Norte de Santander es bituminoso bajo, el cual es empleado para la producción de coque debido a su disponibilidad y características coking (Unidad de Planeación Minero Energética UPME, 2023).

### **Horno tipo Colmena**

Son estructuras artesanales elaboradas a base de mampostería que se utilizan para coquizar carbón mineral, específicamente en zonas establecidas en el departamento de Norte de Santander (Tibú, Sardinata, San Faustino, entre otras). Sin embargo, este diseño no permite realizar un control eficiente de temperatura ni de emisiones, por lo que se considera un diseño ineficiente dada su baja eficiencia energética y los altos niveles de contaminación (Material particulado). Sin embargo, a pesar de estas desventajas su bajo costo de construcción y operación les permite a los pequeños coquizadores ser una alternativa viable debido a la alta demanda de esta calidad de coque (González & Pabón, 2021).

## **Coque Metalúrgico**

Este es un producto se deriva del carbón mineral de Norte de Santander mediante el proceso de coquización y se utiliza para la producción de acero y ferroaleaciones. Este producto es de gran demanda debido a su alta resistencia mecánica, baja reactividad y contenido mínimo de impurezas. Por lo tanto, es uno de los principales productos derivados de la coquización que se genera en Norte de Santander cumple con los altos estándares internacionales que exigen consistencia y trazabilidad en sus características fisicoquímicas (Maldonado, 2022).

## **Ciclo del Carbón en la Economía Regional**

Es uno de los pilares económicos de Norte de Santander y hace parte de un proceso se basa en una cadena productiva de extracción, transformación, comercialización y exportación del recurso a través de los cuales se genera empleo local y aporta al PIB regional superior al 10%. Sin embargo, su operatividad presenta múltiples retos ambientales. Por lo que se hace necesario evaluar las condiciones de su cadena operativa para mejorar este eslabón y reducir el impacto ambiental que genera sin afectar la economía del departamento de Norte de Santander. (Cámara de Comercio de Cúcuta, 2023).

## **Emisiones Atmosféricas del Proceso de Coquización**

Durante la coquización en hornos tipo colmena se liberan muchos contaminantes atmosféricos, entre los cuales se encuentra el material particulado (MP), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO) y otros compuestos orgánicos volátiles (COV) que tienen impactos directos sobre la salud humana y los ecosistemas. Por lo tanto, la falta de sistemas de control en estos hornos artesanales intensifica la liberación de gases y se convierte en una de las principales fuentes de deterioro ambiental en zonas productoras como

Norte de Santander. Por consiguiente, este tipo de emisiones pone en evidencia la necesidad de regulaciones más estrictas y tecnologías limpias (Gutiérrez & Pérez, 2021).

### **Normatividad Ambiental Aplicable a la Coquización**

El marco normativo colombiano establece lineamientos para regular las emisiones atmosféricas, vertimientos y manejo de residuos en procesos térmicos como la coquización, tal como lo indica la Resolución 909 de 2008 del Ministerio de Ambiente (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008), el cual define los límites permisibles de emisión para fuentes fijas, entre las cuales se encuentran los hornos de carbón. Sin embargo, esta normativa en Norte de Santander se ve afectada por la informalidad y la falta de tecnologías para la medición de gases de efecto invernadero (GEI) y material particulado (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

### **Formalización Minera**

Es un proceso para que los pequeños y medianos mineros obtengan licencias legales para el desarrollo de prácticas ambientales responsables y así poder entrar a programas de capacitaciones técnicas. Además, permite ingresar a mercados regulados y eleva la competitividad del producto final (carbón o coque). Por lo tanto, aunque en Norte de Santander se encuentre uno de los carbones más solicitados a nivel mundial, la falta de incentivos y acompañamiento técnico limitan el avance de este proceso y genera una alta proporción de productores en condición de informalidad (Agencia Nacional de Minería, 2022).

### **Competitividad del Sector Coquicultor**

El sector coquizador depende de su capacidad para cumplir con estándares de calidad, sostenibilidad y trazabilidad que exigen los mercados internacionales, especialmente en países como Brasil, Estados Unidos y Turquía, los cuales son los principales destinos del coque

colombiano. Sin embargo, factores como la eficiencia energética, reducción de emisiones y fortalecimiento de la cadena logística son claves para mejorar su posicionamiento. Por lo que, en Norte de Santander este es uno de los mayores desafíos es la transición hacia modelos productivos más limpios sin desincentivar a los pequeños productores quienes representan un alto porcentaje del empleo rural (Rodríguez & Molina, 2023).

### **Impacto Socioeconómico de la Coquización**

Es un pilar económico clave para Norte de Santander debido a que aporta más del 10% PIB regional y generar empleo directo e indirecto en zonas rurales con pocas alternativas productivas (Sardinata, Tibu, entre otras). Además, fortalece otros gremios económicos como el transporte, mantenimiento industrial, comercio y exportaciones. Pero su informalidad limita el acceso a beneficios sociales y laborales, por lo que se perpetua las condiciones de vulnerabilidad para un amplio grupo poblacional (Cámara de Comercio de Cúcuta, 2023).

### **Cadena de Valor del Coque Artesanal**

La cadena de valor del coque artesanal comprende desde la extracción del carbón mineral, transporte, transformación térmica en hornos tipo colmena y su comercialización en mercados nacionales e internacionales. Por consiguiente, esta cadena depende de procesos manuales con baja tecnificación que limita la eficiencia operativa. Sin embargo, es una de los principales pilares de economía regional, especialmente en municipios como Sardinata, El Zulia y Tibú. Por ende, para mejorar esta cadena se necesita identificar cuellos de botella, optimizar procesos logísticos y fortalecer la articulación entre actores productivos, gubernamentales y comerciales (Álvarez & Martínez, 2023).

### **Coquización en Hornos Tipo Colmena**

Es una técnica donde el carbón es sometido a temperaturas de hasta 1.100 °C en ausencia de oxígeno para obtener coque (de acuerdo a la calidad). No obstante, esta modalidad tiene ventajas como bajos costos de instalación, pero también presenta deficiencias como el control térmico, baja eficiencia energética y una alta generación de subproductos contaminantes. Sin embargo, este método sigue predominando en Norte de Santander porque su inversión es más económica (Lizarazo & Ramírez, 2022).

### **Exportación de Coque Colombiano**

Norte de Santander es una región de alta comercialización de carbón y coque debido a su ubicación fronteriza y su conectividad logística con Venezuela y puertos del Caribe. Lo cual incrementa la demanda por empresas que prefieren el bajo costo sobre la calidad del producto (ProColombia, 2023).

### **Riesgos Laborales en la Coquización Artesanal**

La coquización tiene alto riesgos laborales debido a la exposición a altas temperaturas, gases tóxicos, esfuerzo físico prolongado y falta de condiciones ergonómicas. Además, en algunas empresas los trabajadores no cuentan con equipos de protección personal ni capacitación en manejo de emergencias. Lo que incrementa los índices de enfermedades respiratorias, quemaduras y lesiones musculoesqueléticas (Sánchez & Torres, 2022).

### **Pirolisis del Carbón en la Coquización**

Es un proceso térmico en el que el carbón se descompone sin necesidad de oxígeno y produce gases, líquidos volátiles y coque como residuo sólido. Por ejemplo, en los hornos tipo colmena ocurre de forma lenta y descontrolada, por lo que afecta la calidad del producto y aumenta la emisión de material volátil. Ya que estos hornos carecen de monitoreo de temperatura

y presión, lo que limita la eficiencia del proceso y el aprovechamiento de subproductos valiosos como el alquitrán o el gas de coque (Restrepo & Herrera, 2022).

## Marco Teórico

### Antecedentes Históricos del Proceso de Coquización

El proceso de coquización ha sido un componente fundamental en la historia de la transformación del carbón mineral, especialmente desde la Revolución Industrial. Esta técnica, que consiste en la destilación seca del carbón para producir coque un combustible de alto poder calorífico y baja reactividad, encontró su aplicación inicial en grandes centros industriales con hornos mecanizados. Sin embargo, en América Latina y particularmente en Colombia, se consolidó una versión artesanal del proceso, adaptada a las condiciones socioeconómicas locales y a las limitaciones tecnológicas del entorno rural (García & Mendoza, 2021)

En Colombia, la implementación de hornos tipo colmena comenzó a tomar fuerza en la década de 1950, como respuesta a la demanda de coque metalúrgico por parte de la industria siderúrgica nacional y regional. Estos hornos se caracterizan por su construcción con materiales locales, diseño semicircular, y operación manual, lo cual los hace accesibles para pequeños productores pero limitados en eficiencia y control ambiental. Su proliferación en regiones como Norte de Santander se debió a la abundancia de carbón coquizable y a la ubicación geográfica estratégica, cercana a la frontera con Venezuela y a puertos de exportación terrestre (Cortés & Rincón, 2020)

A lo largo de las décadas, los hornos tipo colmena se convirtieron en una fuente relevante de empleo para comunidades rurales, consolidando una economía informal alrededor de la producción de coque. No obstante, su persistencia también ha sido objeto de debate por los impactos negativos asociados a la contaminación, la baja eficiencia térmica y la precariedad laboral. A pesar de múltiples intentos por reconvertir el modelo productivo hacia tecnologías más limpias, la resistencia cultural, los costos de inversión y la débil articulación institucional han

perpetuado su uso en zonas como El Zulia, Sardinata y Tibú (Ministerio de Minas y Energía, 2023)

Así, los antecedentes históricos del proceso de coquización artesanal en hornos colmena no solo reflejan una herencia tecnológica adaptada a las condiciones locales, sino también una manifestación de las tensiones entre tradición, economía extractiva y sostenibilidad ambiental.

### **Procesos Técnicos de Coquización**

El proceso técnico de coquización consiste en la transformación térmica del carbón mineral, mediante su carbonización lenta en ausencia de oxígeno, para obtener coque. Este subproducto presenta características esenciales como alta porosidad, bajo contenido de impurezas y alta resistencia mecánica, cualidades fundamentales para su uso en procesos industriales como la fabricación de acero o la calcinación de minerales (Pérez & Jiménez, 2020).

En el caso específico de los hornos tipo colmena, la coquización se realiza en estructuras construidas en ladrillo refractario con forma semicircular y sin control automatizado de temperatura o atmósfera. El carbón es introducido manualmente y la cocción puede tardar entre 12 y 24 horas, dependiendo de la calidad del carbón y del tamaño del horno. A diferencia de los hornos industriales de tipo coqueadora, que operan de forma continua y con control técnico, los colmena trabajan en ciclos, lo que genera variaciones en la calidad del producto final y pérdidas de eficiencia térmica (Ramírez & León, 2021).

Además, en estos hornos se liberan compuestos volátiles como alquitrán, azufre y gases contaminantes que, al no estar controlados, tienen impactos ambientales severos. En términos energéticos, la eficiencia de estos sistemas artesanales es baja, ya que gran parte del calor generado se pierde por radiación y falta de aislamiento. A esto se suma que muchos hornos

carecen de sistemas de recuperación de calor o depuración de gases, lo cual incrementa la contaminación atmosférica y reduce la sostenibilidad del proceso (Gómez & Salazar, 2022)

Pese a estas limitaciones, la producción en hornos colmena sigue siendo preferida por pequeños productores debido a sus bajos costos de instalación, facilidad de operación y conocimientos heredados. Sin embargo, desde un enfoque técnico y ambiental, esta tecnología representa un obstáculo para avanzar hacia procesos más eficientes y compatibles con las exigencias de los mercados internacionales, que demandan coque de calidad certificada y producido bajo criterios de sostenibilidad (Mendoza & Rueda, 2023)

### **Importancia Económica del Sector Coquizador Artesanal**

El sector coquizador artesanal representa un eslabón clave dentro de la economía del departamento de Norte de Santander, dado su papel en la generación de empleo rural, su contribución al Producto Interno Bruto (PIB) regional y su participación en las exportaciones de carbón y coque. A pesar de operar mayoritariamente en la informalidad, este sector sostiene el ingreso de cientos de familias en municipios como El Zulia, Sardinata, Cúcuta y Tibú, donde se concentra la mayor actividad coquera del país (Departamento Nacional de Planeación, 2023)

Según cifras del Observatorio Regional Minero-Energético, Norte de Santander aportó cerca del 22% del coque exportado por Colombia en 2022, lo que representa ingresos cercanos a los 400 millones de dólares, principalmente hacia mercados como Brasil, Turquía y México. Esta dinámica comercial ha posicionado al departamento como una zona estratégica para la economía minera nacional (Agencia Nacional de Minería). Sin embargo, más del 60% de los productores operan sin formalización, lo que limita el acceso a beneficios estatales, certificaciones y financiamiento (Díaz & Barrera, 2022)

A nivel interno, el proceso de coquización artesanal ha permitido dinamizar economías locales, promoviendo encadenamientos productivos con el transporte, la comercialización y servicios auxiliares. No obstante, esta importancia económica convive con altos niveles de vulnerabilidad, bajos márgenes de rentabilidad y escasa capacidad de innovación tecnológica. Estas condiciones refuerzan una dependencia económica hacia actividades extractivas de bajo valor agregado y con bajo nivel de regulación (Cárdenas & López, 2021)

En este contexto, resulta fundamental comprender que la relevancia del sector coquizador artesanal no solo radica en su impacto macroeconómico, sino también en su función social como sustento económico de comunidades rurales. Por ello, cualquier propuesta de reconversión o transición debe considerar estos factores para evitar desestructurar economías locales sin ofrecer alternativas viables y sostenibles.

### **Impactos Sociales del Proceso Coquizador Artesanal**

El desarrollo del sector coquizador artesanal en Norte de Santander ha generado importantes repercusiones sociales, tanto positivas como negativas, especialmente en comunidades rurales con limitada presencia institucional y escasas alternativas de empleo. Este proceso ha favorecido la generación de trabajo informal y de subsistencia, lo cual ha contribuido a la reducción parcial del desempleo, aunque en condiciones de alta vulnerabilidad y escasa protección laboral (Nieto & Cáceres, 2022)

En términos de estructura familiar, muchas unidades productoras son de carácter familiar o comunitario, lo que ha fortalecido dinámicas de trabajo colectivo y transmisión intergeneracional del conocimiento técnico. Sin embargo, también se ha documentado la presencia de trabajo infantil, condiciones precarias de seguridad ocupacional, y exposición prolongada a contaminantes sin medidas de prevención adecuadas (Organización Internacional

del Trabajo., 2023). Estas situaciones perpetúan ciclos de pobreza y exclusión social, especialmente entre trabajadores de zonas como El Zulia, Tibú y Sardinata, donde los servicios públicos, la salud y la educación son deficientes (Ruiz & Delgado, 2022)

Además, la ausencia de procesos de formalización ha dificultado la articulación de este sector con programas de desarrollo social, generando una desconexión entre la actividad económica y las políticas públicas territoriales. Esto ha llevado a una baja asociatividad y escasa capacidad de negociación colectiva frente a actores institucionales o comerciales (Ministerio de Trabajo, 2023)

En este sentido, si bien el proceso coquizador ha sido un factor estabilizador en la economía rural del departamento, también representa un desafío social urgente. Su sostenimiento bajo condiciones informales limita el desarrollo humano de las comunidades involucradas, al tiempo que dificulta la transición hacia modelos productivos más inclusivos, seguros y sostenibles.

### **Impactos Ambientales del Proceso de Coquización Artesanal**

El proceso de coquización en hornos tipo colmena genera significativos impactos ambientales, derivados principalmente de su operación ineficiente, su tecnología obsoleta y la ausencia de sistemas de control de emisiones. A diferencia de los hornos industriales, estos hornos artesanales no cuentan con filtros ni mecanismos de recuperación de gases, lo que da lugar a la liberación directa de compuestos contaminantes como monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y material particulado (González & Méndez, 2022)

Estos contaminantes afectan gravemente la calidad del aire en zonas de alta densidad coquera, como Sardinata y El Zulia, donde los niveles de emisiones superan los límites

establecidos por la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Investigaciones recientes han identificado una correlación entre la exposición prolongada a estas emisiones y afecciones respiratorias en poblaciones cercanas, especialmente en niños y adultos mayores (Martínez & Pérez, 2023). Además, la contaminación del suelo y fuentes hídricas adyacentes es frecuente, debido a la esorrentía de residuos y la quema no controlada de materiales con compuestos tóxicos (Rueda & Fajardo, 2021)

Por otra parte, el uso continuo de leña para el encendido de los hornos y la pérdida de masa forestal asociada al ciclo de producción incrementa la presión sobre ecosistemas frágiles, como el piedemonte de la serranía del Perijá. Esto agudiza la degradación del suelo, disminuye la biodiversidad y contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero, agravando el cambio climático local (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2022)

En este contexto, la falta de regulación efectiva y de políticas ambientales diferenciadas para el sector coquizador artesanal ha permitido la reproducción de prácticas productivas altamente contaminantes. Esta situación plantea la necesidad de fortalecer los instrumentos de vigilancia ambiental, promover tecnologías más limpias, y fomentar la educación ambiental entre los productores como elementos clave para mitigar los efectos negativos del proceso de coquización artesanal sobre el entorno natural de Norte de Santander.

A partir de la revisión documental, se estructuró una matriz de riesgos e impactos asociados al proceso de coquización artesanal, integrando variables ambientales y de seguridad y salud en el trabajo. Esta herramienta permite priorizar los aspectos más críticos del proceso desde una visión preventiva y de mejora.

### **Tabla 1**

*Matriz de Riesgos e Impactos*

<b>Etapa del proceso</b>	<b>Aspecto / peligro</b>	<b>pacto o riesgo asociado</b>	<b>Severidad</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Prioridad</b>
Carga del carbón	Manipulación manual de material	Sobreesfuerzo, fatiga, lesiones musculoesqueléticas	Alta	Alta	Alta
Encendido del horno	Exposición a calor y llama directa	Quemaduras, estrés térmico	Alta	Media	Alta
Pirolisis / combustión	Emisión de gases y material particulado	Afectación respiratoria, contaminación atmosférica	Alta	Alta	Alta
Sellado y operación	Ausencia de monitoreo técnico	Ineficiencia térmica, pérdida de control del proceso	Media	Alta	Alta
Enfriamiento / apagado	Uso de agua y choque térmico	Emisión de vapores, afectación del suelo y agua	Media	Media	Media
Descarga del coque	Exposición a material caliente y partículas	Quemaduras, accidentes, inhalación de polvo	Alta	Alta	Alta

*Nota.* La priorización se realizó cualitativamente con base en la combinación de severidad y frecuencia, usando la escala baja, media y alta.

### **Normativa y Políticas Públicas Aplicables al Proceso de Coquización Artesanal**

El proceso de coquización de carbón mineral en hornos tipo colmena en Colombia está sujeto a un marco normativo ambiental, minero y laboral que, aunque vigente, presenta retos significativos en su aplicación y fiscalización, especialmente en regiones como Norte de Santander donde predomina la producción artesanal y la informalidad.

Desde el punto de vista ambiental, la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece límites máximos permisibles de emisiones para fuentes fijas, como los hornos de coque. Sin embargo, su cumplimiento en el sector coquizador artesanal ha sido limitado por la ausencia de tecnologías de control, la falta de monitoreo y el desconocimiento normativo por parte de los productores (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

En materia minera, el Código de Minas (Ley 685 de 2001) (República de Colombia) contempla la posibilidad de formalizar operaciones pequeñas y artesanales mediante contratos de concesión o subcontratación, pero este procedimiento se ha tornado complejo debido a los altos costos y exigencias técnicas para pequeños productores. La Agencia Nacional de Minería ha promovido planes de formalización minera en municipios coquizadores, pero su alcance ha sido limitado (Agencia Nacional de Minería, 2023)

Desde lo laboral, el Ministerio de Trabajo ha advertido sobre la precariedad de las condiciones en que se desarrolla esta actividad, lo que incluye la falta de afiliación al sistema de seguridad social, riesgos ocupacionales elevados y, en algunos casos, trabajo infantil (Organización Internacional del Trabajo, 2023). Por esta razón, se han propuesto iniciativas como

el Programa de Trabajo Decente en Minería Artesanal, orientado a mejorar la calidad del empleo en zonas mineras.

En el ámbito internacional, Colombia ha suscrito convenios ambientales y laborales que exigen mayores niveles de cumplimiento en actividades extractivas. La OCDE y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) han recomendado al país promover políticas diferenciales para pequeños mineros, que permitan la transición hacia modelos más sostenibles y competitivos (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 2021)

En conclusión, si bien existe un marco normativo robusto, su implementación en el contexto coquizador artesanal enfrenta desafíos estructurales relacionados con la informalidad, la baja capacidad institucional y la falta de incentivos para la adopción de mejores prácticas. Esto limita la posibilidad de consolidar un modelo de producción que cumpla simultáneamente con los objetivos económicos, sociales y ambientales de la región.

### **Coque Metalúrgico y su Demanda Industrial**

Es un insumo crítico en la industria siderúrgica, en donde actúa como agente reductor en los altos hornos para la producción de arrabio. Este producto tiene una alta demanda ligada a la producción de acero, por lo que es un actor importante en el desarrollo industrial global. Por ende, Colombia aumentó sus exportaciones para aprovechar la demanda en países como Brasil y Turquía pero la variabilidad en la calidad del coque representa un reto para acceder a mercados más exigentes, la cual es difícil de lograr con los hornos colmena (Camargo & Díaz, 2023).

### **Sustentabilidad en la Producción de Coque**

Para ser sustentable en la producción de coque se necesita disminuir el impacto ambiental, así como aprovechar mejor los recursos operativos y económicos para mejorar condiciones laborales de los colaboradores directos e indirectos. Por ejemplo, en el caso de Norte

de Santander, su producción de coque en la mayoría de las empresas es con hornos tipo colmena, por lo que lograr sustentabilidad requiere implementar nuevas tecnología de eficiencia energética y realizar alianzas con entidades ambientales que permitan compensar los impactos del proceso industrial (Gómez & Ordoñez, 2022)

### **Reconversión Tecnológica del Sector Coquizador**

Es un proceso mediante el cual los sistemas de producción son transformados en modelos más eficientes, seguros y sostenibles (migración tecnológica). Por ejemplo, para el gremio coquizador del departamento de Norte de Santander implica reemplazar los hornos tipo colmena por hornos solera u hornos verticales, ya que estos reducen las las emisiones de material volátil y los tiempos de producción. Sin embargo, este cambio requiere una inversión considerable que en la mayoría de las cosas los empresarios la contemplan como innecesaria o no viable para su modelo de negocio (Ministerio de Minas y Energía, 2023).

### **Conflictos Socioambientales en Zonas de Coquización**

El proceso de coquización en Norte de Santander a través de hornos colmena está situado en gran parte en zonas rurales, sin embargo, han generado conflictos socioambientales entre productores, comunidades y autoridades locales. Teniendo como foco de discusión la contaminación del aire, el deterioro de fuentes hídricas y la afectación de cultivos y salud comunitaria. Además, en muchos casos la falta de una mesa de dialogo entre los diferentes actores involucrados dificulta el desarrollo de la cadena productiva (huelgas, cierres de las vías, etc). Por lo que se requiere de mecanismos de participación ciudadana, gestión ambiental participativa y aplicación de justicia ambiental con enfoque territorial para poder dar una pronta solución a estos conflictos socioambientales (Pérez & León, 2023).

### **Formalización del Sector Coquizador Artesanal**

Consiste en integrar esta actividad dentro del marco legal, tributario, ambiental y laboral del país. Por ejemplo, en Norte de Santander se encuentra gran parte de los productores de coque trabajan en condiciones informales, por lo que se les dificulta el acceso a líneas de crédito, asistencia técnica o beneficios institucionales. Por ende, una vez estos productores se formalicen dentro del marco legal de la república de Colombia podrá acceder a derechos laborales que les permite mejorar las condiciones técnicas y ambientales de la producción, de esta forma se elevan sus estándares para competir en mercados internacionales (Díaz & Salazar, 2023).

### **Economía Regional Basada en el Carbón y el Coque**

El proceso de coquización es una fuente importante de ingresos para Norte de Santander, debido a su alto PIB y su generación de empleo directo e indirecto en zonas rurales. Además, ayuda al desarrollo de municipios como Sardinata, El Zulia y Cúcuta. Sin embargo, genera un impacto ambiental que afecta el desarrollo de la región nortesantandereana y por consiguiente, es imperativo integrar estrategias de diversificación productiva e inversión en tecnologías limpias que permitan mantener este modelo de negocio sin impactar negativamente en un contexto ambiental (Observatorio de Desarrollo Regional de Norte de Santander, 2023).

### **Responsabilidad Social Empresarial en el Sector Coquizador**

Por otra parte, la responsabilidad social empresarial (RSE) implica el compromiso de las empresas coquizadoras de la región con el bienestar de sus trabajadores, las comunidades vecinas y el medio ambiente. Por ende, es imperativo para este sector implementar estrategias que permitan incluir inversión en infraestructura local, promoción de educación ambiental, mejora de condiciones laborales y establecimiento de relaciones de confianza con las comunidades. De esta

forma, este enfoque representa una oportunidad para transformar la percepción pública de esta actividad económica (Moreno & Flórez, 2023)

### **Cadenas de Valor en la Producción de Coque**

La cadena de valor en la producción de coque va desde la extracción del carbón mineral, el transporte, la transformación en hornos tipo colmena, hasta su comercialización nacional e internacional. Sin embargo, la informalidad y la baja tecnificación limitan la competitividad del sector y generan cuellos de botella en diferentes puntos de esta cadena. Por consiguiente, es importante proponer estrategias de intervención económica para mejorar la logística y el acceso a mercados que permitan generar un aumento en el valor agregado del producto final (Rincón & Téllez, 2022).

### **Comercialización Internacional del Coque Colombiano**

El coque producido en Norte de Santander se ha consolidado en diferentes mercados como Brasil, Turquía y México, pero enfrenta dificultades por la exigencia de la calidad del producto, ya que estos mercados tienen en cuenta la responsabilidad ambiental del proceso y la calidad del producto, por ende, la competencia más fuerte que tiene el proceso de Norte de Santander derivada de hornos industriales. En consecuencia, con lo anterior, se recomienda que el gremio coquizador de Norte de Santander adquiera certificaciones ambientales, eficiencia energética y de calidad que les permita ser más competitivo internacionalmente (ProColombia, 2023).

### **Políticas Públicas para el Sector Coquizador**

Las políticas públicas dirigidas al gremio coquizador en Colombia buscan un equilibrio entre la económica y el impacto ambiental y social que representa esta actividad. Para esto, se han establecido el Programa de Reconversión Coquera que está liderado por el Ministerio de Minas y Energía, además de otras estrategias territoriales impulsadas por las gobernaciones que

buscan mejorar la competitividad del sector a través de la tecnificación, la formalización y la educación ambiental. Sin embargo, sus resultados han sido limitados por la falta de apoyo interinstitucional y escasa apropiación por parte de los productores (Ministerio de Minas y Energía., 2023).

### **SIPOC del Proceso de Coquización**

Con el fin de representar de manera sistémica el proceso de coquización artesanal en hornos tipo colmena desde una perspectiva de Ingeniería Industrial, se elaboró una matriz SIPOC, la cual permite identificar los proveedores, entradas, etapas del proceso, salidas y clientes o actores receptores del producto. Esta herramienta facilita la comprensión integral del sistema productivo y permite visualizar puntos críticos asociados a la eficiencia operativa, las emisiones y la calidad del coque.

**Tabla 2**

*Matriz SIPOC*

<b>Proveedores</b>	<b>Entradas</b>	<b>Proceso</b>	<b>Salidas</b>	<b>Clientes</b>
Minas de carbón, proveedores de insumos, mano de obra local, transportadores	Carbón mineral, combustible de encendido, mano de obra, horno colmena, herramientas	Preparación y carga del carbón → encendido → pirolisis progresiva → sellado y combustión parcial de volátiles → enfriamiento/apagado → descarga del coque	Coque metalúrgico, gases, material particulado, calor residual, residuos	Industria siderúrgica, comercializadores, exportadores, transportadores, mercado regional e internacional

	manuales, agua		sólidos, efluentes	
--	-------------------	--	-----------------------	--

*Nota.* La tabla muestra el proceso de coquización del carbón

## **Metodología**

El presente trabajo corresponde a una monografía de revisión documental con alcance descriptivo–analítico, orientada al análisis técnico, económico, social y ambiental del proceso de coquización artesanal en hornos tipo colmena en el departamento de Norte de Santander. Cuyo enfoque es cualitativo y consta de un diseño no experimental y un alcance descriptivo–analítico.

Así mismo, este análisis está constituido por el proceso de coquización artesanal en hornos tipo colmena, mientras que el ámbito espacial del estudio corresponde al departamento de Norte de Santander. Adicionalmente, tiene como base de desarrollo información técnica, normativa e institucional publicada entre los años 2018 y 2025, la cual permite caracterizar las condiciones actuales del sector y sustentar la formulación de propuestas de mejora desde una perspectiva integral.

Por consiguiente, para esto se han establecido criterios de inclusión y exclusión para lograr un mejor desempeño metodológico del desarrollo de la monografía y fortalecer la relevancia, actualidad y confiabilidad de la información utilizada.

### **Criterios de Inclusión**

Publicaciones y documentos publicados entre 2018 y 2025, priorizando la información más reciente.

Artículos científicos, informes técnicos y normativa oficial relacionados con la producción de coque y la coquización artesanal.

Fuentes que aborden específicamente temas de hornos tipo colmena, coquización artesanal y coque metalúrgico.

Documentos que aporten información sobre aspectos técnicos, económicos, ambientales o sociales del sector.

### **Criterios de Exclusión**

Fuentes sin respaldo institucional o académico, incluyendo notas periodísticas sin base técnica.

Opiniones o análisis sin sustento científico o técnico.

Documentos duplicados, obsoletos o desactualizados que no reflejen la situación actual del sector.

Por lo anterior, la revisión documental mantiene un enfoque en información relevante, confiable y aplicable del proceso de coquización artesanal en Norte de Santander. Además, para garantizar un análisis riguroso de este proceso se tuvieron en cuenta las siguientes técnicas cualitativas:

#### **Análisis de contenido temático (revisión bibliográfica)**

Se revisaron artículos científicos, informes técnicos y documentos institucionales relacionados con la coquización artesanal, hornos tipo colmena y coque metalúrgico.

Se identificaron categorías y subtemas clave: eficiencia energética, emisiones contaminantes, riesgos laborales, impacto socioeconómico y sostenibilidad ambiental.

Esta técnica permitió sintetizar información dispersa y detectar patrones relevantes para caracterizar el estado actual del sector.

#### **Comparación Normativa**

Se contrastó la normativa vigente (Resoluciones 909/2008 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008), 1309/2010 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010); Ley 99/1993 (Congreso de la República de Colombia, 1993); Ley 685/2001 (Congreso de la República de Colombia, 2001)) con las prácticas observadas y reportadas en fuentes secundarias

Se evaluó el grado de cumplimiento de los límites de emisión, licenciamiento ambiental y estándares laborales, identificando brechas y deficiencias en la aplicación real de la legislación.

### **Análisis Comparativo de Tecnologías**

Se compararon los hornos tipo colmena tradicional con hornos industriales modernos (verticales, tipo solera) según criterios técnicos: eficiencia térmica, control de emisiones, velocidad del frente térmico y calidad del coque.

Esta comparación permitió identificar rezagos técnicos del modelo artesanal y oportunidades de modernización adaptables al contexto regional.

### ***Benchmarking Conceptual***

Se revisaron experiencias de reconversión tecnológica y buenas prácticas en Colombia (Boyacá) y otros países con sectores coquizadores consolidados (India, China, Brasil).

Se analizaron los resultados, estrategias de financiamiento, acompañamiento institucional y políticas de formalización, para extraer prácticas replicables en Norte de Santander.

De esta forma, el estudio no solo describe el estado actual del proceso de coquización, sino que también genera insumos concretos para la formulación de propuestas de mejora técnica, ambiental y socialmente sostenibles.

Además, los objetivos específicos de esta investigación se relacionaron con técnicas metodológicas y productos de análisis mediante categorías definidas según su naturaleza. Lo cual permitió organizar la información de manera sistemática y asegurar que cada aspecto relevante del estudio sea considerado:

**Técnicas.** Eficiencia térmica, control de emisiones, calidad del coque.

**Ambientales.** Material particulado (MP), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), cumplimiento normativo.

**Sociales.** Empleo, riesgos laborales, informalidad, cohesión comunitaria.

**Económicas.** Costos, producción, exportaciones, competitividad del sector.

Por consiguiente, la incorporación de estas categorías permitió que la revisión documental, el análisis comparativo y el benchmarking conceptual se realizaran de manera organizada y coherente, asegurando que cada aspecto del análisis sea considerado en la formulación de propuestas de mejora para el sector coquizador de Norte de Santander.

Adicionalmente, se adoptó un enfoque descriptivo que busca caracterizar el estado actual del proceso productivo; documental. El cual se fundamenta en la revisión sistemática de literatura científica, normativa y fuentes institucionales, cuya aplicación se refleja en la medida en que los resultados se orientan a la formulación de propuestas de mejora técnica y sostenibilidad para el sector coquizador regional.

En otras palabras, la presente monografía busca caracterizar el estado actual del proceso de coquización artesanal en hornos tipo colmena en el departamento de Norte de Santander, partiendo de una revisión y análisis de fuentes secundarias como literatura científica, normativa y datos institucionales en la medida en que orienta sus resultados hacia la formulación de propuestas concretas para la mejora técnica y de sostenibilidad en el sector coquizador.

Para esto, inicialmente se optó por una revisión documental como técnica principal debido a que el objeto de estudio es el proceso de coquización artesanal, el cual tiene un alto volumen de información técnica, normativa y contextual disponible en fuentes institucionales y académicas. Sin embargo, la informalidad y dispersión del sector dificultan la aplicación de métodos cuantitativos directos (como encuestas o mediciones in situ). Por lo que, solo a través de la revisión documental se pudo consolidar evidencia válida al comparar marcos regulatorios y examinar estudios de caso previamente desarrollados. Por consiguiente, esta estrategia permitió

construir una comprensión amplia y estructurada de las implicaciones técnicas, sociales, económicas y ambientales del proceso.

Seguidamente, para el desarrollo de esta investigación, se aplicaron diversas técnicas cualitativas que permitieron comprender de manera integral el proceso de coquización artesanal y su contexto regional. En primer lugar, se utilizó un análisis comparativo entre los hornos tipo colmena tradicionales y las tecnologías industriales modernas de coquización como lo indica (Gómez & Salazar, 2022), lo cual permitió establecer diferencias en aspectos clave como la eficiencia energética, el control de emisiones y la calidad del producto final, la cual fue esencial para identificar los principales rezagos técnicos del modelo artesanal y los retos que enfrenta el sector en términos de competitividad y sostenibilidad.

Por otro lado, se empleó un enfoque de benchmarking conceptual para revisar experiencias exitosas de reconversión tecnológica implementadas en otras regiones del país o en países con sectores coquizadores consolidados. Esta técnica fue útil para identificar las buenas prácticas que podrían adaptarse a las condiciones locales (CORPOBOYACÁ., 2019).

Por otra parte, esta investigación también enfrentó algunas limitaciones metodológicas como:

**Ausencia de Datos Primarios Cuantificables.** Gran parte del análisis se sustenta en información secundaria, lo que limita la medición directa de variables técnicas y económicas.

**Limitaciones en Acceso a Información Sensible.** algunos datos sobre procesos productivos y costos no fueron fácilmente accesibles por razones de confidencialidad empresarial.

**Variabilidad del Mercado Internacional.** las fluctuaciones de precios y la dinámica de exportación de coque pueden afectar la generalización de los hallazgos.

**Falta de Mediciones Directas de Emisiones.** No se realizaron registros propios de emisiones contaminantes, lo que condiciona la precisión del análisis ambiental. Las cuales derivan de las condiciones de informalidad.

Por consiguiente, esto restringió la posibilidad de incorporar análisis cuantitativos directos y obligó a concentrar el estudio en fuentes documentales, debido a la falta de acceso de la información de las empresas legalmente constituidas que operan en la región.

Ya qué, la baja disponibilidad de documentación técnica sobre los niveles de eficiencia energética y emisiones específicas de los hornos tipo colmena en Norte de Santander fue un factor limitante al igual que las condiciones cambiantes del mercado internacional del coque, ya que éstas presentan alta volatilidad en los precios y variabilidad en las proyecciones económicas a largo plazo, lo cual influye directamente en la viabilidad financiera de las propuestas (Oliveros, 2024).

Además, el acceso a la información sensible o no publicada, como el estado de los registros de licenciamiento ambiental, la caracterización laboral del sector o los niveles reales de incumplimiento normativo generan sesgos en algunos análisis y una barrera estructural para estudios más detallados sobre el sector.

En otras palabras, se realizó una revisión bibliográfica sobre la normativa del proceso de coquización en hornos tipo colmena en el departamento de Norte de Santander, en el que se observó los diferentes parámetros operativos y fundamentos técnicos del proceso de coquización como: Es un proceso que se basa en la pirolisis del carbón bituminoso (Díaz, 2002) en hornos colmena tradicionales, cuyas dimensiones están entre 2,5 m y 4 m de diámetro y hasta 1,8 m de altura. Por lo que pueden procesar entre 3.5 y 4 toneladas de carbón por ciclo entre 48 y/o 72 horas de operación dependiendo del tipo de material (Vera et al., 2023). No obstante, durante este

proceso cerca del 35 % de la materia prima se transforma en volátiles ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ) y se genera un poder calorífico de 20 000 – 25 000 kJ/m<sup>3</sup> que frecuentemente se desechan sin recuperación energética alguna, lo cual lo convierte en un proceso energéticamente poco eficiente que se divide en 5 etapas bien definidas:

Preparación y carga de carbón.

Encendido y pirolisis progresiva.

Sellado y combustión parcial de volátiles (generando calor interno).

Enfriamiento y apagado (a menudo con agua).

Descarga del coque incandescente mediante deshornadoras.

Por consiguiente, la eficiencia térmica y las pérdidas operacionales del horno colmena se encuentran entre el 50 y 60 % del contenido energético del carbón cuyo volumen significativo se pierde como volátiles. Además, el frente térmico tiene una velocidad de avance entre 1 y 1,5 cm/h debido a la carencia de ventilación forzada o ductos internos que optimicen la transferencia de calor. Por lo que, las emisiones atmosféricas y los riesgos ambientales aumentan al carecer de sistemas de captura, ya que estos hornos liberan al aire material particulado (PM), óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y compuestos orgánicos volátiles (los cuales en algunas empresas superan los límites legales). Por ende, los sistemas de monitoreo continuo, cámaras de muestreo isocinéticas y herramientas predictivas son importantes para mantener un proceso controlado y eficiente como lo indica (Ramos & Benítez, 2012).

No obstante, a pesar de estas condiciones el departamento de Norte de Santander es reconocido como un productor destacado en este ámbito, con una exportación de más de 2,4 Millones de toneladas (coque, semicoque, metalúrgico y térmico) que han llegado a más de 25

países (Asocarbonor, s.f.). Debido a que el carbón metalúrgico local es altamente valorado para procesos siderúrgicos (PAÍS MINERO, 2022).

Sin embargo, dado a la volatilidad de este mercado se presentó una crisis a finales del 2023 y principios de 2024, por lo que entre el 50 % y el 90 % de los hornos colmena debieron ser apagados debido a la caída de precios y la presión atmosférica de la contaminación producida por las malas prácticas de algunos empresarios de la región y su desconocimiento de la normativa ambiental, el marco regulatorio colombiano, sus normas, leyes y resoluciones como:

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) a través de la resolución 909 de 2008 en la que se establece normas y estándares de emisión para fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. Ya que, de acuerdo al diario Oficial No. 47.030, esta Resolución 909 de 2008 (MADS) indica que los límites para fuentes fijas deben ser: MP 50 mg/m<sup>3</sup>, SO<sub>2</sub> 500 mg/m<sup>3</sup>, NO<sub>x</sub> 550 mg/m<sup>3</sup>, con monitoreo obligado (MAVDT, 2008).

Así mismo, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). (2010) a través de la Resolución 1309 de 2010 modifica parcialmente la Resolución 909 de 2008. Diario Oficial No. 47.743 mediante el Parágrafo Resolución 1309/2010 que permite elevar NO<sub>x</sub> a 800 mg/m<sup>3</sup> si MP < 30 mg/m<sup>3</sup> (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), 2010).

Por otra parte, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). (2003) a través de la Resolución 447 de 2003 establecen los requisitos y procedimientos para el uso de combustibles sólidos e industriales en fuentes fijas como criterios ambientales para combustibles sólidos e industriales, incluyendo carbón y coque (MAVDT), 2003)

Además, el Congreso de la República de Colombia. (1993) a través de la Ley 99 de 1993 mediante la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente y se reordena el sector público

encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, organiza el Sistema Nacional Ambiental –SINA– y se dictan otras disposiciones a través del diario Oficial No. 41.146 la ley 99/1993 y la ley 685/2001 que exige licenciamiento, gestión de residuos, formalización minera y protección de recursos hídricos (Congreso de la República de Colombia, 1993).

Adicionalmente, es importante tener presente que el diagnóstico integrado que se requiere para evaluar el óptimo desarrollo de la operación se basa en 6 puntos clave:

**Técnico.** el horno colmena sigue siendo el predominante dadas sus bajas barreras de entrada, pero es poco eficiente y muy contaminante.

**Ambiental.** las emisiones derivadas son considerables y no se controlan, además existen impactos en calidad del aire y riesgos de salud.

**Normativo.** el marco legal es robusto, pero no se asegura su cumplimiento real ya que predomina una fuerte carencia de monitoreo y sanciones efectivas.

**Económico-social.** existe dependencia del entorno político y del mercado internacional; sin embargo, la crisis genera inestabilidad para trabajadores y familias.

**Innovación.** la región de Norte de Santander ha demostrado una fuerte capacidad técnica para adoptar tecnologías más limpias, pero necesita acompañamiento financiero y regulatorio y un mayor enfoque en investigación y desarrollo.

**Institucional.** ya hay una aproximación colaborativa, aunque es incipiente y requiere fortalecerse para lograr impacto real.

Sin embargo, aunque existen diversos inconvenientes ambientales y comerciales, la persistencia de la coquización artesanal en Norte de Santander en teoría se debe a la calidad excepcional de la materia prima y las ventajas competitivas que tiene esta región, como sus

reservas de más de 105 millones de toneladas de carbón con un 19 % de carbón coquizable, su bajo contenido de fósforo, humedad y cenizas. Lo cual lo hace un producto exclusivo que posiciona a la región como uno de los principales productores a nivel mundial (Asocarbonor, 2022) y que únicamente se compara con algunas regiones de China, tal como lo indica (Oliveros, 2024).

Por eso, aunque existen otros factores externos como el dinamismo del mercado internacional y las diferentes coyunturas presentes en el periodo 2022–2023 en donde se presentaron desacuerdos geopolíticos como la guerra entre Rusia y Ucrania y la recuperación pospandémica. Las exportaciones colombianas de coque lograron ascender a 4,5 millones de toneladas y generaron USD 1700 millones, consolidando al país como el tercer exportador mundial, tal como lo indica el periódico la república en su artículo “Crecimiento de India impulsa exportaciones de coque proveniente de Norte de Santander” (López, 2023).

Por consiguiente, en este periodo el departamento de Norte de Santander duplicó los ingresos del año anterior (Asocarbonor, 2022). En donde aportó cerca del 65 % de las exportaciones para la India (Adicomex, 2023), y además incentivó a los actores locales a continuar con la actividad a pesar de las limitaciones tecnológicas y los problemas ambientales que esto genera.

Este modelo de negocio genera un aporte al PIB departamental e impacto socioeconómico del 6.3% para el departamento de Norte de Santander y aporta hasta el 90 % del valor de sus exportaciones, lo que genera más de 40.000 empleos directos y un número similar de empleos indirectos que brindan sustento a más de 80.000 familias (Asocarbonor, s. f.). Por ende, este sector no solo se constituye como un pilar económico para las zonas vulnerables, sino que también actúa como un motor del desarrollo local al promover el empleo, estimular la demanda

de servicios y fomentar la estabilidad económica mediante la proximidad geográfica y las ventajas logísticas que tiene el departamento al ser frontera con Venezuela y tener rápido acceso a los principales puertos de Colombia como Barranquilla y Cartagena. Además, la presencia de zonas francas y zonas económicas especiales (ZESE/ZOMAC) brindan las condiciones logísticas ideales para reducir los costos de transporte y los tiempos de exportación (Legis Comex, 2022), así como su red de industrias conexas como: cementeras, ladrilleras y plantas industriales que aprovechan los residuos del coque (finos) destinándolos a producción de ladrillos, generación de energía o materiales de construcción (SEMANA, 2023), lo cual crea economías circulares que permiten optimizar los recursos para poder mantener los márgenes de ganancia independientes de la crisis de precios y la competencia internacional. (Oliveros L. F., Sector coque y carbón de Norte de Santander está en crisis por culpa de Indonesia, trabajadores se quedan sin empleo, 2024).

Ahora bien, debido a estos eventos se han creado instrumentos institucionales y fiscales para establecer un Clúster Minero impulsado por la UFPS, la Cámara de Comercio y entidades como Asocarbonor y Asocoquizadores. Cuya inversión prevista fue de COP 4500 millones para cogeneración y COP 3200 millones en economía circular en pro al desarrollo de una alianza que pretende fortalecer las capacidades técnicas y fomenta la innovación a través de incentivos tributarios, exenciones en zonas francas y apoyo a la formalización mediante la Agencia Nacional de Minería en pro de reducir las barreras financieras y legales para los pequeños productores (Oliveros, 2025).

Sin embargo, su dependencia de la mano de obra informal y el uso de turnos extendidos generan trastornos asociados al ruido, estrés, alteración del sueño e hipertensión. Además, la exposición a partículas inhalables (Material Particulado) agrava patologías respiratorias como

bronquitis y asma, especialmente en mujeres y niños que son expuestos al humo que impacta las zonas residenciales cercanas como lo indica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Lo cual sucede porque los hornos tipo colmena carecen de sistemas de control o filtración. Por ende, liberan directamente a la atmósfera material particulado ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ), gases como  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $CO_2$  y compuestos residuales como hidrocarburos, cianuros y azufre. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, 2015) que genera un impacto ambiental al aire, suelo, agua y la biodiversidad (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). Además, el ruido perimetral producto de maquinaria, descargas de coque y actividad manual, altera los patrones de fauna como los grupos de aves que dependen del sonido para cazar, aparearse o comunicarse. Por consiguiente, esto produce una pérdida de la cobertura vegetal, agotamiento del suelo y otros impactos asociados (Francis, 2009)

Por ende, existen diversas normas vigentes para regular el impacto ambiental que genera los procesos industriales, por ejemplo:

Resolución 909/2008 (MADS): exige límites de emisión de MP ( $50 \text{ mg/m}^3$ ),  $SO_2$  ( $500 \text{ mg/m}^3$ ) y  $NO_x$  ( $550 \text{ mg/m}^3$ ), junto con monitoreo continuo (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial., 2008)

Resolución 610/2010: define estándares de calidad de aire ambiente y obliga a las fuentes fijas a cumplir umbrales como  $PM_{10}$  ( $100 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  en 24 h),  $SO_2$  ( $250 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ) y  $NO_2$  ( $150 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ) (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial., 2010)

Ley 99/1993 y Ley 685/2001: establecen los requisitos de licenciamiento ambiental, protección hídrica y manejo de residuos, incluyendo vertimientos y emisiones (Congreso de la República de Colombia. , 1993). No obstante, a pesar de la existencia de este marco normativo riguroso, algunos de los productores de coque operan en situación de informalidad ya que no

cuentan con el capital para adecuar la infraestructura y poder cumplir con los requerimientos ambientales (instalación de chimeneas, filtros, sistemas de monitoreo). Lo que da hincapié a un incumplimiento sistemático y violación de la norma (Pardo, 2016).

Para fortalecer el análisis documental del componente legal, se organiza la información revisada en una matriz de cumplimiento normativo, con el fin de contrastar los principales requisitos ambientales y mineros aplicables al proceso de coquización artesanal frente a las condiciones reportadas en la literatura para el caso de Norte de Santander.

**Tabla 3**

*Matriz de Cumplimiento Normativo*

<b>Norma</b>	<b>Requisito principal</b>	<b>Evidencia reportada en la literatura</b>	<b>Nivel de cumplimiento estimado</b>	<b>Implicación técnica</b>
Resolución 909 de 2008	Límites de emisión para fuentes fijas	La literatura reporta hornos colmena sin sistemas de captura ni control de emisiones	Bajo	Alta probabilidad de incumplimiento ambiental
Resolución 1309 de 2010	Ajustes a criterios de emisión	No se evidencian sistemas técnicos de control que permitan acogerse a Flexibilidades normativas	Bajo	Limitada capacidad de adaptación tecnológica

Ley 99 de 1993	Protección ambiental, gestión de impactos y licenciamiento	Se reportan operaciones artesanales con débil control ambiental	Bajo	Riesgo de sanción y afectación ecosistémica
Ley 685 de 2001	Formalización y legalidad minera	Persisten condiciones de informalidad en parte del sector	Medio-bajo	Dificultad para acceder a financiación y modernización
Normativa SST aplicable	Protección del trabajador y control de riesgos	Se identifican exposición a calor, gases y sobreesfuerzo	Bajo	Alta vulnerabilidad ocupacional

*Nota.* La tabla muestra que el proceso presenta un bajo nivel de cumplimiento normativo

Por lo anterior, algunas entidades como la Universidad Francisco de Paula Santander – UFPS, han sugerido instalar ductos para captación térmica de volátiles, reducción de emisiones y mejoramiento de la eficiencia energética (Vera et al., 2023).

Tomando como referente la empresa “Industrias alfareras” de Boyacá y Sogamoso, en donde se han implementado medidas de monitoreo, acceso a créditos e incentivos ecológicos (CORPOBOYACÁ, 2019). Sin embargo, esto solo ha revelado la falta de acompañamiento para el estudio e implementación de sistemas sostenibles que permitan integrar la asistencia técnica y modelos de financiación a través de líneas de crédito que permitan impulsar la eficiencia energética de este gremio en el departamento de Norte de Santander a través de:

Tecnologías de horno mejorado.

Monitoreo y filtros conforme a la normativa.

Formalización integrada con asistencia técnica y financiera.

Enfoque social participativo que rescate identidades laborales sin perpetuar la informalidad

Sin embargo, para esto se debe armonizar los tres pilares del desarrollo sostenible (económico, social y ambiental).

Dado que, este proceso representa un riesgo de sostenibilidad regional, económica y de generación de valor debido a la huella de carbono que altera el ecosistema regional (Ministerio de Minas y Energía & CORPONOR., 2020) mediante la contaminación del aire, la erosión y la gestión inadecuada del agua que compromete la seguridad hídrica y la biodiversidad regional (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2021). Por consiguiente, también se ve comprometida la cohesión social y las empresas que operan sin licencias ambientales ni títulos mineros solicitados por el congreso de la República de Colombia en la Ley 685 de 2001 (Congreso de la República de Colombia, 2001).

Por ende, estos procesos de control por parte de entidades como Corponor y las mesas técnicas operativas reflejan una carencia de participación comunitaria que evidencia problemas de gobernanza territorial junto con la falta de garantía de seguridad laboral y social y las bajas condiciones de trabajo digno. Lo que crea tensiones sociales y pérdida de confianza institucional entre los actores del gremio coquizador (CORPONOR & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024).

Adicionalmente, la Gobernación y actores como ASOCARBONOR aunque han impulsado la transición energética y técnica en minería artesanal con tecnologías limpias como la autogeneración solar que se realizó en la Mina Bellavista, Sardinata (Gobernación de Norte de Santander & ASOCARBONOR, 2023) y el desarrollo de clústeres productivos con inversiones

en cogeneración y valorización de residuos (Ministerio de Comercio, Industria y Turismo & Innpulsa Colombia, 2022), responden a la necesidad de desarrollar un modelo más responsable y competitivo que esté alineado con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), las prioridades del Plan de Desarrollo Departamental y en pro a fortalecer el talento, la innovación y la infraestructura en energías limpias y minería formal (Gobernación de Norte de Santander, 2020), que permitan lograr una conservación del desarrollo sostenible del gremio coquizador en Norte de Santander junto con los mecanismos de ordenamiento territorial e instrumentos como reservas temporales hídricas y zonificación ecológica (Instituto de Estudios Ambientales – IDEA, 2019)

En otras palabras, el análisis documental realizado permitió evidenciar la situación actual del proceso de coquización en hornos tipo colmena en el departamento de Norte de Santander, destacando aspectos técnicos, ambientales, normativos y socioeconómicos a través de los cuales se identificó que este modelo productivo presenta bajos niveles de eficiencia energética, altos índices de emisiones contaminantes y un alto grado de informalidad. Tanto en el cumplimiento normativo como en la organización laboral. Ya que, a pesar de la existencia de una normativa ambiental robusta como la Resolución 909 de 2008 y la Ley 99 de 199, su implementación en el contexto de la coquización artesanal sigue siendo limitada por factores estructurales como la precariedad tecnológica, la debilidad institucional en el control ambiental y la escasa capacidad de inversión por parte de los pequeños productores.

Sin embargo, el paralelo realizado con otras experiencias nacionales como la del departamento de Boyacá, permite observar referentes de reconversión tecnológica gracias a iniciativas institucionales lideradas por CORPOBOYACÁ y entidades como el SENA que han brindado apoyo técnico, financiamiento público y de cooperación interinstitucional para lograr la articulación de los productores con programas de formalización, mejoramiento ambiental y

comercialización en mercados más exigentes, cuya visión marca como referentes a países como India y China en donde desarrollaron procesos similares para fortalecer sus procesos (International Energy Agency - IEA, 2021).

De esta forma, para lograr este objetivo en Norte de Santander se considera necesario que los diferentes actores propongan alternativas viables de reconversión, las cuales integren criterios técnicos, económicos y ambientales como: El rediseño de procesos térmicos, el uso de materiales refractarios eficientes y la implementación de sistemas de monitoreo de emisiones. Así como el acompañamiento técnico y financiero para poder tener acceso a infraestructura y conocimiento que les permita mejorar sus prácticas sin poner en riesgo su subsistencia económica.

Por consiguiente, para estructurar de manera ordenada el desarrollo de esta investigación, se ha elaborado una tabla que relaciona los objetivos específicos del estudio con las técnicas metodológicas aplicadas, los elementos analizados y los productos esperados. De esta forma, se puede visualizar cada etapa del proceso de revisión documental y el análisis cualitativo que contribuye al cumplimiento de los objetivos de la monografía, asegurando una transición lógica entre la metodología empleada y los resultados obtenidos. Por ende, en la tabla 4.0 se evidencia de manera clara la articulación entre la selección de fuentes, el enfoque analítico y la generación de insumos para la formulación de propuestas técnicas, económicas y socioambientales en el sector de la coquización artesanal en hornos tipo colmena en Norte de Santander.

**Tabla 4**

*Relación entre Objetivos Específicos, Técnicas Metodológicas y Productos de Análisis*

<b>Objetivo específico</b>	<b>Técnica metodológica</b>	<b>Qué se analiza y cómo</b>	<b>Producto</b>

<p>Realizar una revisión bibliográfica y normativa sobre el proceso de coquización artesanal en hornos tipo colmena en Colombia, con énfasis en Norte de Santander.</p>	<p>Revisión de literatura y análisis normativo sistemática</p>	<p>Se analizan artículos científicos, informes técnicos, estadísticas sectoriales y normativa vigente (por ejemplo, la Resolución 909 de 2008 y la Ley 685 de 2001), aplicando criterios de inclusión y exclusión definidos (2018-2025). Se identifican conceptos clave, antecedentes históricos, fundamentos técnicos y brechas regulatorias.</p>	<p>Marco teórico y normativo estructurado con identificación de brechas técnicas y regulatorias</p>
<p>Identificar los factores económicos que han favorecido la permanencia del modelo de hornos colmena en la economía regional.</p>	<p>Análisis documental comparativo</p>	<p>Se comparan variables económicas como costos operativos, productividad por ciclo, eficiencia térmica, volatilidad del precio internacional del coque, participación exportaciones y estructura de costos frente a hornos</p>	<p>Diagnóstico económico sectorial con identificación de factores de competitividad y vulnerabilidad</p>

		industriales. Se analizan informes gremiales y estadísticas sectoriales.	
Analizar los impactos sociales y ambientales asociados al proceso de coquización artesanal en hornos tipo colmena.	Análisis de contenido alternativo y categorización de impactos	Se clasifican impactos en categorías técnicas, ambientales y sociales: emisiones (MP, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ), eficiencia energética, riesgos laborales, informalidad, salud pública y conflictos socioambientales.  Se construye una matriz de impactos que relaciona causa– efecto–nivel de riesgo.	Diagnóstico socioambiental integrado con matriz de impactos

<p>Examinar la relación entre la coquización artesanal y los retos del desarrollo regional sostenible en Norte de Santander.</p>	<p>Análisis y integrador benchmarking conceptual</p>	<p>Se integran los diagnósticos técnico, económico y socioambiental. Se comparan experiencias nacionales (Boyacá) e internacionales (India, China) reconversión tecnológica y formalización. Se evalúa la alineación del modelo colmena con principios de sostenibilidad, competitividad y transición energética.</p>	<p>Discusión estratégica y lineamientos para reconversión tecnológica y fortalecimiento institucional</p>
--	--	---	---

*Nota.* La tabla muestra cómo se organizó el estudio

Con el propósito de orientar técnicamente las alternativas de mejora del sector, se elaboró una matriz multicriterio de priorización, comparando tres escenarios tecnológicos: continuidad del horno colmena tradicional, implementación de un horno colmena mejorado y migración hacia hornos verticales o de solera. La valoración se realizó cualitativamente con base en criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales.

**Tabla 5**

*Criterios Técnicos, Económicos, Ambientales y Sociales*

Criterio	Peso	Horno colmena tradicional	Horno colmena mejorado	Horno vertical / solera
Baja inversión inicial	20%	5	4	2

Eficiencia térmica	20%	2	3	5
Control de emisiones	20%	1	3	5
Facilidad de implementación regional	15%	5	4	2
Cumplimiento normativo	15%	1	3	5
Impacto social / viabilidad de transición	10%	3	4	3
<b>Puntaje total estimado</b>	<b>100%</b>	<b>2.8</b>	<b>3.5</b>	<b>3.8</b>

*Nota.* La tabla muestra que el horno vertical o de solera obtiene el mejor puntaje total

Aunque el horno vertical o de solera presenta el mayor puntaje técnico y ambiental, el horno colmena mejorada aparece como la alternativa más viable en el corto y mediano plazo, debido a su mejor equilibrio entre inversión, facilidad de implementación y posibilidad de transición gradual en el contexto regional.

## Conclusiones

El proceso de coquización artesanal mediante hornos tipo colmena, es una actividad económica predominante en el departamento de Norte de Santander que representa un modelo productivo anacrónico desde el punto de vista de la ingeniería de procesos. Sin embargo, este sistema opera con baja eficiencia térmica, alta dispersión en los parámetros de operación y sin mecanismos efectivos de control de emisiones. Por ende, estas deficiencias no solo limitan la competitividad del producto en el mercado internacional, sino que además perpetúan una lógica productiva informal, ambientalmente insostenible y socialmente precaria. Ya que, desde una perspectiva técnica avanzada, se concluye que la continuidad del modelo actual representa una barrera estructural para la mejora continua y el desarrollo industrial de la región.

El análisis comparativo conceptual con experiencias nacionales (Boyacá) e internacionales (China, India) evidencian que la adopción progresiva de hornos de tecnología intermedia (tipo vertical o de solera) constituye una estrategia de alto impacto para mejorar la eficiencia energética, reducir la huella ambiental y profesionalizar la operación del sector. Ya que estas tecnologías permiten integrar principios de producción más limpia, optimización térmica y trazabilidad del proceso y condiciones esenciales para avanzar hacia la sostenibilidad operacional. Sin embargo, su implementación exitosa requiere más que un rediseño técnico, ya que esta implica una fuerte inversión económica, además de la articulación de políticas públicas diferenciales, financiamiento adaptado a pequeños productores y gestión del cambio organizacional.

La transición del sistema de coquización artesanal hacia un modelo productivo moderno y sostenible no puede asumirse únicamente como un cambio tecnológico, sino como un proceso integral de transformación sistémica, ya que se requiere un fuerte compromiso por parte

de los distintos agentes de cambio. Desde el diseño y optimización de procesos térmicos, como en la gestión eficiente de recursos, la estructuración de cadenas de valor formales y la articulación con los sistemas de regulación y financiamiento. Por ende, cualquier propuesta viable de modernización debe contemplar una intervención estructurada sobre tres ejes: innovación tecnológica apropiada, fortalecimiento institucional y empoderamiento de las capacidades locales de gestión.

El análisis documental comparativo permitió identificar los factores económicos que limitan la competitividad de la coquización artesanal. Por consiguiente, se concluye que los altos costos operativos, la baja productividad y la informalidad en la gestión comercial son barreras clave para la viabilidad económica, lo cual confirma que se requieren medidas integrales de modernización tecnológica y apoyo financiero adaptado a pequeños productores.

Se evidenció que la actividad actual genera emisiones contaminantes significativas, riesgos laborales elevados y condiciones sociales precarias, mientras que la comparación con estándares nacionales e internacionales mostró oportunidades claras de mejora. Lo cual afianza la propuesta de las naciones unidas para integrar tecnologías limpias, capacitación profesional y gestión responsable de los recursos y residuos para reducir la huella de carbono.

## Cronograma

**Tabla 6**

*Cronograma de Actividades*

<b>Mes</b>	<b>Actividades principales</b>	<b>Objetivo de la fase</b>
Mes 1	Realizar una revisión de literatura de fuentes académicas y normativas -Definir el tema y formular el problema Establecer los objetivos y la justificación	Planeación y fundamentación teórica del proyecto
Mes 2	- Analizar el proceso de coquización artesanal - Revisar los antecedentes nacionales e internacionales	Análisis documental y sistematización de información
Mes 3	Redactar el marco teórico, metodología y análisis Elaborar las conclusiones	Redacción y estructuración técnica del documento
Mes 4	Realizar las correcciones finales y ajustes de forma Redactar el resumen, palabras clave y formato APA - Entregar el documento final	Cierre del trabajo y presentación formal del proyecto

*Nota.* La tabla muestra la organización del cronograma del proyecto

### Referencias Bibliográficas

- Adicomex. (febrero de 2023). *Crecimiento de India impulsa exportaciones de coque proveniente de Norte de Santander*. Obtenido de <https://adicomex.org/202302/crecimiento-de-india-impulsa-exportaciones-de-coqueproveniente-de-norte-de-santander/>
- Agencia Nacional de Minería. (s.f.). *Boletín estadístico minero energético: Exportaciones de coque 2022*.
- Agencia Nacional de Minería. (2022). *Informe anual de formalización minera en Colombia*.  
Agencia Nacional de Minería.
- Agencia Nacional de Minería. (2023). Obtenido de Plan de formalización minera en zonas coqueras de Colombia: <https://www.anm.gov.co/publicaciones/plan-formalizacion-coqueras-2023.pdf>
- Agencia Nacional de Minería. (2023). *Boletín estadístico minero energético: Exportaciones de coque 2022*. <https://www.anm.gov.co/documentos/boletin-exportaciones-coque-2023.pdf>
- Alerta Santanderes. (18 de Junio de 2024). Gremio de coquizadores enfrenta pérdidas económicas en Norte de Santander; ¿por qué? . *Alerta Santanderes*.
- Álvarez, J., & Martínez, P. (2023). Análisis de la cadena de valor del coque artesanal en Norte de Santander. *Revista Colombiana de Ingeniería Industrial*.
- Aristizabal, R. H., Rengifo, R. C., & Arjona, S. D. (2018 ). Los oficios de los hornos de colmena en un municipio calero de Colombia: un patrimonio inmaterial en riesgo de desaparición. *Ambiente construido*.
- Asocarbonor. (2022). *Informe de gestión 2022. Asociación de Carboneros de Norte de Santander*.  
Cúcuta: Asociación de Carboneros de Norte de Santander .

- Asocarbonor. (2022). *Informe de gestión 2022. Cúcuta, Colombia: Asociación de Carboneros de Norte de Santander*. Cúcuta: Asociación de Carboneros de Norte de Santander.
- Asocarbonor. (s. f.). *La voz del carbón en Norte de Santander. Cúcuta, Colombia: Asociación de Carboneros de Norte de Santander*. Cúcuta: Asociación de Carboneros de Norte de Santander.
- Asocarbonor. (s.f.). *Asocarbonor*. Asocarbonor: [https://www.asocarbonor.org/la-voz-del-carbon-en-norte-de-santander/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.asocarbonor.org/la-voz-del-carbon-en-norte-de-santander/?utm_source=chatgpt.com)
- Asociación Coquizadores de Norte de Santander. (2024). *Desafíos y compromisos del sector coquicador en la mejora de la calidad del aire en Norte de Santander*.
- Cámara de Comercio de Cúcuta. (2023). *Impacto socioeconómico del sector carbonífero en Norte de Santander*. Cámara de Comercio de Cúcuta.
- Cámara de Comercio de Cúcuta. (2023). *Impacto socioeconómico del sector carbonífero en Norte de Santander*. . Cámara de Comercio de Cúcuta.
- Camargo, L., & Díaz, R. (2023). Tendencias globales del mercado del coque metalúrgico y perspectivas para Colombia. *Revista Latinoamericana de Minería y Metalurgia*, 43– 61.
- Cárdenas, A., & López, V. (2021). Economía regional y sostenibilidad: análisis del sector coquero artesanal en Norte de Santander. *Revista de Estudios Regionales*, 41-60.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2021). *Minería y sostenibilidad en América Latina: retos para la pequeña minería*. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47291/1/S2100460\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47291/1/S2100460_es.pdf)
- Congreso de la República de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional*

*Ambiental (SINA) y se dictan.* Bogotá, D.C., Colombia: Congreso de la República de Colombia.

Congreso de la República de Colombia. (2001). *Ley 685 de 2001, por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones.* Bogotá, D.C., Colombia: Congreso de la República de Colombia.

Congreso de la República de Colombia. (2001). *Ley 685 de 2001, por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones.* Bogotá: Diario Oficial No. 44.545.

Congreso de la República de Colombia. . (1993). *Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, y se establece el Sistema Nacional Ambiental – SINA.* Bogotá, D.C: Diario Oficial No. 41.146.

Congreso de la República de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993: Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental –SINA– y se dictan.* Bogotá, D.C: Diario Oficial No. 41.146.

Corporación Autónoma Regional de Boyacá – CORPOBOYACÁ. (2019). *Informe de gestión ambiental: avances en reconversión tecnológica y sostenibilidad en el sector alfarero de Boyacá.* Tunja, Colombia: CORPOBOYACÁ.

Corporación Autónoma Regional de Boyacá – CORPOBOYACÁ. (2019). *Informe de gestión ambiental: avances en reconversión tecnológica y sostenibilidad en el sector alfarero de Boyacá.* CORPOBOYACÁ.

Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental – CORPONOR & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). *Informe técnico sobre el control ambiental de*

- la coquización artesanal en Norte de Santander: balance institucional y retos de gobernanza*. Cúcuta: CORPONOR & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Cortés, D., & Rincón, A. (2020). Producción artesanal de coque en Colombia: historia, prácticas y retos. *Revista Colombiana de Energía*, 112-130.
- Departamento Nacional de Planeación – DNP & Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental – CORPONOR. (2021). *Plan estratégico para la diversificación económica sostenible en zonas de producción de coque en Norte de Santander*. Cúcuta: CORPONOR.
- Departamento Nacional de Planeación. (2023). *Caracterización económica de Norte de Santander con énfasis en minería artesanal*. Obtenido de <https://www.dnp.gov.co/documentos/economia-norte-santander-mineria-artesanal-2023.pdf>
- Díaz, J. (2002). *Manual técnico de procesos de coquización artesanal*. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas).
- Díaz, L., & Barrera, S. (2022). Formalización y desarrollo local: un estudio de caso del sector coquero en El Zulia. *Revista Economía y Territorio*, 89–104.
- Díaz, M., & Ríos, J. (2022). Cadenas productivas y economía regional: el caso del coque colombiano. *Revista de Economía Regional*, 115–138.
- Díaz, M., & Salazar, L. (2023). Avances y desafíos en la formalización del sector coquero artesanal colombiano. *Revista Colombiana de Política Pública*, 63–82.
- Francis, C. D. (2009). Noise pollution changes avian communities and species interactions. *Current Biology*. *Current Biology*, 1415–1419.
- García, J., & Martínez, C. (2022). Condiciones laborales en la producción artesanal de coque: estudio de caso en Norte de Santander. *Revista Salud y Trabajo*, 33-49.

- García, M. &. (2018). *Tradiciones del carbón: saberes y oficios del coque artesanal en Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- García, M., & Mendoza, F. (2021). El legado de los hornos colmena en Norte de Santander: una perspectiva histórica y técnica. *Revista Historia y Territorio*, 55-78.
- Gobernación de Norte de Santander & Asociación de Carboneros de Norte de Santander – ASOCARBONOR. (2023). *Informe de buenas prácticas y transición energética en minería artesanal: Caso Mina Bellavista – Sardinata*. Cúcuta: ASOCARBONOR.
- Gobernación de Norte de Santander. (2020). *Plan de Desarrollo Departamental 2020– 2023: Más oportunidades para todos*. Cúcuta.
- Gómez, C., & Salazar, L. (2022). Evaluación térmica y ambiental de los hornos colmena en la producción de coque artesanal. *Revista Ingeniería y Energía*, 47-62.
- Gómez, C., & Salazar, L. (2022). Evaluación térmica y ambiental de los hornos colmena en la producción de coque artesanal. *Revista Ingeniería y Energía*, 47–62.
- Gómez, S., & Ordoñez, A. (2022). Producción sustentable de coque: desafíos y estrategias en contextos artesanales. *Revista de Sostenibilidad Minero-Energética*, 101–117.
- González, A., & Pabón, F. (2021). Evaluación energética de hornos tipo colmena en el norte de Colombia. *Revista de Energía y Combustión*, 41-55.
- González, J., & Méndez, H. (2022). Evaluación de emisiones atmosféricas en hornos colmena del oriente colombiano. *Revista Colombiana de Ingeniería Ambiental*, 55- 72.
- Gutiérrez, L., & Pérez, M. (2021). Evaluación de emisiones en procesos artesanales de coquización en Colombia. *Revista de Ingeniería Ambiental*, 32-47.
- Instituto de Estudios Ambientales – IDEA. (2019). *Ordenamiento ambiental del territorio y sostenibilidad minera en regiones de frontera*. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2015). *Informe del estado del medio ambiente y perspectivas 2014-2015*. Bogotá: IDEAM. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. (2021). *Estrategias de conservación de los páramos de Colombia: caso Santurbán*. Bogotá: Editorial Instituto Humboldt.
- International Energy Agency (IEA). (2021). *Energy Efficiency and Cleaner Production in Coke Making: Global Practices and Case Studies*. Paris, France: IEA. International Energy Agency (IEA).
- La Opinión. (25 de Octubre de 2025). Sector coque y carbón de Norte de Santander está en crisis por culpa de Indonesia. *La Opinión*.
- LegisComex. (2022). *Oportunidades comerciales para las regiones de Colombia con la UE: Norte de Santander*. LegisComex.
- Lizarazo, A., & Ramírez, D. (2022). Diagnóstico técnico de hornos colmena en procesos de coquización artesanal. *Ingeniería y Región*.
- López, E. E. (6 de febrero de 2023). Crecimiento de India impulsa exportaciones de coque proveniente de Norte de Santander. *LA REPÚBLICA*.
- Maldonado, J. (2022). Propiedades físico-químicas del coque metalúrgico en procesos artesanales y su impacto industrial. *Revista Técnica Minera*, 9-20.
- Martínez, P. R., & Pérez, A. (2023). Contaminación del aire y efectos en la salud por la producción artesanal de coque. *Revista Salud y Medio Ambiente*, 31–47.
- Mendoza, R., & Rueda, J. (2023). Tecnologías limpias para la producción de coque: desafíos y oportunidades en Colombia. *Revista Minería Sostenible*, 85–103.

- Ministerio de Ambiente. (2008). *Resolución 909 de 2008: Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión para fuentes fijas*. Ministerio de Ambiente.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Lineamientos para el manejo ambiental de hornos de coquización artesanal en Colombia*. Bogotá, D.C: MinAmbiente.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Lineamientos para el manejo ambiental de hornos de coquización artesanal en Colombia*. Bogotá, D.C.: MinAmbiente.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución 2254 de 2017: Norma de emisiones para fuentes fijas*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-2254-de-2017.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución 2254: Norma de emisiones para fuentes fijas*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-2254-de-2017.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Lineamientos para la formalización ambiental de actividades productivas en ecosistemas estratégicos*. Bogotá.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). *Actualización normativa ambiental para procesos térmicos industriales en Colombia*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). *Normativa ambiental para la producción artesanal de coque*. Obtenido de Normativa ambiental para la producción artesanal de coque.: <https://www.minambiente.gov.co/normativa-coquera-2023>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). (2003). *Resolución 447 de 2003: Por la cual se establecen los requisitos y procedimientos para el uso de combustibles sólidos e industriales en fuentes fijas*. Bogotá, D.C.: Diario Oficial No. 45.203.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). (2008). *Resolución 909 de 2008: Por la cual se establecen normas y estándares de emisión para fuentes fijas y se dictan otras disposiciones*. Bogotá: Diario Oficial No. 47.030.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). (2010). *Resolución 1309 de 2010: Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 909 de 2008*. Bogotá: Diario Oficial No. 47.743.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). *Resolución 909 de 2008 por la cual se establecen los niveles permisibles de emisión de contaminantes al aire para fuentes fijas y se dictan otras disposiciones*. . Diario Oficial No. 47.027.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). *Resolución 909 de 2008, por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones*.

Bogotá, D.C., Colombia: inisterio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Resolución 1309 de 2010, por la cual se modifica la Resolución 909 de 2008*. Bogotá, D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). *Resolución 909 de 2008 por la cual se establece el régimen de emisiones atmosféricas para fuentes fijas y se dictan otras disposiciones*. Bogotá, D.C: Diario Oficial No. 47.042.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Resolución 610 de 2010, por la cual se establecen las normas de calidad del aire o niveles de inmisión y se dictan otras disposiciones*. Bogotá, D.C.: Diario Oficial No. 47.678.

- Ministerio de Ambiente. (2008). *Resolución 909 de 2008: Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión para fuentes fijas*. Ministerio de Ambiente.
- Ministerio de Comercio, Industria y Turismo & Innpulsa Colombia. (2022). *Estrategia de desarrollo de clústeres productivos sostenibles en Colombia: Avances y casos de éxito regional*. Bogotá.
- Ministerio de Minas y Energía & Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental – CORPONOR. (2020). *Diagnóstico de la cadena productiva del coque en Norte de Santander: perspectivas para el desarrollo sostenible regional*. Cúcuta: CORPONOR.
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Lineamientos estratégicos para la reconversión tecnológica del sector coquero artesanal*. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/documentos/lineamientos-coqueros-2023.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Plan Nacional de Reconversión Tecnológica para la Producción de Coque*. Obtenido de Plan Nacional de Reconversión Tecnológica para la Producción de Coque. <https://www.minenergia.gov.co/documentos/reconversion-coquera-2023.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2023). *Política integral para el fortalecimiento del sector coquero artesanal en Colombia*. Obtenido de Política integral para el fortalecimiento del sector coquero artesanal en Colombia.: <https://www.minenergia.gov.co/documentos/politica-coquera-2023.pdf>
- Ministerio de Trabajo. (2023). *Informe sobre condiciones laborales en la minería artesanal de Norte de Santander*. Obtenido de <https://www.mintrabajo.gov.co/documentos/informe-mineria-artesanal-2023.pdf>

- Moreno, G., & Flórez, K. (2023). Responsabilidad social en empresas de producción de coque artesanal: caso Norte de Santander. *Revista Gestión y Sociedad*, 112-130.
- Nieto, J., & Cáceres, M. (2022). Empleo informal y condiciones sociales en la producción artesanal de coque. *Revista Trabajo y Región*, 67-83.
- Observatorio de Desarrollo Regional de Norte de Santander. (2023). *Impacto económico del carbón y el coque en la economía departamental*. Obtenido de Impacto económico del carbón y el coque en la economía departamental.: <https://www.odr-nortesantander.gov.co/informes/economia-coquera-2023.pdf>
- Oliveros, L. F. (2024). Norte de Santander tiene un ‘tesoro’ que solo hay en China y hace competitivo a Colombia. *La Opinión*.
- Oliveros, L. F. (25 de Octubre de 2024). Sector coque y carbón de Norte de Santander está en crisis por culpa de Indonesia, trabajadores se quedan sin empleo. *LA OPINIÓN*.
- Oliveros, L. F. (25 de octubre de 2024). Sector coque y carbón de Norte de Santander está en crisis por culpa de Indonesia, trabajadores se quedan sin empleo. *La Opinión*,.
- Oliveros, L. F. (14 de Marzo de 2025). Desarrollo de instrumentos institucionales y fiscales. *LA OPINIÓN*.
- Organización Internacional del Trabajo. (2023). *Trabajo decente y minería artesanal en Colombia: informe nacional*. Obtenido de [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---americas/documents/publication/wcms\\_870145.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---americas/documents/publication/wcms_870145.pdf)
- Organización Internacional del Trabajo. (2023). *Trabajo decente en la minería artesanal: estudio de caso en Colombia*. [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---americas/---ro-lima/documents/publication/wcms\\_869843.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---americas/---ro-lima/documents/publication/wcms_869843.pdf)

- PAÍS MINERO. (15 de Febrero de 2022 ). *PAÍS MINERO*. Obtenido de PAÍS MINERO:  
[https://www.paisminero.co/mineria/carbon-colombiano/24445-en-norte-de-santander-se-produce-carbon-metalurgico-con-calidades-unicas-2?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.paisminero.co/mineria/carbon-colombiano/24445-en-norte-de-santander-se-produce-carbon-metalurgico-con-calidades-unicas-2?utm_source=chatgpt.com)
- Pardo, M. &. (2016). Desafíos de la regulación ambiental para sectores productivos informales en Colombia: el caso de la coquización artesanal. *Revista de Derecho Ambiental*, 73–92.
- Pérez, H., & León, J. (2023). Conflictos socioambientales en la industria del coque artesanal en Colombia. *Revista Territorio y Desarrollo Sostenible*, 22–40.
- Pérez, L., & Jiménez, H. (2020). *Principios de coquización y parámetros de calidad del coque metalúrgico*. Bogotá: Editorial Académica Colombiana.
- Pineda, R., & Vargas, S. (2023). Minería artesanal y desarrollo sostenible en regiones fronterizas: retos y oportunidades. *Revista de Estudios Territoriales*, 59-76.
- ProColombia. (2023). *Informe anual sobre exportaciones de carbón y coque colombiano*.  
<https://www.procolombia.co/sites/default/files/informes/exportaciones-coque-2023.pdf>
- ProColombia. (2023). *Oportunidades y retos de la exportación de coque colombiano artesanal*. Obtenido de Oportunidades y retos de la exportación de coque colombiano artesanal.:  
<https://www.procolombia.co/documentos/exportacion-coque-2023>.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2022). *Impacto ambiental de la minería artesanal en América Latina: desafíos para una transición ecológica*. Obtenido de <https://www.unep.org/es/resources/impacto-mineria-artesanal>
- Ramírez, D. V., & León, E. (2021). Comparación de eficiencia energética entre hornos industriales y hornos colmena. *Revista Colombiana de Termodinámica*, 32–49.
- Ramírez, F., & Carrillo, S. (2023). *Minería y territorio en el nororiente colombiano: desafíos para la sostenibilidad*. Universidad Nacional de Colombia.

- Ramos, A., & Benítez, D. (2012). Modelamiento de material particulado emitido por coquización en el municipio de Samacá, Boyacá. *Logos, Ciencia & Tecnología*, 159–169.
- República de Colombia. (2001). *Código de Minas - Ley 685 de 2001*.  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4560>
- República de Colombia. (s.f.). *Código de Minas - Ley 685 de 2001*.  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4560>
- Resolución 909 de 2008. (2008). *Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). Resolución 909 de 2008, por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial No. 47.017.
- Restrepo, C., & Ospina, J. (2022). Transformaciones térmicas del carbón mineral en procesos de coquización artesanal. *Revista Colombiana de Materiales*, 23-36.
- Restrepo, D., & Herrera, C. (2022). Análisis de la pirolisis del carbón en sistemas artesanales de coquización. *Revista de Ingeniería Química y Energía*, 74–88.
- Rincón, D., & Téllez, H. (2022). Análisis de la cadena de valor del sector coquero artesanal en Colombia. *Revista de Economía Minera*, 77-95.
- Rodríguez, A., & Molina, V. (2023). *Estrategias de competitividad para el coque artesanal colombiano en el contexto internacional*. *Revista de Economía y Desarrollo Regional*.
- Rueda, J., & Fajardo, M. (2021). Análisis de los efectos ambientales de la coquización artesanal en Norte de Santander. *Revista Desarrollo Sostenible*, 74–89. .
- Ruiz, D., & Delgado, E. (2022). Efectos sociales del sector coquero en zonas de frontera: el caso de Tibú y El Zulia. *Revista Sociedad y Desarrollo*, 45-61.

Ruiz, P., & Quintero, J. (2022). Evaluación del impacto ambiental de la coquización artesanal en el nororiente colombiano. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 91– 109.

Sánchez, M., & Torres, J. (2022). Condiciones laborales y salud ocupacional en procesos artesanales de coquización. *Revista Salud y Trabajo. Revista Salud y Trabajo*, 88– 103.

SEMANA. (3 de octubre de 2023). ¿Qué hace que el carbón que produce Norte de Santander sea tan atractivo para el mundo? *SEMANA*.

Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. (2022). *Informe anual del sector carbón*. UPME.

Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2022). *Informe anual de carbón 2022*. UPME.

Unidad de Planeación Minero Energética [UPME]. (2022). *Informe anual de carbón 2022*. UPME.

Unidad de Planeación Minero Energética UPME. (2023). *Caracterización del carbón colombiano para fines energéticos e industriales*. Unidad de Planeación Minero Energética  
UPME.

Vera Duarte, L. E., Briceño Guerrero, M. A., & Mendoza Pérez, L. D. (2023). *Propuesta de mejoramiento del proceso de coquización en hornos colmena para reducir el impacto ambiental en el municipio de El Zulia, Norte de Santander*. Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander. .

Vera Duarte, L. E., Briceño Guerrero, M. A., & Mendoza Pérez, L. D. (2023). *Propuesta de mejoramiento del proceso de coquización en hornos colmena y recomendaciones para una*

*trituration eficiente del coque.* San José de Cúcuta: universidad francisco de paula santander.

Vera Duarte, L. E., Briceño Guerrero, M. A., & Mendoza Pérez, L. D. (2023). *Propuesta de mejoramiento del proceso de coquización en hornos colmena y recomendaciones para una trituration eficiente del coque.* San José de Cúcuta: Universidad Francisco de Paula Santander.