

USO DEL AGUA EN EL PROCESO DE COQUIZACIÓN

JULIAN CAMILO ROBLES REYES

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA

2026

USO DEL AGUA EN EL PROCESO DE COQUIZACIÓN

JULIAN CAMILO ROBLES REYES

Monografía para obtener el título de Ingeniero Civil

Directoras:

Mónica Helena Rodríguez Mesa
Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental

Diana María Beltrán Beltrán
Magister en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA

2026

AGRADECIMIENTOS

Esta monografía no es solo el resultado de horas de estudio, investigación y esfuerzo; es también un reflejo del amor profundo que siento por ustedes. Cada página escrita, cada idea desarrollada y cada obstáculo superado lleva impreso el pensamiento constante de sus sonrisas, de sus abrazos y de la fuerza que me inspiran cada día para seguir adelante. Este trabajo nace no solo de una exigencia académica, sino de una convicción personal: demostrar que el conocimiento tiene un propósito más grande cuando está guiado por el amor y el deseo de dejar una huella significativa en quienes más amamos.

Ana Victoria, hija mía, tu dulzura, tu sensibilidad y tu capacidad de ver el mundo con ojos llenos de esperanza me han enseñado que el conocimiento no solo se adquiere con libros, sino también con el corazón. Tu curiosidad infinita y tus preguntas sinceras me recuerdan la importancia de nunca dejar de aprender. Eres luz, eres fortaleza y eres un motivo constante para esforzarme por ser mejor. Cada logro que alcanzo lo imagino como un ejemplo para ti, para que siempre creas en tus capacidades y persigas tus sueños sin miedo. Por ti comprendo que educarse también es aprender a ser humano, a sentir y a construir un mundo mejor desde la empatía.

Isaac, hijo mío, tu energía, tu valentía y tu espíritu decidido me inspiran a no rendirme ante las dificultades. En cada desafío que enfrento pienso en la determinación con la que tú afrontas el mundo. Tu alegría contagiosa y tu confianza me recuerdan que los límites muchas veces solo existen en nuestra mente. Deseo que al crecer encuentres en estas palabras el testimonio de que con dedicación, disciplina y fe en uno mismo se pueden alcanzar grandes metas. En ti encuentro la razón para seguir luchando incluso en los momentos más difíciles, recordando que el esfuerzo siempre vale la pena cuando hay un propósito claro.

A ambos quiero decirles que este trabajo representa también el sacrificio de momentos compartidos, de tiempo que quizá no pude dedicarles como hubiera querido mientras me encontraba concentrado en esta meta. Sin embargo, todo esfuerzo ha tenido como propósito construir un mejor futuro para ustedes, demostrarles que la perseverancia tiene frutos y que la educación es una herramienta poderosa que abre caminos y transforma vidas. Esta monografía es, en esencia, una justificación de cada ausencia y de cada desvelo, porque detrás de ellos existe un amor inmenso que busca brindarles oportunidades, estabilidad y un ejemplo de compromiso.

Ustedes son mi mayor orgullo, mi motivación constante y la razón principal por la que busco superarme cada día. Si algún día leen esta dedicatoria, quiero que sepan

que cada paso que doy está guiado por el amor inmenso que siento por ustedes. Que esta monografía sea también un símbolo de que los sueños se alcanzan con constancia, paciencia y determinación, y que cada esfuerzo tiene sentido cuando está orientado a construir un legado de valores, aprendizaje y amor.

Gracias, Ana Victoria e Isaac, por ser mi inspiración, por llenar mi vida de sentido y por enseñarme que el verdadero éxito no se mide en páginas escritas ni en títulos obtenidos, sino en el amor que compartimos y en el ejemplo que dejamos.

Con todo mi amor, hoy y siempre.

DEDICATORIA

A mí mismo:

Hoy quiero dedicarme estas palabras como reconocimiento al esfuerzo, la constancia y la determinación que me permitieron alcanzar una meta que en muchos momentos pareció difícil: culminar mi carrera universitaria mientras trabajaba. No fue un camino sencillo. Hubo días largos, noches de desvelo, cansancio acumulado y momentos de duda. Sin embargo, nunca dejé que el agotamiento fuera más fuerte que mi propósito. Esta dedicatoria surge como una forma justa de valorar el proceso vivido, porque cada sacrificio realizado tuvo un sentido profundo: crecer, avanzar y demostrarme que era capaz de superar mis propios límites.

Me dedico este logro por haber demostrado disciplina cuando las fuerzas parecían faltar, por haber organizado mi tiempo con responsabilidad y por haber mantenido la mirada fija en el objetivo. Trabajar y estudiar al mismo tiempo exigió sacrificios, renunciaciones y una gran fortaleza mental, pero también me enseñó el valor del compromiso, la perseverancia y la resiliencia. Esta experiencia justifica cada esfuerzo invertido, ya que no solo me permitió alcanzar una meta académica, sino también fortalecer mi carácter y prepararme para enfrentar retos futuros con mayor seguridad.

Reconozco mi capacidad para superar obstáculos y adaptarme a las circunstancias sin rendirme. Cada examen aprobado y cada meta cumplida son prueba de mi esfuerzo y mi convicción de que los sueños se construyen con acciones diarias. En este sentido, este logro no es producto de la casualidad, sino el resultado de decisiones conscientes, de la disciplina constante y de la capacidad de mantenerme firme incluso en los momentos más difíciles.

Esta dedicatoria es un recordatorio de que soy capaz de lograr lo que me proponga, siempre que mantenga la disciplina, la fe en mí mismo y el deseo constante de superación. También es una justificación de todo lo que invertí en este camino: tiempo, energía y compromiso, los cuales hoy se ven reflejados en un resultado que trasciende lo académico y se convierte en un triunfo personal.

Nota de aceptación:

Aprobado Daniel Beltrán

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, 28 de Mayo de 2026

CONTENIDO

Contenido

DEDICATORIA	5
ABSTRACT	10
RESUMEN	11
INTRODUCCIÓN	12
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	13
1.1 Descripción de la problemática	13
1.2 Pregunta de investigación.	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo general.	16
2.2 Objetivos específicos.	16
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Carbón	17
4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	20
4.2 Proceso de coquización.	23
5. EQUIPOS USADOS EN EL PROCESO DE COQUIZACION	26
5.1 Tecnologías de reúso para el tratamiento de efluentes residuales.	26
6. MARCO NORMATIVO PARA LOS EFLUENTES RESIDUALES.	28
7. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	35
8. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL PROCESO DE COQUIZACIÓN	39
8.1 Marco regulatorio.	41
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	43
10. GLOSARIO	46
11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación del carbón según la norma ASTM D388.	19
Tabla 2. Impactos ambientales del proceso de coquización.	28
Tabla 3. Marco normativo internacional.	28
Tabla 4. Límite de concentración de elementos contaminantes en la regulación internacional.	29
Tabla 5. Regulaciones vigentes en China, India, Brasil y México.	30
Tabla 6. Marco normativo en Colombia.	31
Tabla 7. Límites Máximos Permisible (LMP).	32
Tabla 8. Criterios de inclusión.	20
Tabla 9. concentraciones de compuestos contaminantes en aguas residuales sin tratar.	35

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Evolución del carbón.....	18
Figura 2. Mapa de colombia y departamentos que exportan coque.	23
Figura 3. Exportaciones colombianas de coque en millones de toneladas.....	23
Figura 4. Proceso de coquizacion plano general	24
Figura 5. Proceso de coquizacion plano detallado	24
Figura 6. Contaminación de los efluentes.....	26
Figura 7 Planta de lavado de carbón.....	27
Figura 8 Enfriamiento en húmedo.....	38
Figura 9 Enfriamiento en seco.....	39
Figura10 Situaciones de empresas mineras en Boyacá.....	41

ABSTRACT

The coking process, while fundamental to the industry, involves a fairly intensive use of water at various stages. This resource is essential for activities such as coal washing, coke and gas cooling, and the cooling of auxiliary equipment. In this sense, water is not just another input, but a key element for the entire system to function correctly. However, this high consumption also prompts reflection on how it is being used, especially in a context where the efficient management of natural resources is increasingly important.

From this dependence on water arises another situation that cannot be overlooked: the generation of effluents with a considerable pollutant load. These include organic compounds such as phenols and polycyclic aromatic hydrocarbons, as well as toxic inorganic substances such as cyanides and ammonia, in addition to suspended solids. If these wastes are not treated properly, they can generate significant negative impacts on the environment, affecting water sources and nearby ecosystems. Therefore, the management of these effluents becomes a critical aspect of the process.

In this context, this thesis, developed as a monograph, is presented as a response to this problem. Its main objective is to identify technical optimization strategies that reduce water consumption and minimize pollution associated with the effluents from the coking process. To achieve this, a detailed analysis will be carried out based on scientific literature and specialized databases, in order to understand the current state of the processes and identify real opportunities for improvement.

Finally, the work aims to propose concrete solutions that integrate the use of advanced technologies, the optimization of operating parameters, and the implementation of efficient water treatment and recirculation systems. The expected result is a compilation of technical recommendations that contribute to balancing process productivity, compliance with environmental regulations, and economic sustainability. In this way, it seeks to contribute to a more responsible industry, aware of the impact it generates on its environment.

Keywords: Coal, coke, sustainability, water.

RESUMEN

El proceso de coquización, aunque es fundamental para la industria, implica un uso bastante intensivo del agua en distintas etapas. Este recurso es indispensable para actividades como el lavado del carbón, el enfriamiento del coque y de los gases generados, así como en la refrigeración de equipos auxiliares. En ese sentido, el agua no solo es un insumo más, sino un elemento clave para que todo el sistema funcione correctamente. Sin embargo, este alto consumo también invita a reflexionar sobre la forma en que se está utilizando, especialmente en un contexto donde la gestión eficiente de los recursos naturales es cada vez más importante.

A partir de esta dependencia del agua, surge otra situación que no se puede pasar por alto: la generación de efluentes con una carga considerable de contaminantes. Entre ellos se encuentran compuestos orgánicos como fenoles e hidrocarburos aromáticos policíclicos, así como sustancias inorgánicas tóxicas como cianuros y amoníaco, además de sólidos en suspensión. Estos residuos, si no son tratados adecuadamente, pueden generar impactos negativos significativos en el medio ambiente, afectando fuentes hídricas y ecosistemas cercanos. Por ello, el manejo de estos efluentes se convierte en un aspecto crítico dentro del proceso.

En este contexto, el presente trabajo de grado, desarrollado bajo la modalidad de monografía, se plantea como una respuesta a esta problemática. Su objetivo principal es identificar estrategias de optimización técnica que permitan reducir el consumo de agua y minimizar la contaminación asociada a los efluentes del proceso de coquización. Para lograrlo, se llevará a cabo un análisis detallado basado en literatura científica y bases de datos especializadas, con el fin de comprender el estado actual de los procesos y detectar oportunidades reales de mejora.

Finalmente, el trabajo se orienta a proponer soluciones concretas que integren el uso de tecnologías avanzadas, la optimización de parámetros operativos y la implementación de sistemas eficientes de tratamiento y recirculación de agua. El resultado esperado es una recopilación de recomendaciones técnicas que contribuyan a equilibrar la productividad del proceso, el cumplimiento de la normativa ambiental y la sostenibilidad económica. De esta manera, se busca aportar a una industria más responsable y consciente del impacto que genera sobre su entorno.

Palabras clave: Carbón, coque, sostenibilidad, agua.

INTRODUCCIÓN

El agua es, sin duda, uno de los recursos más valiosos que tenemos, y aquí en Colombia eso se siente aún más. No solo sostiene la vida y los ecosistemas, sino que también es la base para que funcionen muchas actividades económicas e industriales. Aunque a nivel mundial solo el 2.5% del agua es apta para el consumo humano, en nuestro país contamos con una gran riqueza hídrica, cercana a los 46.000 m³ por persona. Pero no todo es color de rosa: la distribución del agua no es equitativa, hay cuencas cada vez más contaminadas y, siendo sinceros, todavía falta mucho en infraestructura para su regulación y tratamiento. Todo esto ha llevado a situaciones donde el agua empieza a escasear en ciertas zonas y se generan conflictos por su uso.

Cuando miramos sectores industriales como la siderurgia, y más específicamente el proceso de coquización, el tema se vuelve aún más delicado. Este proceso consume grandes cantidades de agua, alrededor de 4 m³ por hora, que después de ser utilizada sale cargada de contaminantes bastante complejos: fenoles, cianuros, amoníaco, hidrocarburos aromáticos y hasta metales pesados. En pocas palabras, no es cualquier tipo de agua residual, sino una que requiere un tratamiento serio y bien pensado. Por eso, hablar hoy de una gestión hídrica más eficiente y circular no es solo por cumplir la norma, es porque realmente toca ponerse la mano en el corazón y pensar en el impacto que estamos dejando.

En ese sentido, esta monografía nace como una respuesta a esa realidad, buscando soluciones que de verdad aporten. La idea principal es identificar estrategias que permitan optimizar los parámetros de operación en los sistemas de tratamiento y enfriamiento dentro del proceso de coquización. ¿Para qué? Para reducir el consumo de agua y bajar la carga contaminante en los efluentes, sin afectar la calidad del coque. Porque claro, tampoco se trata de frenar la producción, sino de hacer las cosas mejor, de una forma más responsable y consciente con el entorno.

Para lograrlo, se hizo una revisión juiciosa de información en bases de datos científicas y literatura especializada, enfocándose en el contexto colombiano y especialmente en regiones como Boyacá, donde esta actividad tiene bastante presencia. Además, se tuvo en cuenta el marco normativo vigente, tanto a nivel local como nacional e internacional. Todo esto con el fin de aterrizar propuestas que no se queden en la teoría, sino que puedan aplicarse en la realidad. La meta es clara: aportar a una industria que siga siendo productiva, pero que también sea más amigable con el agua, con el ambiente y con las comunidades que dependen de estos recursos.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Descripción de la problemática

La producción de acero es uno de los pilares esenciales en la infraestructura moderna. Sin embargo, esta industria puede impactar de forma negativa al medio ambiente, ya que, en sus diferentes etapas, requiere ciertas cantidades de recursos lo que genera residuos que contienen material particulado y compuestos solubles contaminantes, esto representa una alta amenaza para la estabilidad de los ecosistemas circundantes a dichas operaciones.

Dentro de los procesos que se llevan a cabo para la obtención de acero se encuentra la coquización. Consiste en la transformación de carbón metalúrgico en coque, el cual tiene como finalidad proporcionar calor y el carbono necesario para reducir los óxidos ferrosos del mineral a hierro puro [4]. Sin embargo, su producción involucra un gasto hídrico importante debido a que el agua se requiere para el lavado del carbón y enfriamiento de los productos obtenidos, dando como resultado aguas residuales [5].

En Boyacá, se registra una demanda promedio $3.56 \text{ m}^3/\text{h}$, donde cerca de $2.9 \text{ m}^3/\text{h}$ se utiliza en el apagado de las baterías de coquización [2], los cuales, en comparación con el consumo doméstico mensual en el departamento, el cual es cercano a los 12 m^3 evidencian el alto consumo hídrico de este sector [6].

Otra problemática que se deriva del uso de agua en estos procesos es la contaminación de estos efluentes, los cuales varían según su proveniencia y parámetros operacionales como la temperatura, procesamiento y la naturaleza de las materias primas, ya que la composición química del carbón o el coque influye en los compuestos solubles presentes.

En artículos científicos se registran contenidos de fenoles, cianuro, tiocianato, amoníaco, metales pesados, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP), nitratos, nitrilos sulfatos los cuales están por encima del límite permisible [5], [7]. Esta composición representa un desafío en las técnicas y tecnologías de los sistemas convencionales de tratamiento por lo cual se hace necesario la integración de diferentes procesos orgánicos e inorgánicos para la separación de estos contaminantes. Para optimizar los parámetros operativos se debe tener en cuenta la relación agua/coque durante el apagado, ajustes de temperaturas o cambios en el caudal, sin comprometer la estabilidad física y química del coque.

1.2 Pregunta de investigación.

¿Cómo optimizar los parámetros operativos en los sistemas de tratamiento y enfriamiento del proceso de coquización para minimizar el consumo hídrico y la concentración de contaminantes en los efluentes sin que se vea afectada la eficiencia ni la calidad del coque?.

Justificación

La coquización al ser uno de los procesos principales en la producción de acero, se enfrenta al reto constante de equilibrar la eficiencia productiva con la creciente presión global para minimizar su impacto medioambiental, en especial, el consumo de agua. En estudios anteriores relacionados con el uso de este recurso hídrico, se evidencia que se utiliza cerca de 4m³/h y su rango de contaminación se ve influenciado por la composición del carbón, la tecnología aplicada a los hornos y otros factores operacionales [2], [8].

Los principales compuestos que se encuentran en estos efluentes son fenoles, derivados del benceno, alcanos/aceites de cadena larga, piridina, furanos, nitrilos, hidrocarburos clorados e Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) junto con otras sustancias orgánicas [9]. En países que están en vía de desarrollo, como Colombia, aún se encuentra que los sistemas para la recuperación de contaminantes se basan en parámetros empíricos y tecnologías obsoletas, lo que impide un registro riguroso de las variables operativas. Este trabajo busca identificar en la literatura científica, los rangos operativos óptimos para el desempeño hídrico sin que se vea afectada la calidad del coque.

En los aspectos ambiental y normativo, los efluentes residuales tienen un estricto marco regulatorio debido a su alta concentración de contaminantes. A nivel internacional, los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 (Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos) y 9 (Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación), proponen metodologías para que las industrias avancen hacia el cumplimiento normativo, reduzca su impacto sobre los cuerpos de agua receptores y minimice el riesgo de generar pasivos ambientales costosos y de larga duración [10] .

La Unión Europea mediante los estándares dispuestos en las Mejores Técnicas Disponibles (BREF) establecen los niveles de emisiones y concentración de compuestos contaminantes [11]; las Directrices de EHS del Grupo del Banco Mundial orientan sobre los niveles de rendimiento y las medidas para el control de las emisiones y las aguas residuales en las nuevas instalaciones a un costo adecuado, mediante la adopción de tecnologías de prevención y control [12].

En el marco regulatorio colombiano la Ley 373 de 1997 establece el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA) en el cual se determina la gestión

integral a nivel industrial [13]; los Decretos 1076 y 0631 de 2015 determinan los límites máximos permisibles para vertimientos [14]; la Resolución 1256 de 2021 determina los usos para los efluentes residuales luego de ser tratados y los criterios mínimos de calidad requeridos [15]. A su vez, las Corporaciones Autónomas Regionales se encargan de otorgar los permisos de vertimiento y de hacer cumplir la normativa en su jurisdicción. Las plantas deben tramitar un Permiso de Vertimientos ante la autoridad competente, y esta podría establecer requisitos o límites más estrictos que la Resolución 0631 si el cuerpo receptor es susceptible a ser vulnerable.

En el ámbito económico y de competitividad industrial, se realiza un análisis hídrico el cual consiste en analizar y reducir la porción de los costos operativos variables que se ven influenciados por la captación, acondicionamiento y tratamiento final de los efluentes. Una gestión ineficiente no solo desperdicia el recurso, sino que incrementa los gastos en energía, reactivos químicos y mantenimiento de equipos. La búsqueda de las estrategias de optimización que propone este trabajo permite identificar técnicas y tecnologías que pueden generar ahorros mediante la reducción del consumo de agua, la disminución de los volúmenes y carga contaminante de los efluentes y la extensión de la vida útil de los equipos.

En conclusión, esta monografía se justifica como un ejercicio académico que busca identificar las posibles soluciones técnicas viables a problemas ambientales concretos, y demostrar que la eficiencia operativa y la responsabilidad ambiental no son objetivos excluyentes, sino complementarios y esenciales para el futuro de una industria estratégica en la economía nacional y global.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general.

Identificar estrategias de optimización en los parámetros de operación de los sistemas de tratamiento y enfriamiento en el proceso de coquización para minimizar el consumo hídrico y la concentración de contaminantes en los efluentes, tratando de garantizar la eficiencia y los estándares de calidad del coque

2.2 Objetivos específicos.

1. Describir y analizar los equipos utilizados en el proceso de coquización, identificando oportunidades de mejora en su operación y eficiencia.
2. Realizar una revisión de la normativa nacional y su comparación con la normativa internacional.
3. Hacer una revisión de la cuantificación en el proceso de coquización y evaluar el consumo de agua dicho proceso.
4. Investigar y analizar tecnologías del proceso de coquización. haciendo una descripción del reúso de las aguas residuales, evaluando su viabilidad y beneficios potenciales.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Carbón

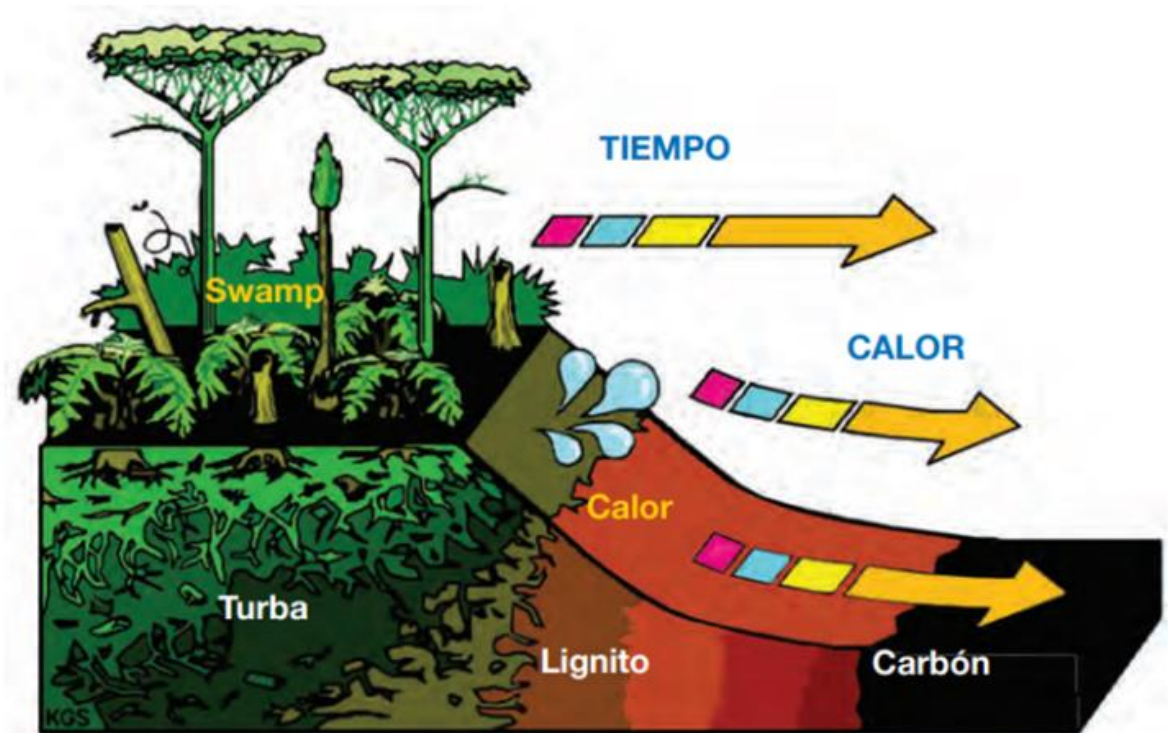
En el año 2024 la demanda a nivel mundial de carbón fue de 8770 MT, si este valor se compara con la producción en el 2023 (8741 MT), se evidencia un incremento debido al alza en los precios del gas por los conflictos geopolíticos de los últimos años [16], [17]. Para este mismo año, Colombia registró un 24.5% de exportaciones mineras, de los cuales el 56.5% fue de carbón térmico y 9.2% de coque [18].

El carbón mineral proviene de una roca sedimentaria formada por la transformación física y química de la materia vegetal prehistórica, acumulada por miles de años en ambientes pantanosos. En su composición, se encuentran macerales y minerales inorgánicos, en diferentes proporciones, esta característica y la evolución geológica de la roca permiten dividir en subgrupos este material, los cuales son antracita, bituminoso, sub bituminoso, lignito y turba. Lo anterior, lo convierte en uno de los más importantes combustibles fósiles usados [19].

En sus características físicas se destaca su color negro y su baja reflectancia, debido a su gran porcentaje de carbono; su peso específico está entre 1 a 1.8g/cm³, es poco poroso, por ello, tiene una alta impermeabilidad a líquidos. El rango de evolución y las proporciones de materia orgánica e inorgánica presentes determinan las propiedades químicas [20], [21]. Al someter al carbón en condiciones de alta temperatura este se descompone en compuestos que contienen hidrogeno, oxígeno, carbono, nitrógeno y azufre [20].

El carbón se formó a partir de la materia orgánica atrapada bajo tierra en condiciones anaeróbicas empezando así, de forma gradual, el proceso de carbonización. Los microorganismos, la temperatura y presión fueron los factores que transformaron los compuestos orgánicos dando origen a esta roca sedimentaria que fue clasificada se origen, rango y propiedades fisicoquímicas [20] (Figura 1).

Figura 1. Evolución del carbón.



Fuente. [Evolución del carbón-ecologiaverde.elperiodico.com]

El carbón se clasifica según la proporción de la materia orgánica presente durante su formación y se divide en:

- Carbones sapropélicos: Proviene de la descomposición de plantas microscópicas (algas y esporas) y de turba. Se caracteriza por ser un compuesto homogéneo, oscuro y con granulometría fina. La composición se encuentra entre los carbones y petróleos y se subdivide en Cannel o Boghead [22]
- Carbones húmicos: Son el resultado del ácido húmico producido por la degradación de materia vegetal. Su aspecto físico es bandeado y se divide en Vitreno, Clareno, Dureno y Fuseno [22]

Las propiedades fisicoquímicas en los carbones determinan su rango de evolución, calidad y uso industrial. La norma ASTM D388 establece la categorización de este material por rangos basados en el carbono fijo, poder calorífico bruto y grado de metamorfismo o alteración progresiva. Con este estándar, se organizan los carbones desde de bajo rango (lignitos y sub-bituminosos), los cuales se caracterizan por un alto contenido materia volátil y humedad y bajo poder calorífico, hasta los de alto rango (carbones bituminosos y

antracitas), que tienen un contenido mayor de carbono fijo, alto poder calorífico y una mayor reflectancia de la vitrinita [23]. Lo anterior se evidencia en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación del carbón según la norma ASTM D388-99 (ASTM, 2000)

Class/Group	Fixed Carbon Limits (Dry, Mineral-Matter-Free Basis), %		Volatile Matter Limits (Dry, Mineral-Matter-Free Basis), %		Gross Calorific Value Limits (Moist, ^a Mineral-Matter-Free Basis)				Agglomerating Character
	Equal or Greater Than	Less Than	Greater Than	Equal or Less Than	Btu/lb		Mj/kg ^c		
					Equal or Greater Than	Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	
Anthracitic:									
Meta-anthracite	98	...	...	2	...	...	...	...	} nonagglomerating
Anthracite	92	98	2	8	...	...	...	...	
Semianthracite ^d	86	92	8	14	...	...	...	...	
Bituminous:									
Low volatile bituminous coal	78	86	14	22	...	...	...	...	} commonly agglomerating ^e
Medium volatile bituminous coal	69	78	22	31	...	...	...	...	
High volatile A bituminous coal	...	69	31	...	14 000 ^e	...	32.6	...	
High volatile B bituminous coal	...	...	...	...	13 000 ^e	14 000	30.2	32.6	
High volatile C bituminous coal	...	...	...	...	11 500	13 000	26.7	30.2	} agglomerating
					10 500	11 500	24.4	26.7	
Subbituminous:									
Subbituminous A coal	...	...	...	...	10 500	11 500	24.4	26.7	} nonagglomerating
Subbituminous B coal	...	...	...	...	9 500	10 500	22.1	24.4	
Subbituminous C coal	...	...	...	...	8 300	9 500	19.3	22.1	
Lignitic:									
Lignite A	...	...	...	...	6 300 ^g	8 300	14.7	19.3	} nonagglomerating
Lignite B	...	...	...	...	...	6 300	...	14.7	

Fuente (Clasificación del carbón por rango según ASTM D388)

Otro factor relevante es su carácter aglomerante, esta propiedad se define como la capacidad de los carbones para fundirse y aglutinarse en atmosferas no oxidantes, con temperaturas superiores a los 400 °C y luego enfriarse en forma de masa coherente [23]. Si un carbón es aglomerante se utiliza en el proceso de coquización, pero si no lo es, se destina para uso térmico en la generación de electricidad ya que, en su composición se encuentra una cantidad importante de bencenos y radicales libres lo que permite que este actúe como un semiconductor [20].

4. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo de grado desarrollado bajo la modalidad de monografía se realizó mediante una revisión sistemática documental con la cual se identificaron los procesos, el marco normativo y los consumos, límites de contaminantes y eficiencias en el uso del agua para el proceso de coquización. El diseño este trabajo es de tipo no experimental, transversal y documental, ya que se analizó información existente en un período de 5 años de fuentes documentales especializadas. El proceso de identificación se organizó mediante fases alineadas con los objetivos específicos, aplicando técnicas de búsqueda, selección y análisis. Se indagaron documentos científicos, técnicos y normativos pertinentes al tema, los cuales fueron categorizados en artículos de investigación en revistas indexadas, documentos técnicos de referencia y la normatividad nacional e internacional.

Para lograr lo anterior, se implementó una estrategia sistemática de búsqueda documental donde se utilizaron ecuaciones de búsqueda con operadores booleanos y palabras clave en español e inglés como: "coke wastewater treatment", "coke dry quenching efficiency", "water consumption coking plant", "Decreto 1076 vertimientos" y "BREF iron and steel" en bases de datos científicas como ScienceDirect, SpringerLink, Taylor&Francis, Sage Journals, Google Académico y Tirant Online. Posterior a esto, se usaron criterios de inclusión como se evidencia a continuación

Tabla 2. Criterios de inclusión.

Criterio de inclusión	Descripción
Documentos científicos	Artículos de investigación Artículos de revisión Libros
Documentos técnicos y normativos	Normas Estándares
Idioma	Español e Inglés

Fuente. Autor

Se excluyeron documentos de divulgación no científica, estudios sobre procesos no relacionados y material sin acceso al texto completo. La información recopilada fue gestionada con el software Mendeley para la organización de referencias y extracción de datos clave.

El análisis de la documentación recopilada se realizó mediante la identificación de conceptos centrales, tendencias tecnológicas, los cuales fueron contrastados con

las técnicas y tecnologías, su consumo hídrico y el marco normativo con el fin de dar respuesta a los objetivos a partir de los hallazgos de diversas fuentes. Las limitaciones que se presentaron durante la realización de este trabajo se derivan del acceso restringido a algunos informes técnicos o datos operativos específicos de plantas colombianas.

4.1 Empresas en Colombia.

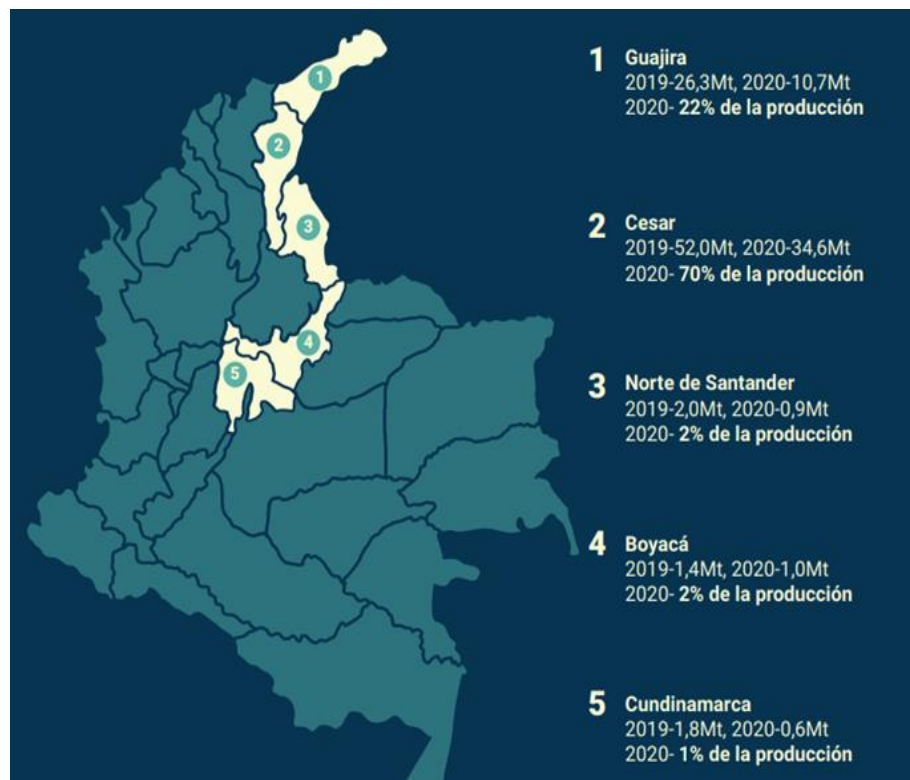
A lo largo del territorio nacional, y de acuerdo con información del DANE con corte al año 2020, se identifican cinco departamentos que concentran gran parte de la producción y exportación de carbón y coque en Colombia. Esta concentración no es casual, sino el resultado de condiciones geológicas favorables, tradición minera y desarrollo de infraestructura que ha permitido consolidar estos territorios como ejes estratégicos dentro del sector carbonífero. En estos departamentos se localizan importantes reservas de carbón térmico y metalúrgico, lo que impulsa tanto el abastecimiento interno como la participación del país en mercados internacionales.

Entre estos territorios destacan principalmente La Guajira y Cesar, reconocidos por su alta producción de carbón térmico a gran escala, orientado en su mayoría a la exportación. Por otro lado, departamentos como Boyacá, Cundinamarca y Norte de Santander juegan un papel clave en la producción de carbón metalúrgico y coque, utilizado especialmente en la industria siderúrgica. En estas regiones, la actividad minera suele estar más ligada a medianos y pequeños productores, así como a plantas de coquización que transforman el carbón en un producto de mayor valor agregado.

Esta distribución territorial evidencia no solo la importancia económica del sector, sino también su impacto social y ambiental en las regiones donde se desarrolla. La generación de empleo, el dinamismo económico local y la dependencia de muchas comunidades frente a esta actividad hacen que el carbón y el coque sigan siendo recursos estratégicos. Sin embargo, también surgen desafíos relacionados con la sostenibilidad, el manejo ambiental y la necesidad de modernizar los procesos productivos para hacerlos más eficientes y menos contaminantes.

En este contexto, la siguiente imagen permite visualizar de manera clara la localización de estos departamentos y su relevancia dentro del mapa productivo nacional. Esta representación facilita la comprensión de cómo se distribuye la actividad carbonífera en Colombia y refuerza la importancia de enfocar esfuerzos técnicos, ambientales y económicos en estas zonas clave, con el fin de garantizar un desarrollo más equilibrado y sostenible del sector.

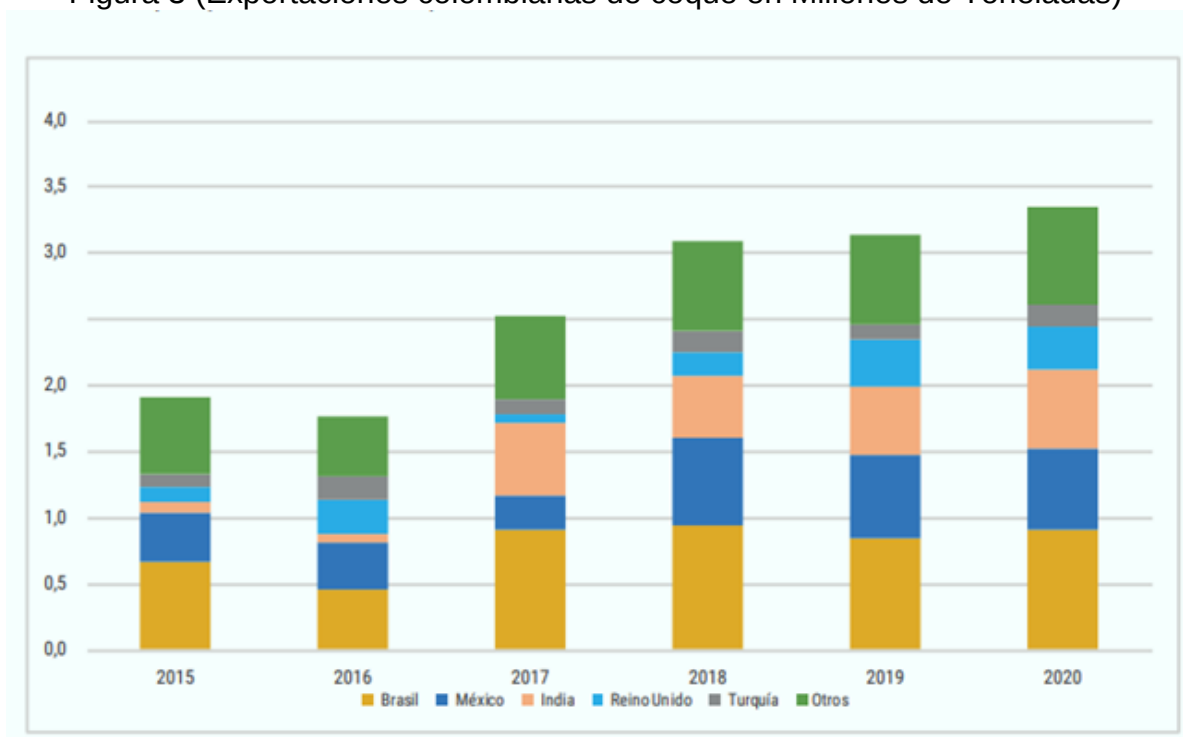
Figura 2 (Mapa de Colombia y departamentos que exportan coque)



Fuente (Elaboración propia con base en datos del DANE (2020) y Agencia Nacional de Minería.)

Dichas producciones y exportaciones concentran su comercio a suplir empresas locales encargadas de la fabricación de hierros y elementos metálicos usados en industrias como la construcción y ornamentación, dicha comercio se traduce en un 75.5% al país y un 24.5 % a exportaciones teniendo como aliados principales países como Brasil, México, India, Reino unido, Turquía, entre otros.

Figura 3 (Exportaciones colombianas de coque en Millones de Toneladas)



Fuente (Elaboración propia con base en datos del DANE (2020) y Agencia Nacional de Minería-Exportaciones de coque en Millones de Toneladas)

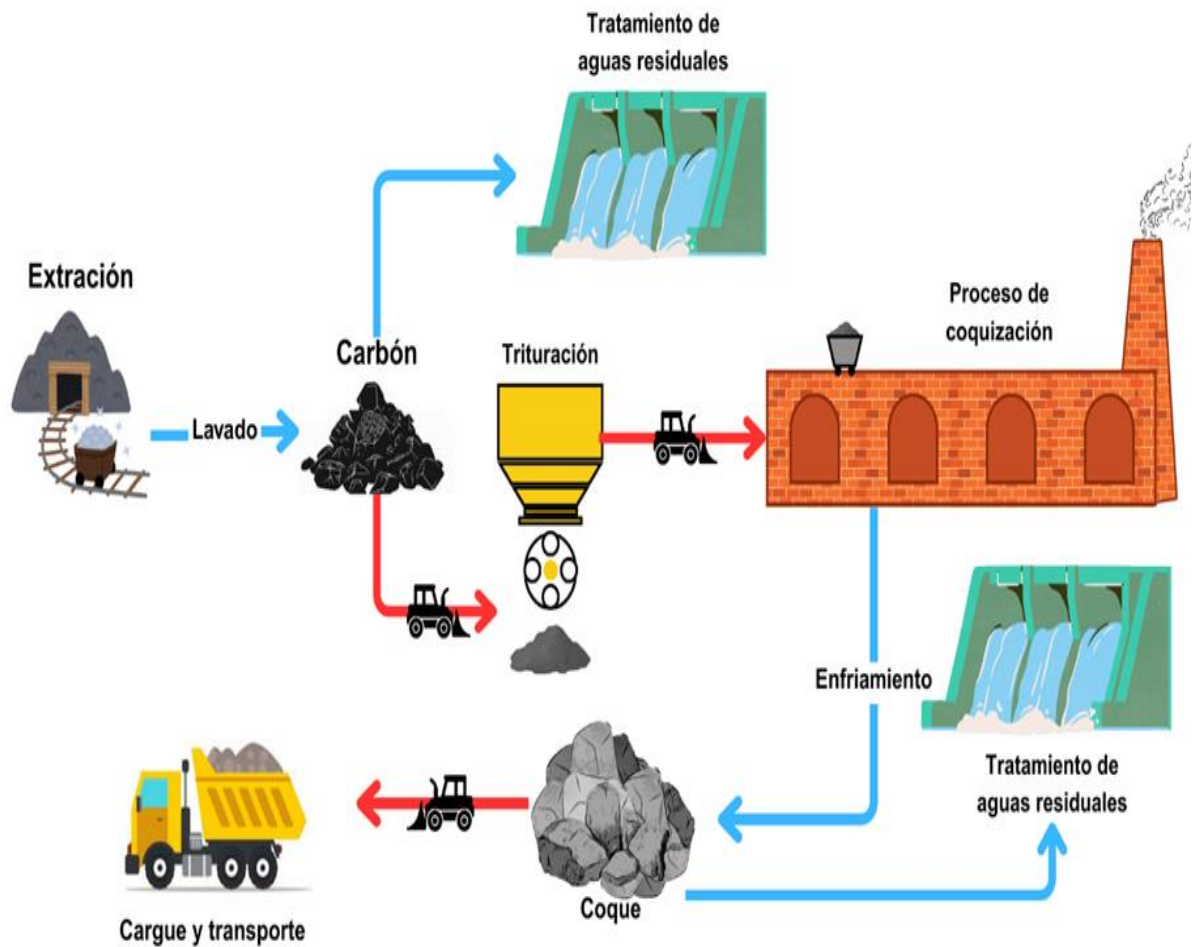
La expansión de este sector en Boyacá, ha tenido impactos ambientales en las áreas de influencia de sus operaciones productivas, estos son sistémicos y abarcan múltiples componentes del entorno. Tal es el caso de la generación de aguas residuales de origen no doméstico que provienen de patios de acopio, y aguas contaminadas de servicios que se mezclan con carbón o coque, así como residuos sólidos que surgen durante la transformación y depuración de la materia prima y el producto [2]. Estos efectos se clasifican en varios componentes ambientales

4.2 Proceso de coquización.

El proceso de coquización comienza con la extracción del carbón metalúrgico, este es transportado a la planta y se almacena en silos. Previo a procesarlo diferentes tipos de carbón son lavados para disminuir la concentración de elementos inertes luego, son mezclados, triturados y homogenizados para garantizar la calidad del producto final [24], [25]. El coque se forma a partir de la destilación del carbón a altas temperaturas, en ausencia de oxígeno, en las cámaras herméticas de las

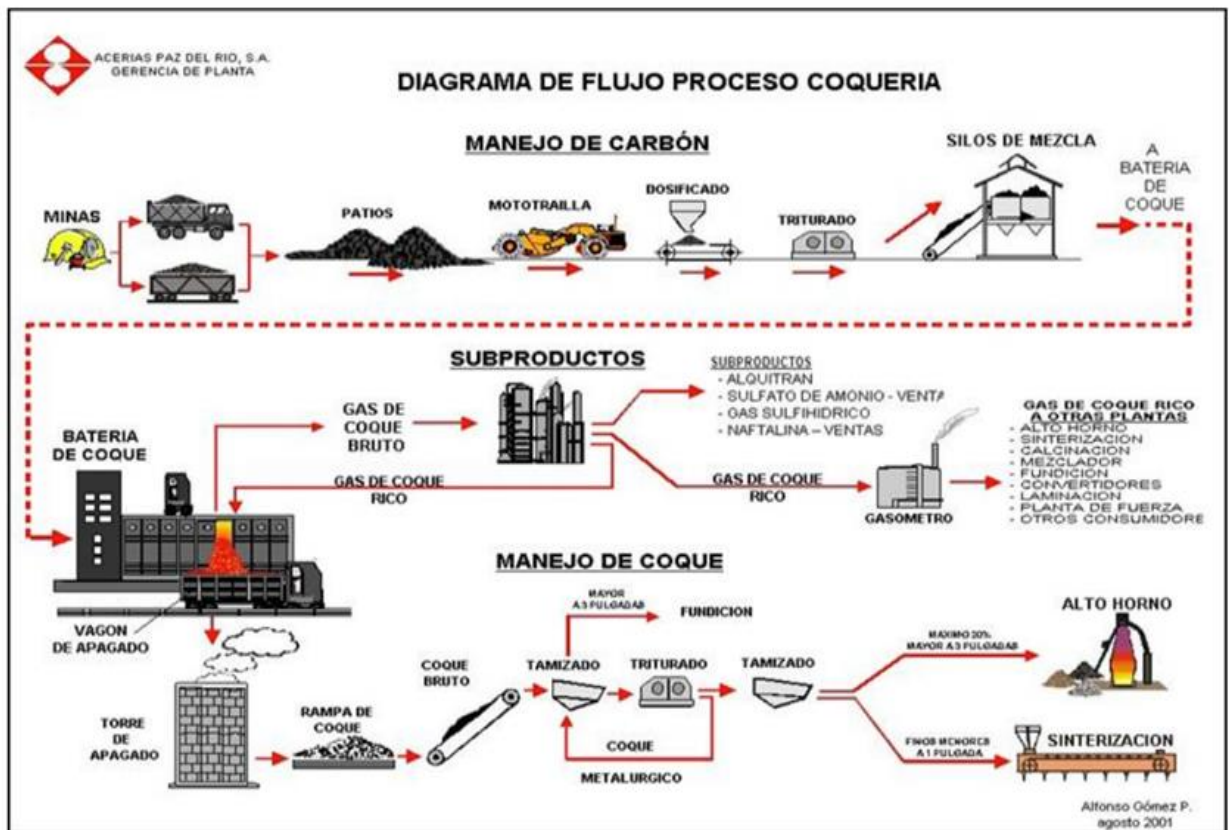
baterías de hornos, donde se calienta a altas temperaturas en ausencia de aire durante un periodo que oscila entre 16 y 24 horas [25], [26], [27]. Esta descomposición ocasiona un aumento en el porcentaje de carbono, ya que pierde componentes volátiles lo que conlleva al incremento del carbono fijo y genera gases de combustión los cuales se utilizan como combustible gaseoso para la siderurgia [28]. Este proceso se puede interpretar como una serie de reacciones físicas, químicas y fisicoquímicas que convierten una mezcla de carbones, con altos parámetros de calidad, en una de las materias primas empleadas para la fabricación del acero [29] (Figura).

Figura 4. Proceso de coquización. (Plano general)



Fuente. Autor.

Figura 5. Proceso de coquización. (Plano detallado)



Fuente(Acerías Paz del Río S.A. (2001). Diagrama de flujo del proceso de coquización)

5. EQUIPOS USADOS EN EL PROCESO DE COQUIZACION

5.1 Tecnologías de reúso para el tratamiento de efluentes residuales.

Ante las limitaciones del tratamiento de los CW por métodos convencionales, recientes investigaciones han explorado alternativas para hacer el proceso más eficiente y rentable. Una propuesta técnica viable es la integración de procesos de adsorción en el esquema de tratamiento ya que, al ser una separación física simple, podría implementarse después de la etapa primaria o en paralelo con la oxidación química con el fin de eliminar de manera selectiva contaminantes específicos, reduciendo así los compuestos que llega a las etapas químicas y biológicas. Como resultado se obtiene una disminución en el consumo de reactivos químicos utilizados en la etapa de oxidación y una reducción de los costos operativos totales [40].

Otro método que se asocia con el tratamiento físico-químico es el biológico, el cual tiene un bajo costo operativo, eficiencia en la degradación, versatilidad y resiliencia. Singh et al. estudiaron la biorremediación con cepas de *Pseudomonas putida* y *Pseudomonas stutzeri* inmovilizadas en soportes como carbón activado, aserrín y cenizas volantes para metabolizar contaminantes, donde se obtuvo la eliminación de cerca del 81% de fenol presente en las muestras de CW [41]. No obstante, el principal desafío de este método es la inhibición de los microorganismos por la alta toxicidad y complejidad de los elementos contaminantes [31]

Las tecnologías de oxidación avanzada son una alternativa de tratamiento de efluentes residuales, entre estas se destaca la electro-oxidación. Este proceso utiliza una celda electroquímica donde los elementos contaminantes se degradan mediante oxidación directa en el ánodo, con ayuda de los OH generados, o de forma indirecta a través de la adición de soluciones de NaCl con Cl_2 o HOCl. Shin et al, realizaron un estudio a partir de la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) y obtuvieron como resultado la reducción en un 90.13% de DQO, 99.34% de fenol, 96.23% de cianuro y 94.43% de amoníaco en 180 minutos con ánodos de Ti/RuO_2 [42]

Otra metodología efectiva es la combinación de procesos químicos y biológicos en esquemas híbridos o secuenciales. En estas se usan técnicas como la oxidación Fenton que consiste en un POA que usa peróxido de hidrógeno y sales de hierro seguida de biorremediación. Tyagi et al. [31] optimizaron este proceso y observaron que en la etapa Fenton se degradó el fenol en un 74% y el cianuro en 99.99% en las muestras de CW, lo que redujo su toxicidad en un 10% antes de pasar a la etapa biológica.

Chakraborty et al. utilizaron *Pseudomonas* sp. y *Enterobacter* sp en la etapa de biorremediación y lograron degradar el 98.8% del fenol remanente. Este tratamiento secuencial de dos pasos logró una remoción total del 99.3% del fenol y del 100% del cianuro, demostrando ser una alternativa económica y eficiente para

contaminantes recalcitrantes [31] Además de las tecnologías mencionadas, Koushik et al. exploraron métodos alternativos basados en principios de separación o adsorción. Para ello, usaron materiales adsorbentes de bajo costo, como la lutita de Godwana, para la remoción de fenol, reportando una eficiencia del 74.11% en 24 horas [43] Este tipo de enfoques pueden ser útiles como tratamiento terciario o en combinación con otros procesos.

6. MARCO NORMATIVO PARA LOS EFLUENTES RESIDUALES.

A nivel internacional el marco normativo para el proceso de coquización ha avanzado de manera significativa en el cual se contemplan tres factores que involucran los estándares técnicos, regulaciones en la fabricación del coque y cumplimiento de medidas sostenibles que responden a la creciente responsabilidad global sobre los impactos ambientales asociados a este proceso industrial. Lo anterior, tiene como finalidad minimizar el impacto ambiental mediante el enfoque de recuperación de los efluentes la gestión integral del agua. A continuación, se describen los aspectos legales a nivel mundial para la producción de este material (Tabla 2).

Tabla 2. Marco normativo internacional.

Estándar	Entidad	Normatividad	
		Regulación	Descripción
Técnico	Unión Europea	Directiva 2010/75/UE (Sistema de Mejores Técnicas Disponibles (BAT))	Permite establecer límites basados en la optimización tecnológica y operativa que reconocen la protección ambiental y la viabilidad económica de los procesos, dejando atrás los enfoques regulatorios tradicionales.
Fabricación del coque	Agencia de Protección Ambiental (EPA)	Norma 40 CFR Part 420 - Iron and Steel Manufacturing Point Source Category	Establece los Límites Máximos Tecnológicos (LMT) y estándares de pretratamiento para efluentes en sectores industriales.
Cumplimiento de medidas sostenibles	Grupo del Banco Mundial y la Corporación Financiera Internacional (IFC)	Directrices de Desempeño Ambiental y Social (EHS)	Las directrices EHS establecen requisitos como la jerarquía para la gestión del agua donde se prioriza la prevención de la contaminación, minimización del consumo hídrico, tratamiento de aguas residuales y políticas de compensación en casos donde no es posible una eliminación completa de los contaminantes

Fuente. [Environmental Protection Agency (EPA). (2017). 40 CFR Part 420: Iron and Steel Manufacturing Point Source Category. U.S. Environmental Protection Agency]

A su vez, las regulaciones presentadas en la Tabla 2 establecen los límites de concentración de elementos contaminantes para los efluentes tratados, esto permite analizar la implantación de procesos operativos eficientes y avanzados que minimizan las emisiones teniendo en cuenta la viabilidad económica.

Tabla 3. Límite de concentración de elementos contaminantes en la regulación internacional.

Regulación	Límite de concentración de elementos contaminantes [mg/L]				
	Fenoles	Cianuro	Amoniaco	DQO	SSP
Directiva 2010/75/UE	5	1	50	300	0
Norma 40 CFR Part 420	0.005	0.011	50	-	-
EHS	-	-	-	-	-

Fuente. [European Parliament and Council of the European Union. (2010). Directive 2010/75/EU on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). Official Journal of the European Union]

La EPA establece que estos parámetros sean monitoreados de manera continua por medio de reportes detallados que registran a diario la concentración de los compuestos contaminantes, los cuales deben ser enviados al Sistema de Información de Cumplimiento y Ejecución (ICIS), que centraliza los datos de cumplimiento de todas las instalaciones reguladas. Si existe un incumplimiento significativo a la normativa, las autoridades competentes pueden incluir multas cercanas a los \$56,460 por violación por día, acciones penales si se evidencia negligencia e implementación obligatoria de proyectos ambientales [44].

Las EHS no establecen límites de concentración de contaminantes debido a que siguen la normativa gubernamental, valores de la BAT o estándares planteados por la Organización Mundial de la Salud. En el caso de regiones que presentan estrés hídrico o ecosistemas sensibles, las directrices exigen sistemas que involucren máxima recirculación y tratamientos específicos con el fin de proteger los cuerpos hídricos receptores. Sin embargo, para nuevas instalaciones se crean objetivos de consumo específico basados en tecnologías disponibles en el mercado, por ejemplo, para las plantas de coquización se aspira que los equipos adquiridos tengan consumos inferiores a 1.5 m³/t de coque y tengan integrados sistemas de recirculación de efluentes [12].

En la última década países como China, India, Brasil y México han realizado reformas a las regulaciones ambientales que rigen la industria siderúrgica donde se han incorporado elementos de las normas europeas y estadounidenses (TABLA 4)

Tabla 4. Regulaciones vigentes en China, India, Brasil y México.

País	Norma	Enfoque
China	Especificaciones de Emisión para la Industria Siderúrgica - GB 28664-2012	Límites del consumo de agua y su estricto cumplimiento
India	Estándares de Emisión para la Industria del Hierro y Acero - Central Pollution Control Board	Límites de concentración de fenoles, cianuros y HAPs
Brasil	Resolución CONAMA 430/2011	Limites en vertimientos
México	NOM-001-SEMARNAT-2021	Limites en la concentración de residuos contaminantes

Fuente. [GB 28664-2012 (Versión en inglés) Norma de emisión de contaminantes atmosféricos para la industria siderúrgica. normas y especificaciones - PDF". Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://kpt-bj.org/6352764.html>9

En general, para las empresas que se establecen en el mercado mundial deben adoptar un enfoque que integre los tres marcos normativos desde la etapa de diseño con el fin de anticiparse a futuras restricciones, esto se logra mediante robustos sistemas de gestión ambiental que faciliten la verificación y cumplimiento de las regulaciones internacionales. Lo anterior, permite el desarrollo de productos certificados lo que involucra acceso a la diversificación del mercado.

A nivel local, el país ha establecido un marco normativo ambiental que regula las actividades industriales que tienen impacto potencial en los recursos. En este sentido, la producción de coque, al ser una industria que tiene un alto consumo hídrico, debe seguir un estricto sistema regulatorio enfocado en sistemas de gestión ambiental, análisis económico y operativo.

Esta normativa contempla tres niveles jerárquicos. El primero se establece en la constitución política con los principios fundamentales, luego el nivel legislativo, en el que se desarrollan dichos principios y, por último, el nivel regulatorio que ordena los procedimientos y parámetros técnicos específicos. En el caso de la industria del coque, este marco se complementa con normativas sectoriales específicas y las competencias de las autoridades regionales de medio ambiente (CAR), lo que da lugar a un sistema de gestión medioambiental complejo, pero destinado a garantizar la protección de los recursos hídricos y, al mismo tiempo, permitir un desarrollo industrial sostenible. Lo anterior se evidencia en la **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Marco normativo en Colombia.

Nivel jerárquico	Normativa	Definición
Principios fundamentales	Constitución política de 1991	Bases del derecho ambiental Art. 79 y 80: derecho colectivo a un medio ambiente saludable y la obligación del Estado de proteger la diversidad y la integridad del medio ambiente garantizando el desarrollo sostenible. Art 366 obliga al Estado a mejorar la calidad de vida de la población satisfaciendo necesidades básicas no cubiertas.
	Ley 2811 de 1974 - Ley de Recursos Naturales	Establece clasificaciones basadas en su uso y criterios para la concesión de derechos hídricos
Legislativo	Ley 99 de 1993 – Formación del Sistema Nacional de Ambiente (SINA)	Establece las disposiciones clave relacionadas con la gestión del agua contemplando la calidad, manejo de aguas residuales y la gestión de sustancias peligrosas. Define las competencias de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR)
	Ley 373 de 1997	Establece el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA) para aquellas entidades que superen los niveles de consumo fijados por las autoridades medioambientales
	Ley 1333 de 2009	Determina un régimen sancionatorio y mecanismos de control mediante la imposición de sanciones ambientales.
Regulatorio	Decreto 1076 de 2015 - Normativa Única Reglamentaria del Sector Ambiente	Regula la gestión de las aguas residuales industriales y establece tablas detalladas de los Límites Máximos Permisibles (LMP) para vertidos específicos en masas de agua superficiales
	Resolución 2254 de 2017	Establece los Estándares de Calidad de Agua para los diferentes usos del recurso hídrico
	Resolución 1256 de 2021	Establece los parámetros para el cálculo de la Tasa Retributiva por vertimientos

Fuente. [LEY 373 DE 1997 . Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-373-1997.pdf>], [14], [15], [49], [50], [51], [52], [53]

La Corte Constitucional estableció el concepto del agua como un bien público y derecho fundamental. Esta clasificación constitucional tiene importantes implicaciones prácticas para la industria del coque, ya que estipula que cualquier uso industrial del agua está subordinado al derecho humano al agua y a la protección del medio ambiente. A su vez, desde 1997 con la creación del PUEAA se determina la implementación de programas de medición y gestión del consumo, formulación de planes para optimizar y reducir los niveles de consumo específicos, inversión en tecnologías de reciclaje y reutilización y la presentación periódica de informes sobre los indicadores de eficiencia hídrica [13].

El Decreto 1076 de 2015, constituye la normativa técnica para los Límites Máximos Permisible (LMP) de elementos contaminantes en efluentes ya tratados. En el caso del proceso de coquización, los parámetros más relevantes son los siguientes (

Tabla 5).

Tabla 5. Límites Máximos Permisible (LMP).

Parámetro	Límite Máximo Permisible (LMP) [mg/L]
DBO ₅	100
DQO	200
Fenoles Totales	0.5
Cianuro Total	1.0
Amoníaco (NH ₃ -N)	10
Aceites y Grasas	10
Sulfuros	0.5

Fuente. [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible a partir de la fecha de su expedición. Colombia, 2015.
Consultado: el 27 de enero de 2026.]

Este decreto tiene prohibiciones específicas relevantes para la industria del coque en lo relacionado con el vertimiento de sustancias que formen películas superficiales (hidrocarburos), produzcan coloración, turbidez o espuma persistente, con temperatura superior a 40°C y sustancias radioactivas en concentraciones superiores a las naturales. A su vez, permite a las autoridades ambientales imponer límites más estrictos cuando el cuerpo receptor presente condiciones especiales como ser una fuente de abastecimiento para acueductos, tenga usos de conservación, preservación o presente deterioro avanzado de calidad y albergue especies sensibles o ecosistemas frágiles [14].

La Resolución 2254 de 2017 define las clasificaciones de cuerpos de agua según sus usos (conservación, consumo humano, recreación, etc.), determina los valores máximos permitidos para mantener cada clasificación y los protocolos de muestreo y análisis. Esta normativa es empleada por las CAR como referente para establecer las condiciones específicas en los permisos de vertimiento [53]. La Resolución 1256 de 2021 permite calcular un valor para las cargas contaminantes a partir del Índice de Costos Ambientales (ICA), requisitos para monitoreo y reporte y los criterios para determinación de tarifas. A nivel industrial, el pago por Tasa Retributiva puede representar un costo operativo significativo, creando un incentivo económico directo para optimizar los sistemas de tratamiento y reducir tanto la concentración como el volumen de vertimientos [15].

Otro aspecto relevante para el control y gestión del recurso hídrico es el permiso de Vertimiento. Esta autorización administrativa es otorgada por la autoridad generalmente por la CAR de la jurisdicción para realizar vertimientos bajo condiciones específicas. El proceso de obtención comienza con la presentación de estudios técnicos que deben incluir una caracterización completa del efluente, descripción del sistema de tratamiento, el balance hídrico de la planta, la evaluación de impacto sobre el cuerpo receptor y un plan de monitoreo propuesto. Posterior a esto, la corporación competente realiza una evaluación de la solicitud teniendo en cuenta la capacidad de asimilación del cuerpo receptor, el cumplimiento con los LMP, eficiencia del sistema de tratamiento y existencia de alternativas de minimización de contaminación [54].

Si los resultados son satisfactorios, la autoridad emite resolución estableciendo los puntos de vertimiento autorizados, caudales máximos permitidos, límites de concentración de contaminantes en aguas residuales específicos, este permiso tiene vigencia de 10 años en los cuales la empresa debe realizar un monitoreo constante de parámetros críticos (fenoles, cianuros, amoníaco), implementar sistemas de tratamiento terciario o mejoras tecnológicas periódicas.

En el marco normativo colombiano también existen los Planes de Manejo Ambiental (PMA) exigidos como parte de la Licencia Ambiental (Ley 99 de 1993, Artículo 85). Estos deben incluir programas de manejo de aguas residuales industriales, monitoreo y mantenimiento de sistemas de tratamiento para asegurar la calidad de agua, un plan de contingencia para derrames y accidentes [52].

Los aspectos relevantes de la Ley 1333 de 2009 para infracciones relacionadas con vertimientos incluyen verter sin permiso o excediendo los límites autorizados, incumpliendo de los LMP establecidos, omitir o falsificar información en los reportes, no implementar las medidas de los PMA y obstaculizar las actividades de control y vigilancia. En el art. 7 medidas preventivas como la suspensión temporal de actividades, clausura temporal o definitiva, decomiso de productos o equipos, ocupación temporal del establecimiento. Las sanciones dispuestas en el art. 40 van desde multas de hasta 5,000 Salarios Mínimos Mensuales Legales Vigentes (SMMLV), suspensión de registros o licencias, cierre temporal hasta por 5 años o de forma permanente, o trabajo comunitario. Si existe daño ambiental, el Decreto 2041 de 2014 establece disposiciones sobre responsabilidad que incluye la obligación de reparación integral, evaluación de daños y perjuicios, planes de reparación y compensación y seguros ambientales obligatorios para actividades de alto riesgo [52].

Las CAR como autoridades ambientales de primer nivel y mecanismos de control institucional ejercen funciones de expedición de permisos de aguas residuales, la gestión y el control de la calidad del agua inspección y vigilancia periódica, además de la verificación de cumplimiento de permisos, seguimiento a planes de manejo ambiental, imposición de medidas preventivas y sanciones.

7. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Las concentraciones reportadas en investigaciones realizadas son considerables (TABLA 8)

Tabla 8. Concentraciones de compuestos contaminantes en aguas residuales sin tratar.

Compuestos contaminantes	Concentración [mg/L]
Benceno	0.10
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	0.15 – 0.60
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	0.10 – 0.20 (equivalente a 4 kg/t de coque)
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	0.20
Fenoles	0.15 – 0.20 (equivalente a 0.3–12 kg/t de coque)
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	0.30
Amoníaco	0.10 – 2.00 kg de N/t de coque
Cianuro	0.10 – 0.60 kg/t de coque
Hidrocarburos heterocíclicos nitrogenados	0.40

Fuente. [L. Mishra, K. K. Paul, y S. Jena, “Coke wastewater treatment methods: Mini review”, Journal of the Indian Chemical Society, vol. 98, núm. 10, p. 100133, oct. 2021, doi: 10.1016/J.JICS.2021.100133.]

Estos valores al ser comparados con los exigidos en el Decreto 1076 de 2015 (TABLA 7), evidencian una alta concentración de contaminantes, los cuales son perjudiciales para la salud y los ecosistemas circundantes a los procesos operativos de este sector industrial.

El esquema para el tratamiento de aguas residuales típico consta de tres fases; en la primera se realiza la neutralización del pH, ecualización y clarificación, destinadas a separar materiales como aceites, grasas y alquitranes. En la segunda se realiza el pretratamiento químico mediante una etapa de oxidación química avanzada para reducir la concentración de compuestos como fenoles y cianuros a niveles que no inhiban el tratamiento biológico, el cual es el último paso. En este el efluente pretratado se envía a una planta de tratamiento biológico para la degradación de la materia orgánica remanente y finalmente, el efluente pasa por un clarificador antes de su posible vertido [7]

Los métodos fisicoquímicos usados para tratar las aguas residuales de coquización incluyen procesos como coagulación, cloración, oxidación electrolítica y Procesos de Oxidación Avanzada (POA). Sin embargo, estas tecnologías tienen limitantes significativas en la implementación a escala industrial ya que no son

efectivas para reducir altas concentraciones de compuestos fenólicos [31].

Para abordar de manera integral los costos y consumos de materiales e insumos del tratamiento de agua residuales se plantean los Indicadores de Rendimiento de Aguas Residuales de Coquización (CWPI), estos combinan y normalizan métricas clave como el consumo de químicos, emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y la producción de lodos, en un equivalente de consumo de electricidad. Esta herramienta permite evaluar el rendimiento de diferentes plantas de tratamiento y analizar con precisión sus condiciones reales de operación [3]

La revisión en bases de datos científicas evidencia que no existe una tecnología única universal para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de coquización. Los tratamientos fisicoquímicos pueden ser costosos o generar subproductos; el tratamiento biológico puro es inhibido por la toxicidad; mientras que las tecnologías avanzadas (electro oxidación, Fenton) y los esquemas híbridos (Fenton+Biológico) muestran el mayor potencial de eficiencia. Por ello, se deben plantear estrategias relacionadas con la optimización de parámetros operativos como pH, concentración de reactivos, densidad de corriente y tiempos de residencia.

Tabla 9. Impactos ambientales del proceso de coquización.

Componente	Impacto
Biótico	• Acuático: aumento de partículas en suspensión y alteración físico-química. • Terrestres: vertimientos químicos y remoción de cobertura vegetal. • Flora y fauna: pérdida de hábitat y desplazamiento
Atmosférico	Alteración de la calidad del aire por material particulado, emisión de gases y aumento de los niveles de ruido.
Edáfico	• Pérdida, contaminación y compactación de suelos. • Contaminación química y generación de lixiviados. • Pérdida de biodiversidad.
Geofísico	Impactos en el interfaz suelo-subsuelo y en aguas superficiales y subterráneas debido a una distribución inadecuada de residuos y a cambios en la calidad y cantidad del agua.

Fuente (Autor)

Los efluentes contaminados del proceso de coquización o Coke Wastewater (CW), se originan por la mezcla de disoluciones de amoníaco que se condensan con el gas del horno y vapores de alquitrán [30]. Estos se caracterizan por tener altas concentraciones de fenoles, cianuros, sulfuros, cloruros, hidrocarburos Aromáticos

Policíclicos (HAP), tiocianatos y compuestos nitrogenados heterocíclicos los cuales son elementos contaminantes y de alta toxicidad [31] (Figura).

Figura 6. Contaminación de los efluentes.



Fuente. Orglmeister Brandschutz GmbH & Co. KG, “Apagado de coque en coquerías”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.orglmeister.de/es/apagado-coque-coquerias-extincion-coque/> []

Las concentraciones de estos compuestos son variables y dependen de varios factores como, la composición del carbón alimentado, la base tecnológica de los hornos y otros factores ambientales como el clima regional [30]. Por ello se define esta agua residual un líquido residual con características particulares y complejas [33]. En específico, se han encontrado contaminantes orgánicos que incluyen fenoles, alcanos, derivados del benceno, piridina, nitrilos, furanos, HAP e hidrocarburos clorados, junto con contaminantes inorgánicos como NH_4^+ , CN^- , SCN^- , S^{2-} , F^- y Cl^- en altas concentraciones [30], [34], [35], [36], [37].

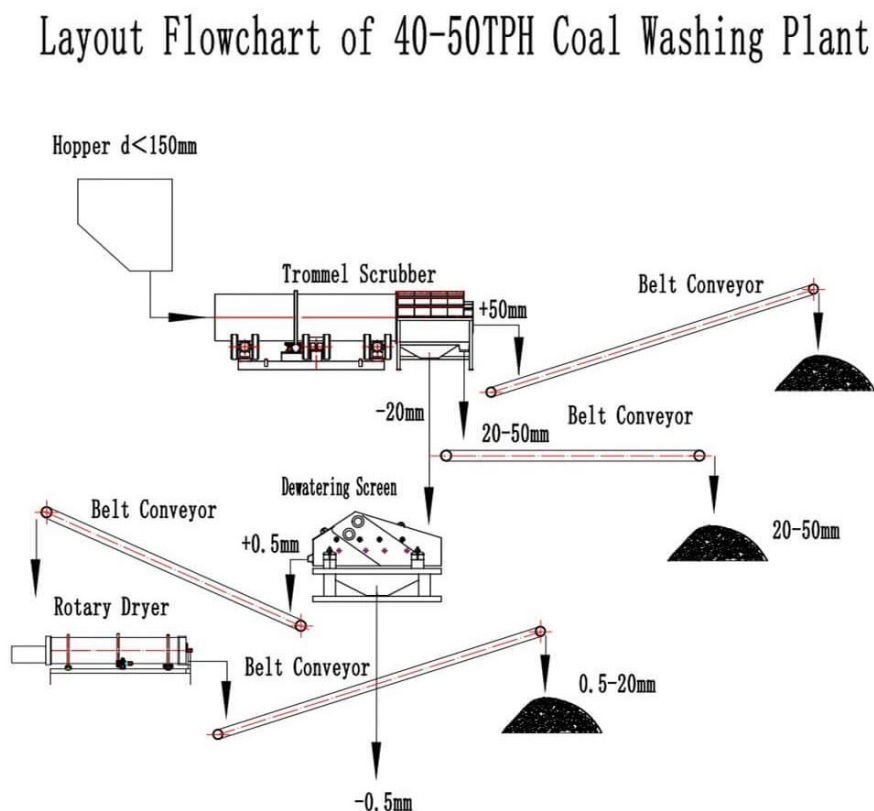
Zhang et al. detectaron hasta 270 contaminantes orgánicos en estos efluentes con una alta bioacumulación y toxicidad (PBT), lo que representa un riesgo de contaminación que puede afectar la cadena alimentaria [38]. Esta complejidad en la composición de los CW plantea retos significativos en la optimización en procesos

de tratamiento, ya que se deben realizar en varias etapas para la reducción de contaminantes como como fenoles, cianuros con el fin de reducir las afectaciones a los microorganismos de los sistemas biológicos [30], [39], [40]

8. TECNOLOGÍAS UTILIZADAS EN EL PROCESO DE COQUIZACIÓN

Las plantas de beneficio eliminan los materiales inertes del carbón para mejorar las propiedades del coque. Se utilizan diferentes técnicas y tecnologías para según la granulometría, para tamaños menores a 0.5 mm se usa la flotación y para mayores a 0.5 mm se emplean métodos por gravimetría como los ciclones. En el primer método se consume de 0.1 a 0.5 m³ y en el segundo es de 0.3 a 0.8 m³ de agua por tonelada de carbón, esta diferencia se debe a que las partículas finas retienen menos humedad [55] (Figura).

Figura 7. Planta de lavado de carbón



Fuente. [JXSC Machine, "Planta de lavado de carbón 40-50TPH". Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.jxscmachine.com/es/nuevo/40-50tph-planta-de-lavado-de-carbon/>]

Una vez completada la coquización, el coque al rojo vivo es expulsado de las cámaras y requiere un enfriamiento inmediato. Existen dos tecnologías predominantes para esta etapa:

1. Enfriamiento en Húmedo (Quenching): Este método es el más utilizado en las empresas. Consiste en enfriar el coque mediante la aplicación directa de agua a presión a través de mangueras, el consumo de agua se encuentra en un rango de 2.5 a 4m³ por tonelada de producción dependiendo de la capacidad del horno. Es crucial en esta operación evitar que el agua entre en contacto con las paredes calientes del horno para mantener su integridad térmica [2] (Figura).

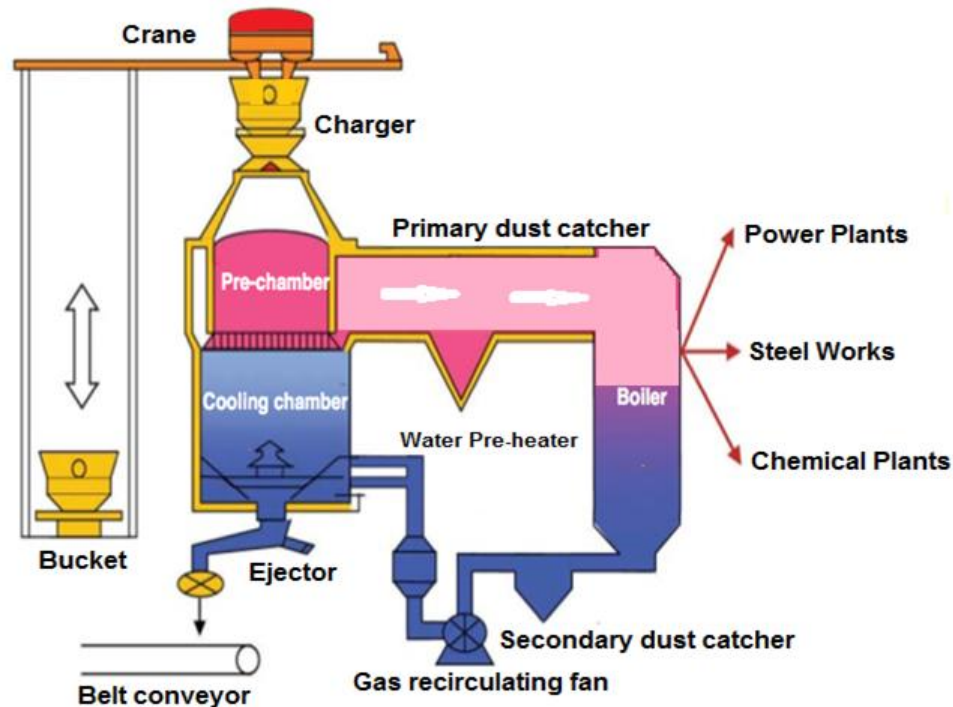
Figura 8. Enfriamiento en húmedo



Fuente.[Orglmeister Brandschutz GmbH & Co. KG, “Apagado de coque en coquerías”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.orglmeister.de/es/apagado-coque-coquerias-extincion-coque/>]

2. Enfriamiento en Seco (CDQ - Coke Dry Quenching): Esta tecnología es la más moderna y eficiente; utiliza un gas inerte como el nitrógeno en un circuito cerrado para extraer el calor del coque, este se recircula a una turbina que produce electricidad cubriendo hasta un 40% la demanda de la planta. Posterior a esto, el coque enfriado se clasifica por tamaño para su uso en el alto horno [25]. El uso de agua en esta técnica es de 0.5 m³/t lo que corresponde a una reducción superior al 80% en comparación con el Quenching (Figura 9).

Figura 9. Enfriamiento en Seco.



Fuente. [JXSC Machine, "Planta de lavado de carbón 40-50TPH". Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.jxscmachine.com/es/nuevo/40-50tph-planta-de-lavado-de-carbon/>]

A su vez, se genera un caudal de gas entre 45,000 y 60,000 m³/h, el cual se enfría de manera inicial con agua y luego es sometido a un proceso de limpieza primaria que incluye separadores y pre enfriadores, donde se separan subproductos como el alquitrán. El agua residual que resulta de esta operación se conduce a la planta de tratamiento para su procesamiento [25]

8.1 Marco regulatorio.

La implementación del sistema BAT debe estar integrado con los permisos ambientales otorgados por las autoridades competentes los cuales, no solo establecen los límites de emisión basados en el BAT, sino que deben incluir especificaciones relacionadas con el monitoreo, reporte y acciones de mejora a los procesos operativos. Esta recopilación y documentación, se verifica en periodos no mayores a 10 años con el fin de incorporar avances tecnológicos que permitan asegurar los estándares de producción, a su vez, el monitoreo continuo a variables

críticas y auditorías ambientales obligan a las empresas a reportar el desempeño ambiental a las entidades regulatorias para mayor control.

En el contexto práctico y regulatorio, las plantas de coquización implementan sistemas de tratamiento que buscan cumplir con la normativa. Esto incluye medidas de mitigación para diferentes flujos de agua como sistemas para el manejo de aguas lluvias y el tratamiento de aguas grises y negras mediante pozos sépticos y trampas de grasas [2]

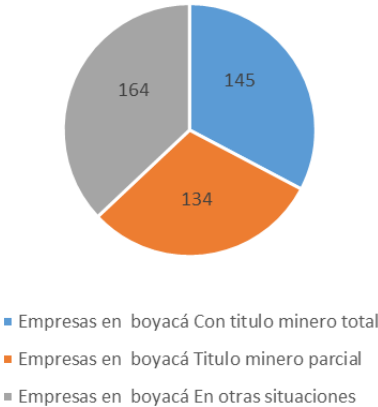
En Boyacá en el 2021, 443 empresas tienen como actividad económica la extracción de carbón y procesamiento del mismo, de estas 145 contaban con título minero vigente con Licencia Ambiental total, 134 parcial debido a condiciones inseguras o accidentes laborales. Por otra parte, Corpoboyacá ha otorgado 80 permisos vertimientos de los cuales cerca de 10 corresponden a actividad minera asociada con el carbón, el municipio con más permisos es Nobsa, el cual cuenta con 2 [59].

Tabla 10. Empresas en Boyacá y su situación Minera.

Empresas en Boyacá		
Con título minero total	Título minero parcial	En otras situaciones
145	134	164
33,00%	30,00%	37,00%

Fuente (Corpoboyacá. (2023). Empresas participantes en iniciativas de mercado de carbono regional, <https://www.corpoboyaca.gov.co>)

Figura 10. Situación de empresas mineras en Boyacá



Fuente (Corpoboyacá. (2023). Empresas participantes en iniciativas de mercado de carbono regional, <https://www.corpoboyaca.gov.co>)

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proceso de coquización se desarrolla a través de una serie de equipos especializados que permiten la transformación del carbón metalúrgico en coque, insumo fundamental para la industria siderúrgica. Inicialmente, el carbón es almacenado en silos y sometido a procesos de trituración, mezcla y homogenización con el fin de garantizar una composición adecuada para su posterior tratamiento térmico. Posteriormente, el material es introducido en baterías de hornos de coque, donde se lleva a cabo la destilación seca a altas temperaturas (entre 16 y 24 horas) en ausencia de oxígeno, generando coque y subproductos gaseosos.

Una vez finalizada la coquización, el coque es sometido a procesos de enfriamiento, siendo el método más común el enfriamiento en húmedo (quenching), el cual implica un alto consumo de agua y la generación de efluentes contaminados. En contraste, el enfriamiento en seco (CDQ) se presenta como una alternativa tecnológica más eficiente, al reducir significativamente el consumo hídrico y permitir la recuperación de energía térmica. En este sentido, se identifican oportunidades de mejora en la modernización de equipos, particularmente en la sustitución de tecnologías convencionales por sistemas más eficientes, lo que contribuye a optimizar el desempeño energético y ambiental del proceso.

El marco normativo aplicable al proceso de coquización presenta diferencias significativas entre el contexto nacional e internacional. A nivel internacional, regulaciones como la Directiva 2010/75/UE de la Unión Europea incorporan el enfoque de Mejores Técnicas Disponibles (BAT), promoviendo la optimización tecnológica como herramienta para la reducción de impactos ambientales. De igual forma, la normativa de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y las directrices del Banco Mundial establecen estándares estrictos para el control de efluentes y la gestión eficiente del recurso hídrico.

En el contexto colombiano, el marco normativo se encuentra estructurado en niveles jerárquicos que incluyen la Constitución Política de 1991, leyes ambientales como la Ley 99 de 1993 y normativas regulatorias como el Decreto 1076 de 2015. Estas disposiciones establecen límites máximos permisibles para vertimientos y regulan el uso del recurso hídrico mediante instrumentos como el PUEAA y los permisos de vertimiento. No obstante, se evidencia que la normativa nacional se enfoca principalmente en el cumplimiento de parámetros de calidad, mientras que la normativa internacional promueve un enfoque preventivo basado en la eficiencia tecnológica, lo que sugiere la necesidad de fortalecer la integración de estrategias de innovación y sostenibilidad en el ámbito local.

El proceso de coquización presenta un consumo considerable de agua en sus diferentes etapas operativas, lo que representa un aspecto crítico desde el punto de vista ambiental. En la etapa de lavado del carbón, el consumo hídrico varía entre 0.1 y 0.8 m³ por tonelada, dependiendo de la tecnología empleada. Posteriormente, durante el enfriamiento del coque, el método de quenching puede alcanzar consumos entre 2.5 y 4 m³ por tonelada de producto, siendo esta la etapa de mayor demanda hídrica dentro del proceso.

Adicionalmente, se generan aguas residuales con altas concentraciones de contaminantes como fenoles, cianuros, amoníaco y compuestos orgánicos complejos, cuyos niveles superan en muchos casos los límites establecidos por la normativa ambiental. Esta situación evidencia la necesidad de implementar herramientas de evaluación como los indicadores de rendimiento (CWPI), los cuales permiten analizar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales y optimizar el uso de recursos. En este contexto, la cuantificación del consumo hídrico y de las cargas contaminantes resulta fundamental para el diseño de estrategias orientadas a la reducción del impacto ambiental.

El tratamiento de aguas residuales en el proceso de coquización constituye un desafío técnico debido a la complejidad y toxicidad de los contaminantes presentes. Las tecnologías convencionales, basadas en procesos fisicoquímicos y biológicos, presentan limitaciones en la remoción de compuestos recalcitrantes como fenoles y cianuros. Por esta razón, se han desarrollado tecnologías avanzadas como la electro-oxidación, los procesos de oxidación avanzada (POA) y sistemas híbridos que combinan tratamientos químicos y biológicos, logrando eficiencias superiores al 90% en la eliminación de contaminantes.

El reúso de las aguas tratadas se presenta como una estrategia viable para reducir el consumo de agua fresca en las plantas de coquización. La implementación de sistemas de recirculación permite reutilizar el agua en etapas del proceso como el enfriamiento o lavado, disminuyendo tanto la captación de recursos hídricos como la descarga de efluentes. Asimismo, el uso de tecnologías complementarias como la adsorción con materiales de bajo costo y la biorremediación contribuye a mejorar la calidad del agua tratada. En conjunto, estas estrategias permiten avanzar hacia un modelo de gestión hídrica circular, generando beneficios ambientales, económicos y operativos para la industria.

Se recomienda a las empresas del sector de coquización avanzar hacia la implementación de modelos de economía circular, priorizando la recirculación del agua dentro de los procesos productivos. Esto implica la adopción de sistemas cerrados de tratamiento que permitan reutilizar el recurso hídrico en etapas como el enfriamiento del coque y el lavado de carbón, reduciendo significativamente la captación de agua fresca y el volumen de vertimientos.

Desde el punto de vista tecnológico, se sugiere la sustitución progresiva de sistemas convencionales de enfriamiento en húmedo por tecnologías como el enfriamiento en seco (CDQ), así como la integración de tratamientos avanzados de aguas residuales (electro-oxidación, procesos Fenton y sistemas híbridos). Estas soluciones no solo mejoran la eficiencia en la remoción de contaminantes, sino que también contribuyen a disminuir los costos asociados al consumo de insumos y al pago de tasas retributivas.

En el ámbito normativo, es fundamental que las empresas fortalezcan sus sistemas de gestión ambiental mediante el cumplimiento estricto de la Resolución 1256 de 2021, especialmente en lo relacionado con el monitoreo de cargas contaminantes y el cálculo de la tasa retributiva. La implementación de indicadores de desempeño hídrico permitirá optimizar los procesos operativos y reducir el impacto económico asociado a los vertimientos, generando incentivos para la mejora continua.

Adicionalmente, se recomienda a las autoridades ambientales y al sector industrial promover la articulación entre normativa nacional e internacional, adoptando enfoques como las Mejores Técnicas Disponibles (BAT), que permitan anticiparse a futuras exigencias regulatorias. Esto contribuirá a fortalecer la competitividad del sector en mercados internacionales y a garantizar el cumplimiento de estándares ambientales más exigentes.

Finalmente, se sugiere fomentar la investigación y el desarrollo en tecnologías de tratamiento y reúso de aguas residuales, así como la capacitación del personal operativo en prácticas sostenibles. La implementación de estas estrategias permitirá consolidar un modelo productivo más eficiente, responsable y alineado con los principios de sostenibilidad, posicionando a la industria del coque como un referente en la gestión de vertimientos industriales bajo un enfoque de economía circular.

10. GLOSARIO

1. **Cuerpo receptor:** Cualquier ecosistema acuático natural, como ríos, lagos, lagunas, arroyos, estuarios, el mar o aguas subterráneas (acuíferos), que recibe descargas de aguas residuales, ya sean tratadas o sin tratar, o vertidos de actividades antrópicas.[60]
2. **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Mide la cantidad de oxígeno necesaria ó consumida para la descomposición microbiológica (oxidación) de la materia orgánica en el agua, se define como la cantidad total de oxígeno requerido por los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable [61].
3. **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo[61] .
4. **Edáfico:** Que pertenece al suelo o está relacionado con él, en lo que respecta a su composición química y a la vida de las plantas que ahí crecen [62]
5. **Fenoles:** Compuestos orgánicos aromáticos con fórmula general (Ar-OH), caracterizados por un grupo hidroxilo (-OH) unido directamente a un anillo bencénico. El fenol simple (C_6H_5OH) es un sólido incoloro o blanco, tóxico y corrosivo, con un punto de fusión de $43^{\circ}C$ y punto de ebullición de $182^{\circ}C$.
6. **Furanos:** Compuestos orgánicos heterocíclicos aromáticos que se forman en alimentos procesados por calor (como café, sopas, pastas) y también son contaminantes ambientales, derivados de procesos de combustión o degradación de aislamiento en transformadores eléctricos.
7. **Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP):** se forman por pirólisis o combustión incompleta de materia orgánica que contiene carbono e hidrógeno [63].
8. **Hidrocarburos heterocíclicos nitrogenados:** Compuestos cíclicos que incluyen átomos de carbono y al menos un átomo de nitrógeno en el anillo
9. **Macérales:** Microconstituyentes orgánicos del carbón, que se clasifican en tres grandes grupos: vitrinita/huminita, inertinita y liptinita, con distinciones basadas en su composición química y propiedades ópticas [64].
10. **Roca sedimentaria:** Formadas por la acumulación de materiales o partículas, por precipitación química o por el crecimiento de organismos, en condiciones subaéreas o subacuáticas marinas o lacustres: los sedimentos [65].
11. **Sólidos en suspensión:** Partículas sólidas de distinto tamaño y origen que se encuentran en suspensión en las aguas residuales [66]

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Adolfo y H. Diaz, “ARCHIVOS DE ECONOMÍA”.
- [2] V. Becerra, D. Código, B. L. Mejía, y J. & Trigos, “Resumen Ejecutivo”.
- [3] Z. Qin *et al.*, “Evolution of biochemical processes in coking wastewater treatment: A combined evaluation of material and energy efficiencies and secondary pollution”, *Science of The Total Environment*, vol. 807, p. 151072, feb. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.151072.
- [4] “¿Cuál es el papel del coque en el proceso metalúrgico? | Jinsun Carbon”. Consultado: el 25 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://jinsuncarbon.com/es/cual-es-el-papel-del-coque-en-el-proceso-metalurgico/>
- [5] D. S. Ken y A. Sinha, “Dimensionally stable anode (Ti/RuO₂) mediated electro-oxidation and multi-response optimization study for remediation of coke-oven wastewater”, *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, núm. 1, p. 105025, feb. 2021, doi: 10.1016/J.JECE.2021.105025.
- [6] “Programa de uso eficiente y ahorro del agua - GOBERNANZA DEL AGUA - Corpoboyacá”. Consultado: el 25 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://gobiernoagua.corpoboyaca.gov.co:2157/programa-de-uso-eficiente-y-ahorro-del-agua/>
- [7] S. Pramanik, F. Ahamed, K. C. Ghanta, y S. Dutta, “Treatment of coke oven effluent using copper impregnated activated carbon: experiment and modelling”, *Indian Chemical Engineer*, vol. 61, núm. 4, pp. 342–360, oct. 2019, doi: 10.1080/00194506.2019.1573707;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER.
- [8] “Mejoramiento del proceso de coquización en Norte de Santander por medio de la implementación de tecnologías eficientes y análisis de datos para producción”, Consultado: el 26 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/1c703161-1ca6-4dcb-bb99-cee32eeb7cde/content>
- [9] Z. Qin *et al.*, “Evolution of biochemical processes in coking wastewater treatment: A combined evaluation of material and energy efficiencies and secondary pollution”, *Science of The Total Environment*, vol. 807, p. 151072, feb. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.151072.
- [10] “Portada - Desarrollo Sostenible”. Consultado: el 26 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- [11] “) (2) (3 (4) (5) (6) (7) (8 ”.
- [12] “Directrices ambientales, de salud y seguridad”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ifc.org/en/insights-reports/general-environmental-health-and-safety-guidelines>
- [13] LEY 373 DE 1997 . Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-373-1997.pdf>
- [14] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible a partir de la fecha de su expedición*. Colombia, 2015. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea].

- Disponible en:
https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=78153
- [15] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Reglamento del uso de las aguas residuales*. Colombia, 2021.
 - [16] I. Energy Agency, “Coal 2024: Analysis and forecast to 2027”, 2024. [En línea]. Disponible en: www.iea.org
 - [17] International Energy Agency (IEA), “Coal 2023 - Analysis and forecast to 2026”, 2023. [En línea]. Disponible en: www.iea.org
 - [18] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y Agencia Nacional de Minería (ANM), “Boletín estadístico informativo. Minería en cifras. Datos económicos, precios, contexto y normatividad (Diciembre 2024)”, Bogotá, dic. 2024.
 - [19] J. G. Speight, “The Chemistry and Technology of Coal Third Edition”.
 - [20] Coordinación General de Minería, “Perfil del mercado del Carbón”, Ciudad de Mexico, dic. 2014.
 - [21] L. J. Mejia Umacha, *EL CARBÓN: Origen, atributos, extracción y usos actuales en Colombia*, 1a ed. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2014.
 - [22] A. Gómez Gómez, “CARACTERIZACIÓN GEOMECAÁNICA Y PETROGRÁFICA DE CARBONES HÚMICOS DE LA CUENCA DEL SINIFANÁ SECTOR AMAGÁ TITIRIBÍ ANTIOQUIA”, Universidad Nacional de Colombia, Medellin, 2021.
 - [23] ASTM, *ASTM-D388-99e1 Standard Classification of Coals by Rank*. 1999.
 - [24] J. M. Gutiérrez Bernal, W. F. Mora Pulido, L. I. Rodríguez Varela, J. Ramírez, y J. de J. Díaz Velásquez, “Aprovechamiento de partículas de ultrafinos de carbón de una planta lavadora en la producción de coque metalúrgico”, *Ingeniería e Investigación*, vol. 31, núm. 1, pp. 56–64, 2011, Consultado: el 26 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092011000100007&lng=en&nrm=iso&tlng=es
 - [25] N. Radó-Fóty, E. Domokos, L. Nagy, V. Sebestyén, y A. Egedy, “Life cycle assessment of coke production based on real plant and model-optimised data”, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2025 30:10, vol. 30, núm. 10, pp. 2203–2220, abr. 2025, doi: 10.1007/S11367-025-02455-6.
 - [26] D. Zhang, R. Zou, X. Wang, J. Liu, y F. Mo, “Carbon Capture, Utilization & Storage: A General Overview”, *Climate Mitigation and Adaptation in China: Policy, Technology and Market*, pp. 61–107, ene. 2021, doi: 10.1007/978-981-16-4310-1_3/TABLES/2.
 - [27] C. Diaz, “Coque Base del Desarrollo Orgullo Nacional”.
 - [28] P. Horace C., *Coal carbonization*. New York: American Chemical Society, 1924. Consultado: el 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://archive.org/details/coalcarbonizatio00port/page/16/mode/2up>
 - [29] A. Y. Serrano Serrano, J. C. Acevedo Paez, y J. C. Contreras Velasquez, “Optimización del proceso de coquización a partir de la mezcla de materia prima: Caso Norte de Santander”, *Boletín de Innovación, Logística y*

- Operaciones*, vol. 7, núm. 1, pp. 53–66, feb. 2025, Consultado: el 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://revistascientificas.cuc.edu.co/bilo/article/view/6277/5600>
- [30] Z. Qin *et al.*, “Evolution of biochemical processes in coking wastewater treatment: A combined evaluation of material and energy efficiencies and secondary pollution”, *Science of The Total Environment*, vol. 807, p. 151072, feb. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.151072.
 - [31] M. Tyagi, N. Kumari, y S. Jagadevan, “A holistic Fenton oxidation-biodegradation system for treatment of phenol from coke oven wastewater: Optimization, toxicity analysis and phylogenetic analysis”, *Journal of Water Process Engineering*, vol. 37, p. 101475, oct. 2020, doi: 10.1016/J.JWPE.2020.101475.
 - [32] Orglmeister Brandschutz GmbH & Co. KG, “Apagado de coque en coquerías”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.orglmeister.de/es/apagado-coque-coquerias-extincion-coque/>
 - [33] L. Mishra, K. K. Paul, y S. Jena, “Coke wastewater treatment methods: Mini review”, *Journal of the Indian Chemical Society*, vol. 98, núm. 10, p. 100133, oct. 2021, doi: 10.1016/J.JICS.2021.100133.
 - [34] Y. Zhang, C. Wei, y B. Yan, “Emission characteristics and associated health risk assessment of volatile organic compounds from a typical coking wastewater treatment plant”, *Science of The Total Environment*, vol. 693, p. 133417, nov. 2019, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2019.07.223.
 - [35] W. Zhang *et al.*, “Dynamic behaviors of batch anaerobic systems of food waste for methane production under different organic loads, substrate to inoculum ratios and initial pH”, *J. Biosci. Bioeng.*, vol. 128, núm. 6, pp. 733–743, dic. 2019, doi: 10.1016/J.JBIOSEC.2019.05.013.
 - [36] Q. Kong, Z. Li, Y. Zhao, C. Wei, G. Qiu, y C. Wei, “Investigation of the fate of heavy metals based on process regulation-chemical reaction-phase distribution in an A-O1-H-O2 biological coking wastewater treatment system”, *J. Environ. Manage.*, vol. 247, pp. 234–241, oct. 2019, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2019.06.061.
 - [37] Q. Kong *et al.*, “Solubilization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) with phenol in coking wastewater treatment system: Interaction and engineering significance”, *Science of The Total Environment*, vol. 628–629, pp. 467–473, jul. 2018, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2018.02.077.
 - [38] Q. Bu, Q. Li, Y. Cao, y H. Cao, “A new method for identifying persistent, bioaccumulative, and toxic organic pollutants in coking wastewater”, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 144, pp. 158–165, dic. 2020, doi: 10.1016/J.PSEP.2020.07.022.
 - [39] C. Wei *et al.*, “Residual chemical oxygen demand (COD) fractionation in bio-treated coking wastewater integrating solution property characterization”, *J. Environ. Manage.*, vol. 246, pp. 324–333, sep. 2019, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2019.06.001.
 - [40] S. Pramanik, F. Ahamed, K. C. Ghanta, y S. Dutta, “Treatment of coke oven effluent using copper impregnated activated carbon: experiment and

- modelling”, *Indian Chemical Engineer*, vol. 61, núm. 4, pp. 342–360, oct. 2019, doi: 10.1080/00194506.2019.1573707;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER.
- [41] N. Singh y C. Balomajumder, “Simultaneous removal of phenol and cyanide from aqueous solution by adsorption onto surface modified activated carbon prepared from coconut shell”, *Journal of Water Process Engineering*, vol. 9, pp. 233–245, feb. 2016, doi: 10.1016/J.JWPE.2016.01.008.
 - [42] D. S. Ken y A. Sinha, “Dimensionally stable anode (Ti/RuO₂) mediated electro-oxidation and multi-response optimization study for remediation of coke-oven wastewater”, *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 9, núm. 1, p. 105025, feb. 2021, doi: 10.1016/J.JECE.2021.105025.
 - [43] K. Sadhu, A. Mukherjee, S. K. Shukla, K. Adhikari, y S. Dutta, “Adsorptive removal of phenol from coke-oven wastewater using Gondwana shale, India: experiment, modeling and optimization”, *Desalination Water Treat.*, vol. 52, núm. 34–36, pp. 6492–6504, oct. 2014, doi: 10.1080/19443994.2013.815581.
 - [44] “eCFR :: 40 CFR Part 420 -- Iron and Steel Manufacturing Point Source Category”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-N/part-420>
 - [45] “GB 28664-2012 (Versión en inglés) Norma de emisión de contaminantes atmosféricos para la industria siderúrgica. normas y especificaciones - PDF”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://kpt-bj.org/6352764.html>
 - [46] “CCR”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://airquality.cpcb.gov.in/ccr/#/login>
 - [47] “Resolución CONAMA 430/11 - Condiciones y estándares de efluentes - NR Brasileña”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://braziliannr.com/brazilian-environmental-legislation/conama-resolution-430-11-conditions-and-standards-of-effluents/>
 - [48] “SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES”, Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/convencion-sobre-los-humedales-de-importancia->
 - [49] *CONSTITUCION POLITICA DE COLOMBIA 1991* .
 - [50] *Ley 2811 de 1974* .
 - [51] *Ley 99 de 1993 – Formación del Sistema Nacional de Ambiente (SINA)*. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=297
 - [52] *Procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones*. Colombia, 2009. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=36879
 - [53] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *Norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones*. Colombia, 2017. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en:

- <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-2254-de-2017.pdf>
- [54] Corpoboyacá, “Permiso de vertimientos”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.corpoboyaca.gov.co/ventanilla-atencion/permiso-vertimientos/>
 - [55] R. Ahmadi, M. Alidokht, S. Jannesar Malakooti, y S. Zare, “Evaluating Optimal Operational Solutions For Heavy Intermediate Cyclone And Flotation Circuits Of Mamradco-Tabas Coal Washing Plant Heavy media cyclone Flotation Fine particles Mamradco Coal washing Plant Evaluating optimal operational solutions for heav...”, vol. 20, núm. 1, pp. 27–45, 2025, doi: 10.22034/IJME.2025.2039035.2017.
 - [56] JXSC Machine, “Planta de lavado de carbón 40-50TPH”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.jxscmachine.com/es/nuevo/40-50tph-planta-de-lavado-de-carbon/>
 - [57] N. Zhou, J. Romankiewicz, D. Fridley, C. Fino--Chen, y E. O. Lawrence, “A Review of Commercially Available Technologies for Developing Low--Carbon Eco--cities”, 2015.
 - [58] L. Mishra, K. K. Paul, y S. Jena, “Coke wastewater treatment methods: Mini review”, *Journal of the Indian Chemical Society*, vol. 98, núm. 10, p. 100133, oct. 2021, doi: 10.1016/J.JICS.2021.100133.
 - [59] “Permisos de vertimientos otorgados - Corpoboyacá”. Consultado: el 26 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.corpoboyaca.gov.co/vertimientos-otorgados/>
 - [60] DANE, “FICHA TECNICA. Sistema de Información del Medio Ambiente”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <http://institucional.ideam.gov.co/descargas?com=institucional&name=pubFile812&downloadname=>
 - [61] IDEAM, *Instructivo determinación Demanda Química de Oxígeno por reflujo Cerrado y volumetría*. 2024. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/mapa-de-procesos/slc-i016_instructivo_determinacion_demanda_quimica_de_oxigeno.pdf
 - [62] Diccionario del español de México, “edáfico”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://dem.colmex.mx/ver/ed%C3%A1fico>
 - [63] A. B. Patel, S. Shaikh, K. R. Jain, C. Desai, y D. Madamwar, “Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Sources, Toxicity, and Remediation Approaches”, *Front. Microbiol.*, vol. 11, nov. 2020, doi: 10.3389/FMICB.2020.562813/FULL.
 - [64] D. Kumar y D. Kumar, “Evaluation of Coking Coal Resources and Reserves”, *Management of Coking Coal Resources*, pp. 61–112, 2016, doi: 10.1016/B978-0-12-803160-5.00003-4.
 - [65] I. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, “Rocas sedimentarias”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.icgc.cat/es/Mapes-i-geoinformacio/Publicacions/Atlas/Atlas-geologico-de-Cataluna/Los-tipos-litologicos/Rocas-sedimentarias>

- [66] M. Water Technologies, “Eliminacion de Sólidos en Suspensión Aguas Residuales”. Consultado: el 27 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://mitawatertechnologies.com/es/aplicaciones/eliminacion-de-solidos-en-suspension/>
- [76] DANE. (2020) Colombia, exportaciones de café, carbón, petróleo y sus derivados, ferroníquel y no tradicionales.