

# Optimización del proceso de coquización a partir de la mezcla de materia prima: Caso Norte de Santander

## Optimization of the coking process from the raw material mix: Norte de Santander case.

DOI: <https://doi.org/10.17981/bilo.7.1.2025.06>

Fecha de recepción: 06/02/2025. Fecha de publicación: 26/02/2025

### Adriana Yuliet Serrano-Serrano

Ingeniera Industrial, Especialista en Dirección de Operaciones y Logística. Universidad de Santander, Cúcuta, Colombia. Correo de correspondencia: [02240681013@mail.udes.edu.co](mailto:02240681013@mail.udes.edu.co)

### Juan Camilo Acevedo-Paez

Ingeniero de Producción Agroindustrial, PhD en Ingeniería, Universidad de Santander, Cúcuta, Colombia. Correo: [jua.acevedo@mail.udes.edu.co](mailto:jua.acevedo@mail.udes.edu.co)

### Julio Cesar Contreras-Velasquez

Ingeniera Industrial, PhD en Ingeniería, Universidad de la Costa, Barraquilla, Colombia. Correo: [jcontrer30@cuc.edu.co](mailto:jcontrer30@cuc.edu.co)

Como citar en IEEE este artículo: Serrano-Serrano y otros, «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. No. 1, pp. 53-66, 2025. Online. <https://revistascientificas.cuc.edu.co/bilo/article/view/6277>

## Resumen

El Departamento Norte de Santander es uno de los principales productores de carbón y coque del país debido a las calidades de los carbones explotados en la región. El objetivo de este estudio es proponer un modelo de mezcla de carbón óptima que permita generar un buen rendimiento en los hornos y predecir las calidades del coque a producir, especialmente el contenido de ceniza, materia volátil y azufre con el fin de optimizar los costos de producción del coque a partir de la materia prima. La muestra utilizada proviene de 25 minas de carbón ubicadas en Norte de Santander, distribuidas en tres tipos de carbón alto volátil; tipo A, principalmente del municipio de El Zulia y Chucarima (Chitagá), tipo B, zona La Donjuana (Bochalema) y tipo C, del municipio de Sardinata. Se desarrollaron 3 tipos de mezclas y se realizó análisis próximo e índice de hinchamiento libre (FSI) a cada muestra. Como hallazgo se obtuvo una optimización del 1.85% del costo de la materia prima en el proceso de coquización, concluyendo que la mezcla óptima según calidad versus costo es la que utiliza carbones con la misma proporción de carbón tipo A y tipo B, un porcentaje balanceado de tipo C y una baja proporción de semiantracita, así mismo, se logró no solo la optimización de costos sino también de la materia prima de alta calidad “tipo A”, permitiendo hacer uso de carbones con bajo rango de calidad.

**Palabras claves:** carbón; coque; calidad; rendimiento; optimización.

## Abstract

The Department of Norte de Santander is one of the main coal and coke producers in the country due to the qualities of the coals exploited in the region. The objective of this study is to propose an optimal coal mixture model that allows generating a good performance in the ovens and predicting the qualities of the coke to be produced, especially the ash, volatile matter and sulfur content in order to optimize the coke production costs from the raw material. The sample used comes from 25 coal mines located in Norte de Santander, distributed in three types of high volatile coal; type A, mainly from the municipality of El Zulia and Chucarima (Chitagá), type B, La Donjuana area (Bochalema) and type C, from the municipality of Sardinata. Three types of mixtures were developed and proximate analysis and free swelling index (FSI) were performed on each sample. As a finding, an optimization of 1.85% of the cost of the raw material in the coking process was obtained, concluding that the optimum mixture according to quality versus cost is the one that uses coals with the same proportion of type A and type B coal, a balanced percentage of type C and a low proportion of semi-anthracite, likewise, not only the optimization of costs but also of the high quality raw material “type A” was achieved, allowing the use of coals with low quality range.

**Keywords:** coal; coke; quality; performance; optimization.

## Introducción

El carbón es uno de los principales recursos de energía a nivel mundial [1], [2]. Para Colombia la minería de carbón ha generado un impacto importante por sus beneficios a nivel macroeconómico, su aporte al desarrollo de las zonas productivas, su integración en la matriz energética del país y su empleo como materia prima en el sector industrial [3] [4]. Colombia es productor de carbón térmico y carbón metalúrgico. El carbón térmico es utilizado como fuente de energía al quemarse para generar vapor de agua que se emplea en la producción de electricidad y el carbón metalúrgico, también conocido como carbón coquizable, se utiliza principalmente como reductor químico en varios procesos industriales [3], especialmente en la producción de coque [5].

El carbón coquizable se diferencia de los otros carbones por sus características y la capacidad de formar coque con altas calidades a través del proceso de coquización. El coque es una de las materias primas más importantes y esenciales para el mineral de hierro en los altos hornos siderúrgicos y se genera al calentar un carbón o mezcla de carbones en hornos específicos sin presencia de oxígeno [6]. En los últimos años, el alto coste de los carbones coquizables de alta calidad ha impulsado a las empresas coquizadoras a optar por otras alternativas de materias primas para adicionar a las mezclas de carbón manteniendo la calidad del coque [7]. Por ende, la producción de coque requiere una mezcla de carbones de bajo costo, que genere un producto de alta calidad y garantice un buen rendimiento en los hornos [8].

Colombia tiene una posición privilegiada a nivel mundial, ya que cuenta con una variedad de carbón metalúrgico con características únicas que solo se producen en Norte de Santander y en una zona particular de China [9]. Norte de Santander es uno de los principales departamentos del país productores de carbón mineral y de coque. Existen variedad de mantos de carbón donde cada uno de ellos tiene una característica especial, por tal motivo los carbones son generalmente mezclados para lograr mejores propiedades y comportamientos durante el proceso de combustión comparados con las propiedades de un solo carbón específico, generando un rendimiento ideal en los hornos de producción de coque y adicional a esto generando un rendimiento importante en la granulometría de los subproductos, resultado de un proceso de cribado para cumplir con la dimensión requerida por el consumidor final, del mismo modo para la optimización de los costos de la materia prima.

De acuerdo a lo anterior, la presente investigación busca optimizar el proceso de coquización a partir de la generación de mezclas ideales de materia prima con los diversos carbones existentes en la zona minera de Norte de Santander.

## Estado del arte

### Coquización

El proceso de coquización es una de las técnicas de conversión más relevantes para el carbón [10]. Se puede describir como una serie de sucesos físicos, químicos y fisicoquímicos que se encargan de transformar un carbón o una combinación de carbones en coque [11]. La transformación del coque consiste en la incorporación de mezcla de carbones con las propiedades ideales, donde se calienta o destilan en ausencia de aire en los hornos [12], a altas temperaturas, liberando gases volátiles [13]. Existen diferentes tipos de hornos donde se puede realizar el proceso de coquización como hornos colmena, hornos tipo ranura, de solera y recovery plants, este último es un sistema sofisticado en el cual se recupera los volátiles liberados [14]. Los parámetros de calidad del coque dependen directamente de las características del carbón coquizable [15]. En la industria del coque es necesario utilizar materias primas con calidades inferiores que generen buen rendimiento y mantengan los parámetros de calidad para minimizar los costos [16], [17]. El coque es una materia prima esencial para los altos hornos en la producción de hierro y acero, por ende, es gran importancia que cumpla con las calidades adecuadas, ya que de estas depende el costo y la productividad [18], [19]. Durante un largo periodo de tiempo la calidad del coque ha sido un tema de estudio constante, y las investigaciones previas se han enfocado en el desarrollo de técnicas más eficaces para obtener coque de alta calidad [20]. La industria siderúrgica es considerada una de las mayores industrias a nivel global. Este sector representa aproximadamente el 20% del consumo energético del ámbito industrial del mundo, procedente mayormente del carbón y coque como fuentes de energía [21]. Sin embargo, es uno de los principales responsables de las emisiones industriales de dióxido de carbono, representando así hasta el 7% de las emisiones del mundo [22].

El carbón es un combustible fósil y en la actualidad es la fuente más utilizada a nivel mundial para la generación de electricidad [23], [24], además de otras diversas aplicaciones industriales. El principal productor y consumidor de carbón a nivel mundial es China, este producto ha llegado a ser la fuente principal de su estructura energética debido a la escasez de otros recursos como el petróleo y el gas natural [24]. Por otro lado, Colombia es uno de los principales productores y exportadores de carbón en el mundo, con una amplia diversidad de carbón térmico y coquizable [25], [26]. Los carbones colombianos pueden convertirse en rocas potencialmente generadoras de hidrocarburos [27]. Según las normas ASTM (siglas en inglés de American Society for Testing and Materials), los carbones se clasifican en los siguientes rangos: antracita, bituminoso, sub-bituminoso y lignita [28].

Norte de Santander es reconocido por su alta calidad y pureza en los carbones metalúrgicos, con un bajo contenido de fósforo y altos niveles de volátiles conocidos como tipo "A", lo cual resulta beneficioso para el departamento, ya que no todos los carbones colombianos tienen estas características. Así mismo, dispone de personal capacitado con experiencia en la explotación minera de carbón, una ubicación geográfica estratégica para acceder al océano Atlántico y reservas de carbón para más de 50 años [29], siendo Colombia el país con mayores reservas de América Latina [4], [26], [30], sin embargo, a pesar de disponer de grandes reservas con altas calidades en poder calorífico, también cuenta con carbones de bajos niveles, los cuales se hacen menos interesantes para el mercado de energías [30]. Para la economía local, la minería de carbón y la producción de coque tiene un efecto importante, dado que su aporte en el Producto Interno Bruto (PIB) para algunas regiones es mayor que su contribución nacional, para Norte de Santander, el carbón representa el 88,4% del total de las exportaciones del departamento [4], lo que contribuye al desarrollo regional y la generación de empleos.

### Mezclas de carbón para coquizar

Durante mucho tiempo el tema de predecir la calidad del coque ha sido de gran importancia debido a la complejidad de las mezclas de carbón empleadas a nivel mundial [7]. Para el mejoramiento de la calidad del carbón y la disminución de los costos de su mezcla, es crucial predecir la calidad del coque, así como también el esquema de mezcla del carbón [19], por lo tanto, es necesario usar eficientemente los carbones al momento de preparar las mezclas de carbón [31]. Existe un método eficaz llamado petrografía del carbón, el cual determina la correlación de la formulación de la mezcla de carbón con la predicción de la calidad del coque [32]. Las mezclas de carbón se forman mezclando diversos tipos de carbones de diferentes características en proporciones determinadas [19]. El uso de carbón no coquizable es muy común para realizar mezclas de carbón para la producción de coque debido a su bajo costo y sus características de calidad [17]. Es importante mencionar que la

coquización y resistencia del coque no solo depende de la mezcla de carbón sino también de otros factores como las condiciones climáticas [33], el estado de los hornos y la forma de recolección del producto, entre otros.

El objetivo de la investigación es proponer una mezcla de carbón que optimice la calidad a menor coste. La optimización hace referencia al logro de los objetivos o metas con resultados eficientes y beneficiosos usando la menor cantidad de recursos y costos posibles [34]. El propósito principal de la optimización es determinar la mejor opción dentro de un grupo de soluciones determinadas que sean las más eficientes u ofrezcan el rendimiento máximo posible dentro de las limitaciones establecidas [35].

## Metodología

La investigación se aborda desde un método deductivo lógico, donde a través de un proceso ordenado y lógico [26,37,38,39], que parte de la revisión bibliográfica e información secundaria para llegar a la construcción por deducción de una propuesta que optimice la mezcla de carbón originaria de minas en Norte Santander para obtener el producto de coque [40,41,42,43,44]. La muestra utilizada proviene de tres tipos de carbones altos volátiles de 25 minas y semiantracita. Los datos provienen de información de una empresa que produce coque, y la técnica de análisis es utilizando matrices comparativas de manera analítica determinando las variables de estudio.

## Desarrollo

La determinación de la materia prima óptima para el proceso de coquización de Norte de Santander es un ejercicio arduo que involucra múltiples análisis, por lo que se debe determinar cuáles son las minas de carbón que aportan los principales parámetros para el producto final, entendiéndose que la mezcla entre materias primas de diferentes tipos de carbón aporta calidades variables y disminuyen el costo de la misma. Las calidades del carbón y coque son regidas por las normas ASTM, por ende, se realizaron análisis próximo siguiendo los procedimientos estándar de determinación de humedad, ceniza, materia volátil, azufre e Índice de Hinchamiento Libre (FSI por sus siglas en inglés Free-Swelling Index) con los métodos de prueba D 3173, D 3174, D 3175, D 3177, D 3302, D 720 respectivamente [45], en base seca.

Se realizan mezclas con diferentes proporciones de carbones explotados en la región que de acuerdo con sus calidades se clasifican en 3 tipos según la norma ASTM D388: carbón bituminoso alto volátil, tipo A (bavA); bituminoso alto volátil, Tipo B (bavB) y bituminoso alto volátil, Tipo C (bavC).

Por otro lado, se aplica una baja proporción de semiantracita (sa) la cual se encuentra en el rango metamórfico entre antracita y bituminoso, este es un carbón con una materia volátil que oscila entre el 8% y el 14% [28]. En la tabla No. 1 se detallan los parámetros requeridos por cada tipo de carbón de Norte de Santander para generar mezclas de alta calidad y su costo actual en el mercado de la región.

**Tabla 1.** Calidades requeridas por tipo de carbón.

Tipo de carbón	Costo/Tonelada	Humedad (%)	Ceniza (%)	Azufre (%)	Materia volátil (%)	FSI
bavA	\$ 320,000	<6%	<8%	<0.8%	<37%	>7
bavB	\$ 300,000	<6%	<8%	<0.8%	<40%	>6
bavC	\$ 280,000	<6%	<6%	<0.8%	<44%	>4
sa	\$ 300,000	<6%	<13%	<1.5%	<15%	0

La semiantracita no es producida en Norte de Santander, estos mantos de carbón son característicos de Landázuri y Capitanejo (Santander). Así mismo, a pesar de su valor comercial elevado, se utiliza en las mezclas de carbón de Norte de Santander debido a que aporta resistencia al producto final, lo cual genera un mayor rendimiento en el proceso de cribado donde se aplica la granulometría requerida por el cliente.

De acuerdo con la investigación realizada se determinaron algunas minas de la región que cumplen con los parámetros de calidad establecidos según el tipo de carbón, por consiguiente, se detallarán las calidades de cada una.

- **Bituminoso alto volátil, Tipo A:** según las calidades generadas en la región, este material aporta una materia volátil baja a las mezclas que oscila entre 31 y 36%, lo que permite un mayor rendimiento en los hornos, pues la materia volátil es la impureza que se desprende durante el proceso de coquización en forma gaseosa, a su vez estos carbones aportan un alto FSI, superior a 7, siendo este el carbón ideal para el proceso de coquización, el cual aporta el mayor porcentaje de aglomeraciones para la definición del coque sólido. En la tabla 2, se muestran las diferentes minas que producen este tipo de carbón, ubicadas en diversas zonas de la región, principalmente en El Zulia, San Faustino y Chucarima (Chitagá).

**Tabla 2.** Calidad minas carbón bituminoso alto volátil tipo A.

Mina	Zona de la región	Producción /Mes	Humedad (%)	Ceniza (%)	Materia volátil (%)	FSI	Azufre (%)
Mina 1	Chitagá	1400	5.92	6.09	32.05	8.0	0.65
Mina 2	El Zulia	3000	2.31	7.75	34.73	8.5	0.42
Mina 3	El Zulia	3000	5.8	5.69	33.35	8.5	0.60
Mina 4	Chucarima (Chitagá)	1800	3.47	4.31	32.04	8.5	0.50
Mina 5	Chucarima (Chitagá)	2000	2.54	3.81	32.7	8.5	0.58
Mina 6	Cerro Tasajero (San Faustino)	1500	4.5	7.95	36.05	8.0	0.70
Mina 7	Cerro Tasajero (San Faustino)	1300	3.64	7.65	36.16	7.5	0.80
Mina 8	Toledo	1000	6.9	7.05	31.49	8.5	0.60
<b>Total calidad promedio</b>		<b>15000</b>	<b>4.16</b>	<b>6.21</b>	<b>33.65</b>	<b>8.32</b>	<b>0.58</b>

- **Bituminoso alto volátil, Tipo B:** aporta una materia volátil que oscila entre el 37 y 40% y, un FSI superior a 6. A continuación, la tabla 3 detalla las minas y la respectiva calidad de estos carbones:

**Tabla 3.** Calidad minas carbón bituminoso alto volátil tipo B.

Mina	Zona de la región	Producción /Mes	Humedad (%)	Ceniza (%)	Materia volátil (%)	FSI	Azufre (%)
Mina 1	San Pedro (Cúcuta)	1400	8.59	7.35	39.13	6.0	0.52
Mina 2	El Zulia	1200	6.21	7.45	38.10	7.0	0.80
Mina 3	La Donjuana (Bochalema)	1500	4.21	6.39	37.46	7.5	0.74
Mina 4	Salazar	1200	2.69	8.01	39.07	6.5	0.76
Mina 5	La Donjuana (Bochalema)	1200	2.47	6.32	40.01	6.5	0.65
<b>Total calidad promedio</b>		<b>6500</b>	<b>4.62</b>	<b>7.08</b>	<b>38.71</b>	<b>6.72</b>	<b>0.66</b>

- **Bituminoso alto volátil, Tipo C:** aporta ceniza y azufre bajo, sin embargo, contiene material volátil alto que oscila entre el 41 y 46% de la composición química del material, así mismo, contiene un índice de

hinchamiento libre superior a 4, no obstante, una proporción adecuada de este material no afecta significativamente la calidad de las mezclas. Estos carbones son explotados principalmente en el municipio de Sardinata. La tabla 4, muestra las diversas minas de la región y sus calidades.

**Tabla 4.** Calidad minas carbón bituminoso alto volátil tipo C.

Mina	Zona de la región	Producción /Mes	Humedad (%)	Ceniza (%)	Materia volátil (%)	FSI	Azufre (%)
Mina 1	Las Mercedes (Sardinata)	800	5.43	5.43	42.77	4.5	0.54
Mina 2	Las Mercedes (Sardinata)	600	7.60	6.09	43.61	4.5	0.63
Mina 3	San Roque (Sardinata)	2500	7.45	6.17	43.73	5.5	0.56
Mina 4	El Zulia	1000	4.89	6.66	42.75	4.5	0.60
Mina 5	Pacelli (Tibú)	700	6.36	5.24	44.49	4.5	0.50
Mina 6	Salazar	600	4.99	6.82	41.70	5.0	0.64
Mina 7	Fatibar (Sardinata)	600	5.16	6.06	43.53	6.0	0.57
Mina 8	Fatibar (Sardinata)	1200	4.32	6.10	42.25	5.5	0.71
Mina 9	San Roque (Sardinata)	800	4.50	6.04	42.86	4.5	0.61
Mina 10	San Roque (Sardinata)	400	5.53	6.53	42.26	5.0	0.56
Mina 11	San Roque (Sardinata)	600	3.21	6.93	41.62	4.5	0.60
Mina 12	Salazar	700	2.00	6.04	42.83	4.5	0.53
<b>Total calidad promedio</b>		<b>10500</b>	<b>5.46</b>	<b>6.16</b>	<b>43.01</b>	<b>4.GG</b>	<b>0.5G</b>

#### Parámetros óptimos de una mezcla de carbón para coquizar.

Los parámetros de las mezclas son variables, pues dependen de la calidad del producto que se quiere obtener según lo establecido o el requerimiento del cliente final. A continuación, en la tabla 5, se pueden observar parámetros establecidos de la mezcla de materia prima:

**Tabla 5.** Parámetros óptimos de mezcla de carbón

Humedad (%)	Ceniza (%)	Azufre (%)	Materia volátil	FSI
6%	8%	0.80%	36%	7

Es importante destacar que las cenizas en la producción del coque pueden incrementar aproximadamente en un 3% en el proceso de coquización respecto a la mezcla de carbón, esta depende también de la forma en la que se realice el procedimiento del deshorne, donde el trinchado manual es la forma más limpia de recolección del producto después del deshorne. Por otro lado, el azufre a diferencia de la ceniza disminuye durante la coquización. Existen tres tipos de azufre tales como: azufre pirítico, sulfúrico y orgánico, estos se determinan mediante un análisis llamado formas de azufre, en el cual se determina el porcentaje de cada uno, siendo el azufre pirítico el que se reduce, conservándose los demás.

### Mezclas de carbón para el proceso de producción de coque.

Se realizaron 3 mezclas con diferentes características de calidad y costo, el objetivo es optimizar los costos de la materia prima y generar un mayor rendimiento en la producción del coque, manteniendo los parámetros de calidad establecidos o según los requiera el cliente final (beneficio calidad/costo). Sin embargo, se debe tener en cuenta que el rendimiento de la materia prima no solo depende de la mezcla, sino también del procedimiento realizado durante la coquización y del buen funcionamiento de los hornos, donde la temperatura de estos tiene un rol importante.

Por otro parte, para la elaboración de las mezclas es importante tener en cuenta la secuencia de carbones que se deben aplicar para una correcta homogenización, de esto depende el éxito de la mezcla. La secuencia se realiza dependiendo de la cantidad de mezcla a preparar y del aforo de la pala del cargador, para así determinar la cantidad de paladas a usar de cada tipo de carbón.

La secuencia se estableció según la capacidad de la pala del cargador de 5 toneladas y para cada 100 toneladas.

El procedimiento de mezclar los carbones inicia armando un cono de material siguiendo la secuencia formulada, posterior a esto se desplaza este primer cono a un segundo cono, levantando la pala del cargador al punto más alto y soltando el material al cono 2, esto con el fin de homogenizar el material que conformaba el cono 1.

- **Mezcla 1:** Es una mezcla balanceada aplicando los diferentes tipos de carbón y cumpliendo con los parámetros necesarios para que se ejecute el proceso de coquización. En tabla No. 6, se especifica las cantidades a utilizar de cada tipo de carbón y su costo por tonelada, con el fin de obtener el costo promedio de la mezcla:

**Tabla 6.** Mezcla de materia prima 1.

Tipo de Carbón	Aporte %	Toneladas	Humedad (%)	Cenizas (%)	Materia Volátil (%)	FSI	Azufre (%)	Costo/Tonelada
bavA	35%	210	4.16	6.21	33.65	8.32	0.58	\$ 320,000
bavB	35%	210	4.92	7.08	38.71	6.72	0.69	\$ 300,000
bavC	25%	150	5.46	6.16	43.01	4.99	0.59	\$ 280,000
sa	5%	30	6.00	13.00	15.00	0.00	1.50	\$ 300,000
<b>Promedio total</b>		<b>600</b>	<b>4.84</b>	<b>6.84</b>	<b>36.83</b>	<b>6.51</b>	<b>0.67</b>	<b>\$ 302,000</b>

**Secuencia.** Esta inicia utilizando los carbones de mayor aporte en la mezcla y aplicando en el intermedio de la mezcla los carbones con menor aporte para lograr así una buena homogenización. Secuencia 1; por cada 2 paladas de carbón tipo A se aplica 2 paladas de tipo B y 1 palada de tipo C; secuencia 2, 1 palada de tipo A, 1 palada de tipo B y 1 palada de tipo C; secuencia 3, aplicar una palada de cada tipo de carbón, y así sucesivamente hasta completar el total de secuencias relacionadas en la tabla no. 7.

**Tabla 7.** Secuencia mezcla de materia prima 1.

Tipo de Carbón	% Participación	S1	S2	S3	S4	S5	TOTAL PALADAS
sa	5%			1			1
bavA	35%	2	1	1	1	2	7
bavB	35%	2	1	1	1	2	7
bavC	25%	1	1	1	1	1	5
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>20</b>

S: Secuencia (expresada en paladas)

- **Mezcla 2.** Se observa en la tabla 8, una mezcla de excelente calidad debido al alto aporte de carbón tipo A que contiene, sin embargo, se debe tener en consideración el costo elevado que genera.

**Tabla 8.** Mezcla de materia prima 2.

Tipo de Carbón	Aporte %	Toneladas	Humedad (%)	Cenizas (%)	Materia Volátil (%)	FSI	Azufre (%)	Costo/Tonelada
bavA	62%	372	4.16	6.21	33.65	8.3	0.58	\$ 320,000
bavB	24%	144	4.92	7.08	38.71	6.7	0.69	\$ 300,000
bavC	11%	66	5.46	6.16	43.01	5.0	0.59	\$ 280,000
sa	3%	18	6.00	13.00	15.00	0.0	1.50	\$ 300,000
<b>Promedio total</b>		<b>600</b>	<b>4.54</b>	<b>6.62</b>	<b>35.33</b>	<b>7.32</b>	<b>0.64</b>	<b>\$ 310,200</b>

**Secuencia.** Secuencia 1, por cada 3 paladas de carbón Tipo A se mezcla 1 palada de carbón Tipo B; secuencia 2, por cada 2 paladas de carbón tipo A se aplica 1 palada de tipo B y 1 palada de tipo C; secuencia 3, 1 palada de semiantracita por 2 paladas de tipo A, 1 palada de tipo B y una palada de tipo C, y así sucesivamente hasta completar el total de secuencias como se muestran en la tabla no. 9.

**Tabla 9.** Secuencia mezcla de materia prima 2.

Tipo de Carbón	% Participación	S1	S2	S3	S4	S5	TOTAL PALADAS
sa	3%			1			1
bavA	62%	3	2	2	2	3	12
bavB	24%	1	1	1	1	1	5
bavC	11%		1	1			2
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>20</b>

S: Secuencia (expresada en paladas)

- **Mezcla 3.** Según se observa en la tabla 10, el mayor aporte para esta mezcla es de carbón Tipo C, su bajo FSI y material volátil alto hace que sea una mezcla de baja calidad, pero con un costo bajo, estas características podrían traer consecuencias, ocasionando que como resultado se obtenga producto crudo (carbón sin coquizar) y una materia volátil elevada aproximada al 2%.

**Tabla 10.** Mezcla de materia prima 3

Tipo de Carbón	Aporte %	Toneladas	Humedad (%)	Cenizas (%)	Materia Volátil (%)	FSI	Azufre (%)	Costo/Tonelada
bavA	20%	120	4.16	6.21	33.65	8.3	0.58	\$ 320,000
bavB	35%	210	4.92	7.08	38.71	6.7	0.69	\$ 300,000
bavC	40%	240	5.46	6.16	43.01	5.0	0.59	\$ 280,000
sa	5%	30	6.00	13.00	15.00	0.0	1.50	\$ 300,000
<b>Promedio total</b>		<b>600</b>	<b>5.04</b>	<b>6.83</b>	<b>38.23</b>	<b>6.01</b>	<b>0.67</b>	<b>\$ 266,000</b>

**Secuencia.** Secuencia 1, se aplica 1 palada de carbón Tipo A por 2 paladas de carbón Tipo B y 1 palada de tipo C; secuencia 2, 1 palada de carbón tipo A, 1 palada de tipo B y 2 paladas de tipo C; secuencia 3, 1 palada de semiantracita por 2 paladas de tipo B y 2 paladas de tipo C, y así sucesivamente hasta completar el total de secuencias como se muestran en la tabla no. 11.

**Tabla 11.** Secuencia mezcla de materia prima 3.

Tipo de Carbón	% Participación	S1	S2	S3	S4	S5	TOTAL PALADAS
sa	5%			1			1
bavA	20%	1	1		1	1	4
bavB	35%	2	1	2	1	1	7
bavC	40%	1	2	2	2	1	8
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>20</b>

S: Secuencia (expresada en paladas)

## Resultados

Se realizaron análisis próximos con el fin de determinar la calidad del coque producido según las mezclas de carbón propuestas, los resultados se presentan en la tabla 12. Se aprecia que las diferentes mezclas dieron como resultado un coque con pequeñas variaciones en el contenido de ceniza, materia volátil y azufre, estas variaciones dependen de las características propias de los carbones utilizados conforme a la cantidad aplicada de cada tipo de carbón, en el cual durante el proceso de coquización el contenido de ceniza se produce al ser un componente químico del carbono y el material volátil se quema y se desprende por medio de gases.

Por otro lado, para las empresas coquizadoras las variables en calidad son de gran relevancia puesto que se debe cumplir con la calidad requerida optimizando costos, en ese sentido, es importante diseñar una mezcla que esté dentro de los límites de la calidad solicitada por el cliente y que permita aumentar la cantidad de materia prima de bajo costo, disminuyendo el costo general de la mezcla e incrementar el margen de utilidad.

**Tabla 12.** Resultados de análisis de coque bruto según las mezclas.

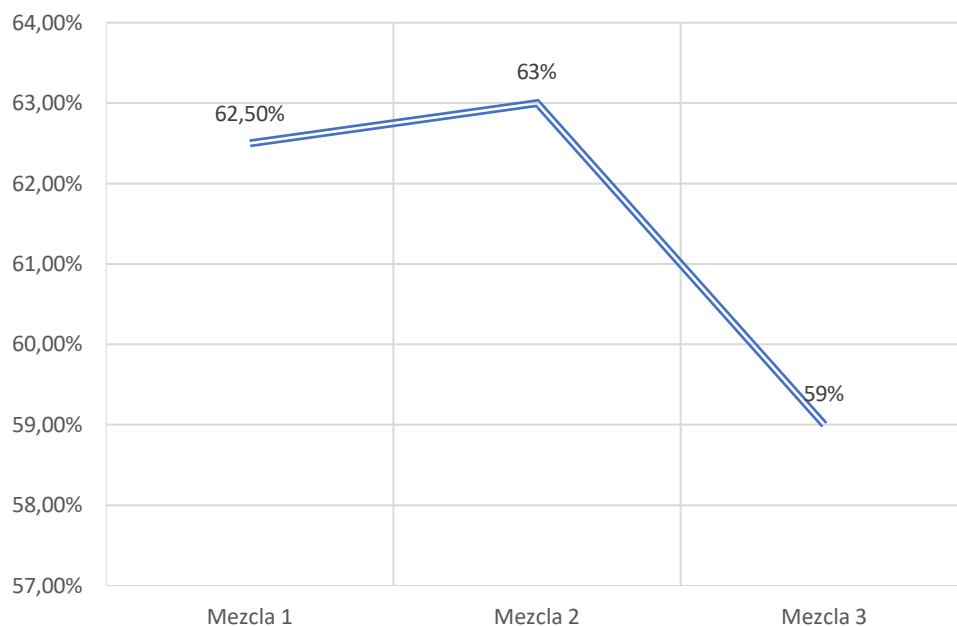
Mezcla	Humedad (%)	Cenizas (%)	Materia Volátil (%)	Azufre (%)
Mezcla 1	2.81	9.8	1.2	0.61
Mezcla 2	2.51	9.6	1.0	0.60
Mezcla 3	3.01	9.8	1.8	0.63

Los parámetros establecidos de la calidad del coque se presentan en la tabla 13. Según se observa, la mezcla 2 presenta las mejores condiciones técnicas, esto se debe a la alta calidad de los carbones que la componen, dado que la mayor contribución es de carbón tipo A. Así mismo, la mezcla 3 no cumple con los estándares establecidos, ya que contiene material volátil superior al 1.2%.

**Tabla 13.** Parámetros establecidos calidad del coque.

Humedad (%)	Ceniza (%)	Materia volátil	Azufre (%)
4%	9.8%	1.2%	0.70%

En el gráfico 1, se observa el rendimiento de producción de las mezclas realizadas, dejando en evidencia que la mezcla 2 generó el mayor rendimiento. Se analiza que la mezcla 1 generó un rendimiento de 62.5% de producto respecto a la mezcla, esto debido al balance de materia volátil que contenía y su alto FSI. La mezcla 2, obtiene un producto con altas calidades, generando un rendimiento de 63% de coque respecto a la mezcla. Finalmente, la mezcla 3, generó un rendimiento del 59%, y tiene como resultado una alta materia volátil, dado que la mayor proporción de la mezcla es de carbón Tipo C.



**Gráfico 1.** Rendimiento de las mezclas propuestas.

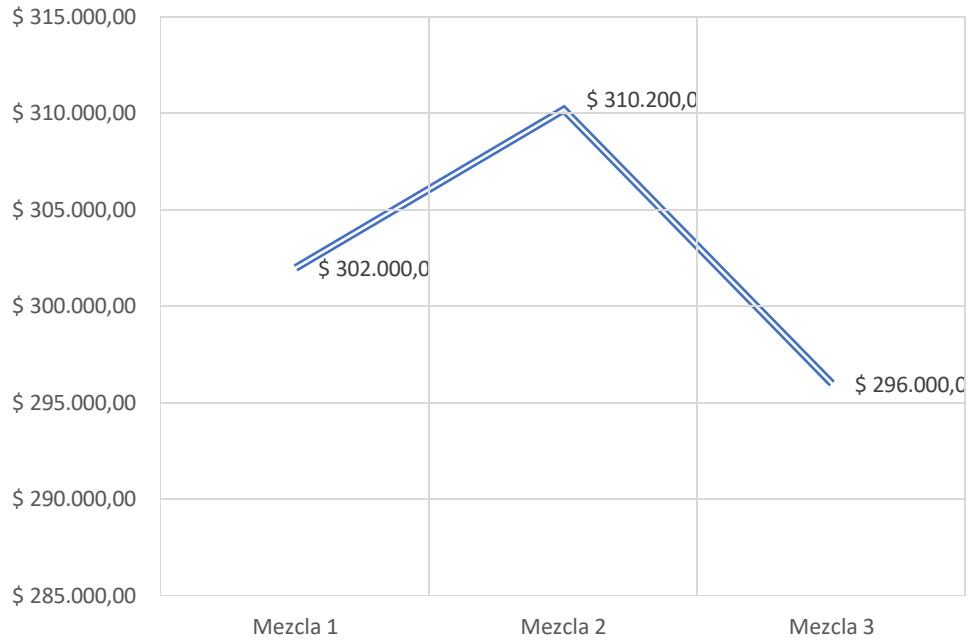
### Análisis de costos.

Se realiza el análisis del costo de la mezcla de acuerdo con el rendimiento generado con el fin de determinar la mezcla con el menor costo de producción por tonelada de coque, según se muestra en la tabla 14.

**Tabla 14.** Análisis de costos de la mezcla de materia prima y producción de coque.

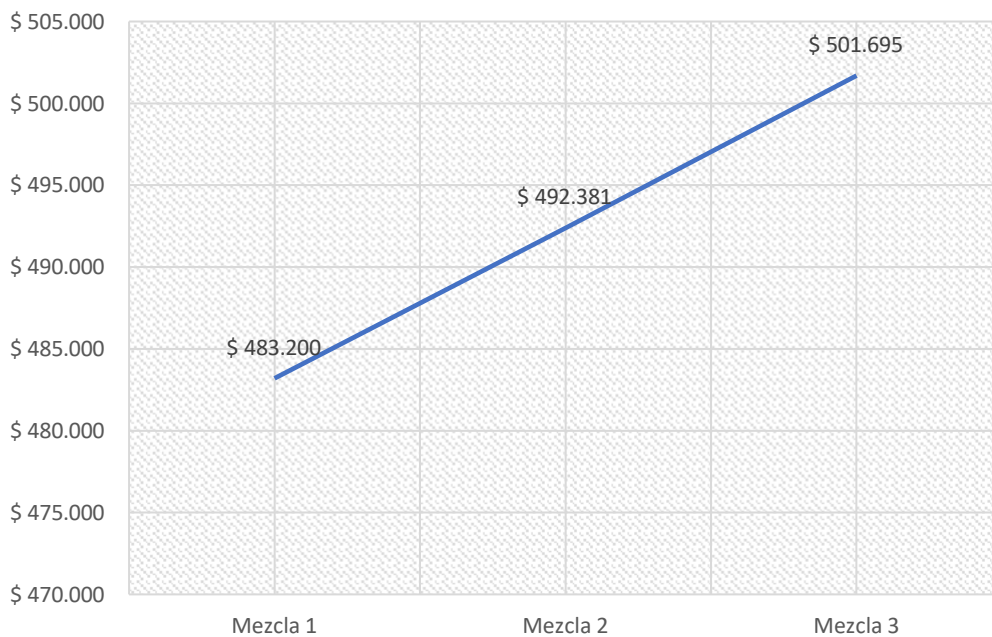
Mezcla	Toneladas mezcla	Costo/tonelada mezcla	Total costo mezcla	Rendimiento Mezcla	Toneladas coque producidas	Costo tonelada coque
Mezcla 1	600	\$ 302,000	\$ 181,200,000	62.50%	375	\$ 483,200
Mezcla 2	600	\$ 310,200	\$ 186,120,000	63.00%	378	\$ 492,381
Mezcla 3	600	\$ 296,000	\$ 177,600,000	59.00%	354	\$ 501,695

En el gráfico 2, se puede evidenciar que la mezcla de materia prima de menor costo es la 3 y 1, respectivamente, la diferencia de costo se debe a la cantidad utilizada de cada tipo de carbón, puesto que aportan diversas propiedades fisicoquímicas.



**Gráfico 2.** Costo de la mezcla de materia prima por tonelada.

El gráfico 3 evidencia que la mezcla 1 y 2 tienen el menor costo de producción de coque por tonelada. El costo de producción de coque depende del costo de la mezcla de la materia prima y del rendimiento generado en el proceso de coquización, por tanto, existe diferencia en el costo de producción de las tres mezclas, siendo la mezcla 1 la más económica, logrando optimizar \$9,181 por tonelada producida respecto a la mezcla 2. De acuerdo con lo anterior, esta mezcla permite optimizar un total de \$3,442,857 por cada mezcla de 600 toneladas, equivalente al 1.85%.



**Gráfico 3.** Costo de producción del coque por tonelada.

Al realizar el análisis de costo versus calidad, se determina que la mezcla óptima es la 1, debido a que tiene el menor costo de producción y su calidad se encuentra dentro de estándares establecidos en la tabla 13, así mismo, la materia prima de la mezcla es balanceada, es decir, utiliza proporciones adecuadas de cada tipo de carbón. Esta mezcla solo utiliza el 35% de carbón tipo A, lo cual es beneficioso dado que, debido a la competencia de la región, la materia prima con estas propiedades es muy demandada.

## Conclusiones

La mezcla 2 generó el mayor rendimiento en los hornos de 63%, debido a la composición de alta calidad de la materia prima, alcanzando un costo de producción por tonelada de coque de \$492,381. Sin embargo, el costo de producción de la mezcla 1 es de \$483,200, siendo esta de menor costo, logrando optimizar \$9,181 por tonelada respecto a la mezcla 1.

La mezcla 1 es la óptima según calidad versus costo, esta utiliza carbones con las mismas proporciones de carbón tipo A y tipo B, un porcentaje balanceado de tipo C y una baja proporción de semiantracita que le aporta dureza. Obteniendo optimizar un total de \$3,442,857 por cada 600 toneladas de materia prima. Así mismo, se obtuvo una optimización no solo de costos sino también de la materia prima de alta calidad “tipo A”, haciendo uso de carbones con características de calidad bajas.

Los carbones con material volátil alto, tipo A, son los más adecuados para el proceso de coquización, sin embargo, debido a su alto costo se hace necesario el uso de carbones con bajas características con el fin de disminuir el costo de las mezclas y, por ende, el costo de producción generando un buen rendimiento en los hornos y manteniendo los parámetros de calidad del coque.

La mezcla 3 siendo la más económica no generó un buen rendimiento, resultado de las características de los carbones que la componen, por ende, el costo de producción del coque es el más elevado. En ese sentido, se debe hacer buen uso de estos carbones, siempre buscando balancear las mezclas, para que estas generen un buen rendimiento y se mantengan las calidades del producto final.

## Referencias

- [1] S. Yao et al., “Optimizing analysis of coal property using laser-induced breakdown and near-infrared reflectance spectroscopies,” *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc*, vol. 239, p. 118492, Oct. 2020, doi: 10.1016/J.SAA.2020.118492.
- [2] Y. Shen, Y. Hu, M. Wang, W. Bao, L. Chang, and K. Xie, “Speciation and thermal transformation of sulfur forms in high-sulfur coal and its utilization in coal-blending coking process: A review,” *Chin J Chem Eng*, vol. 35, pp. 70–82, jul. 2021, doi: 10.1016/J.CJCHE.2021.04.007.
- [3] P. Bustamante, R. García, O. Maya, J. Rodríguez, and T. Aguilar, “MINERÍA DE CARBÓN EN COLOMBIA TRANSFORMANDO EL FUTURO DE LA INDUSTRIA,” 2021.
- [4] G. Aristizabal-H, P. Goerke-Mallet, J. Kretschmann, and O. J. Restrepo-Baena, “Sustainability of coal mining. Is Germany a post-mining model for Colombia?” *Resources Policy*, vol. 81, p. 103358, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.RESOURPOL.2023.103358.
- [5] A. Mohanty, S. Chakladar, S. Mallick, and S. Chakravarty, “Structural characterization of coking component of an Indian coking coal,” *Fuel*, vol. 249, pp. 411–417, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.FUEL.2019.03.108.
- [6] M. Matyjaszek, K. Wodarski, A. Krzemień, C. Escanciano García-Miranda, and A. Suárez Sánchez, “Coking coal mining investment: Boosting European Union’s raw materials initiative,” *Resources Policy*, vol. 57, pp. 88–97, Aug. 2018, doi: 10.1016/J.RESOURPOL.2018.01.012.

- [7] B. D. Flores *et al.*, “How coke optical texture became a relevant tool for understanding coal blending and coke quality,” *Fuel Processing Technology*, vol. 164, pp. 13–23, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.FUPROC.2017.04.015.
- [8] M. A. Díez, R. Álvarez, and C. Barriocanal, “Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for cokemaking,” *Int J Coal Geol*, vol. 50, no. 1–4, pp. 389–412, May 2002, doi: 10.1016/S0166-5162(02)00123-4.
- [9] “LA INDUSTRIA DEL COQUE EN COLOMBIA TIENE FUTURO,” Federación Nacional de Productores de Carbón – Fenalcarbón.
- [10] Z. Liu *et al.*, “Generation and emission mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) during the coking process in Shanxi, China,” *Science of The Total Environment*, vol. 948, p. 174619, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2024.174619.
- [11] C. Guerrero Tamayo, “Construcción de un modelo de mezcla de carbones colombianos para la producción de coque. Aplicación de análisis petrográficos, reológicos y termogravimétricos,” 2012. Accessed: oct. 26, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/11456/197434.2012.pdf?sequence=1>
- [12] S. Romero, “Aspectos prácticos de la coquización en Cundinamarca y Boyacá,” *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 14, no. 2, pp. 37–41, 2014.
- [13] A. Quitian and J. L. Grosso, “DESARROLLO DE UN PROCESO PARA LA RECUPERACIÓN DEL MATERIAL VOLÁTIL POR ARRASTRE DE VAPOR DE CARBONES METALÚRGICOS DE LA REGIÓN DE SAMACÁ (BOYACÁ),” *Revista ION*, vol. 23, no. 1, pp. 29–40, 2010.
- [14] C. Ojeda Montealegre, “ESTUDIO COGENERACIÓN A PARTIR DEL CALOR RESIDUAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE COQUE METALÚRGICO,” Tesis de maestría, Universidad de Los Andes, Bogotá, 2003. Accessed: Oct. 26, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/a73919d2-b470-4a4f-b994-5b094886545c/content>
- [15] A. Dyczko, “Real-time forecasting of key coking coal quality parameters using neural networks and artificial intelligence,” *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, vol. 38, no. 3, pp. 105–117, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.3.9>.
- [16] M. Kumar and H. P. Tiwari, “Efficient utilization of Indian Coking Coal: Opportunities and challenges,” *Metall. Res. Technol.*, vol. 117, no. 2, p. 209, 2020, doi: 10.1051/metal/2020017.
- [17] H. P. Tiwari, P. K. Banerjee, V. K. Saxena, R. Sharma, S. K. Haldar, and S. Verma, “Efficient way to use of non-coking coals in non-recovery coke making process,” *Metall. Res. Technol.*, vol. 111, no. 4, pp. 211–220, 2014, doi: 10.1051/metal/2014026.
- [18] N. Sharma and H. P. Tiwari, “Techno-economic assessment for metallurgical coals: a ‘value-in-use’ approach,” *Metall. Res. Technol.*, vol. 121, no. 3, p. 306, 2024, doi: 10.1051/metal/2024026.
- [19] Y. Yuan, Q. Qu, L. Chen, and M. Wu, “Modeling and optimization of coal blending and coking costs using coal petrography,” *InfSci (N Y)*, vol. 522, pp. 49–68, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.INS.2020.02.072.
- [20] S. S. Makgato, R. M. S. Falcon, and E. M. N. Chirwa, “Reduction in coal fines and extended coke production through the addition of carbonisation tar: Environmentally clean process technology,” *J Clean Prod*, vol. 221, pp. 684–694, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2019.02.242.
- [21] S. Safarian, “To what extent could biochar replace coal and coke in steel industries?” *Fuel*, vol. 339, p. 127401, May 2023, doi: 10.1016/J.FUEL.2023.127401.

- [22] B. Brooks, S. K. Rish, H. Lomas, A. Jayasekara, and A. Tahmasebi, “Advances in low carbon cokemaking – Influence of alternative raw materials and coal properties on coke quality,” *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 173, p. 106083, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.JAAP.2023.106083.
- [23] C. F. Valdés, G. Marrugo, F. Chejne, J. D. Román, and J. I. Montoya, “Effect of atmosphere reaction and heating rate on the devolatilization of a Colombian sub-bituminous coal,” *J Anal Appl Pyrolysis*, vol. 121, pp. 93–101, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.JAAP.2016.07.007.
- [24] Z. Peng, X. Ning, G. Wang, J. Zhang, Y. Li, and C. Huang, “Structural characteristics and flammability of low-order coal pyrolysis semi-coke,” *Journal of the Energy Institute*, vol. 93, no. 4, pp. 1341–1353, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.JOEI.2019.12.004.
- [25] R. Barrera Zapara, J. F. Pérez Bayer, and C. Salazar Jiménez, “Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas,” *Revista ION*, vol. 27, no. 2, pp. 43–54, 2015.
- [26] G. R. O. Patricia, A. Blandón, C. Perea, and M. Mastalerz, “Petrographic characterization, variations in chemistry, and paleoenvironmental interpretation of Colombian coals,” *Int J Coal Geol*, vol. 227, p. 103516, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.COAL.2020.103516.
- [27] A. Blandon, N. Parra, G. E. Gorin, and F. Arango, “Adapting palynological preparation methods in subbituminous and bituminous coals from Colombia to improve palynofacies and hydrocarbon source rock evaluations,” *Int J Coal Geol*, vol. 73, no. 2, pp. 99–114, Jan. 2008, doi: 10.1016/J.COAL.2007.02.008.
- [28] “ASTM D388 - CLASIFICACIÓN”.
- [29] J. A. Cano, C. A. Panizo, F. H. García, and J. E. Rodríguez, “Strategies for improving the supply chain of coal in Norte de Santander, Colombia,” *Boletín de Ciencias de la Tierra*, vol. 38, pp. 65–74, 2015.
- [30] J. Piñeres, W. Pertuz, and J. Castro, “Effect of pH and agitation time on combustible recovery and ash rejection in a coal sample using selective hydrophobic coagulation,” *Ingeniería y competitividad*, vol. 20, no. 2, pp. 99–108, 2018, doi: <https://doi.org/10.25100/iyc.v20i2.6408>.
- [31] L. Kieush *et al.*, “Investigation into the Effect of Multi-Component Coal Blends on Properties of Metallurgical Coke via Petrographic Analysis under Industrial Conditions,” *Sustainability*, vol. 14, no. 16, 2022, doi: 10.3390/su14169947.
- [32] B. Ghosh, B. K. Sahoo, P. K. Jha, K. K. Manjhi, J. N. Sahu, and A. K. Varma, “Effect of Microlithotype Maceral Distribution on Coke Quality,” *Coke and Chemistry*, vol. 63, no. 6, pp. 294–302, 2020, doi: 10.3103/S1068364X20060058.
- [33] Kumar Deepak, Tiwari H.P., Saxena Vinod K., Khullar Binod K., Singh Ranjan K., and Bhattacharyya Sandip K., “Effects of natural weathering on intrinsic properties of coal and coke quality,” *Metall. Res. Technol.*, vol. 116, no. 1, p. 111, 2019, doi: 10.1051/metal/2018048.
- [34] D. González, A. Aldana, E. Ramírez, and A. Morillas, “Factores que influyen en la optimización de los recursos en empresas de servicio social,” *Revista Venezolana de Gerencia (RVG)*, vol. 25, no. 4, pp. 180–194, 2020.
- [35] S. Phommixay, M. L. Doumbia, and D. Lupien St-Pierre, “Review on the cost optimization of microgrids via particle swarm optimization,” *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 73–89, 2020, doi: 10.1007/s40095-019-00332-1.
- [36] Y. A. Picón-Jaimes, “Innovation and digital transformation in health education: opportunities to drive technological development in the training of future professionals,” *Inge CUC*, vol. 20, no. 1, 2024.

- [37] C. A. P. Rodríguez, L. M. S. Martínez y D. H. P. Ordoñez, “Effort estimation in agile software development: A systematic map study,” *Inge CUC*, vol. 19, no. 2, 2023.
- [38] A. F. González-Pedraza, Y. A. C. Barrios y J. C. Escalante, “Soil salinization in agricultural areas of the Caribbean region and agroecological recovery strategies: Review,” *Inge CUC*, vol. 18, no. 1, 2022.
- [39] D. C. L. Tamayo, J. M. L. Lezama y W. M. Villa, “Mean-variance mapping optimization algorithm applied to the optimal reactive power dispatch,” *Inge CUC*, vol. 17, no. 1, 2021.
- [40] K. Pimiento y M. J. C. González, “Evaluación del tratamiento preliminar y primario para las aguas residuales del procesamiento industrial de alimentos en La Grita (Venezuela),” *Inge CUC*, vol. 17, no. 1, 2021.
- [41] L. C. González, N. C. Novoa y A. B. Sanjuán, “Alternativas orgánicas para el logro de producciones más limpias de la fresa en Pamplona, Norte de Santander,” *Inge CUC*, vol. 16, no. 2, 2020.
- [42] H. A. Ordoñez, C. C. Ordoñez y J. A. Ordoñez, “Jurisprudence search in Colombia based on natural language processing (NLP) and Linked Data,” *Inge CUC*, vol. 16, no. 1, 2020.
- [43] J. R. Vásquez, D. S. A. Salazar y C. M. M. Abril, “Análisis basado en optimización de externalidades negativas del servicio de transporte público urbano: Un caso de estudio,” *Inge CUC*, vol. 17, no. 1, 2021.
- [44] Y. A. Fernández, D. F. Marrero y M. E. M. Montero, “Liquid Nitrogen as promotor of seeds germination and seedling growth in tropical legumes,” *Inge CUC*, vol. 17, no. 1, 2021.
- [45] “NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4196 CLASIFICACIÓN DEL CARBÓN POR RANGO,” 2009.