



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Metodología de balance de masa y predicción de indicadores metalúrgicos en plantas de lavado de carbones.

Napoleón Ruiz Rave

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas- Departamento de Materiales

Medellín, Colombia

2021

Metodología de balance de masa y predicción de indicadores metalúrgicos en plantas de lavado de carbones.

Napoleón Ruiz Rave

Tesis o trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Recursos Minerales

Director:

PhD. Moisés Oswaldo Bustamante Rúa

Línea de Investigación:

Explotación y Beneficio

Grupo de Investigación:

Instituto de Minerales CIMEX

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas- Departamento de Materiales

Medellín, Colombia

2021

“No puede existir un lenguaje más universal y simple, más carente de errores y oscuridades, y por lo tanto más apto para expresar las relaciones invariables de las cosas naturales. Las matemáticas parecen constituir una facultad de la mente humana destinada a compensar la brevedad de la vida y la imperfección de los sentidos.”

Joseph Fourier

Agradecimientos.

Quiero agradecer principalmente a Dios por permitirme lograr este paso tan importante en mi vida profesional y académica. Al profesor Oswaldo Bustamante Rúa, por ser un pilar fundamental en el desarrollo de este proceso, brindándome sus conocimientos y experiencias en el mundo de la ingeniería. A mis queridos compañeros de estudio, que me acompañaron siempre en diferentes facetas de nuestra formación. A la Universidad Nacional de Colombia, por esa hermosa labor de formarme y capacitarme como profesional integral. Al instituto de minerales CIMEX, en donde pude observar de manera presencial todos estos conceptos mineralúrgicos y comprenderlos de mejor manera.

Agradezco especialmente a mi madre, Alba Rave, que sin ella todo este proceso no hubiese sido posible.

Resumen.

En una planta de lavado se efectúa la separación de carbón y estériles procedentes de respaldos (pisos, techos e intercalaciones) del manto de explotación. Esta operación es de vital importancia en la refinación de carbón, debido a que intrínsecamente los mantos poseen un alto grado de contaminación (minerales) lo cual afecta el poder calorífico de los carbones. Actualmente la planta de lavado de Cerrejón Colombia usa para este fin, la separación gravitacional por medios densos, la cual se basa en la utilización de pseudofluidos compuestos por suspensiones de agua con magnetita.

La empresa desde tiempo atrás identificó que los ajustes de producción de los inventarios de la pila de carbón proveniente de la planta de lavado han sido considerablemente altos cuando se comparan con las mediciones efectuadas entre los diferentes agentes que intervienen en la estimación de los flujos másicos.

Para realizar un ajuste que permita el control de los datos en la planta de lavado, se propone una metodología de balance de masas y predicción de índices metalúrgicos a partir de la unificación y estructuración de datos procedentes de la planta de lavado de carbón, utilizando el entorno programático del software estadístico “RStudio”. Además, se realizó a fondo la valoración metalúrgica de la planta actual, comparándola con sus factores de diseño para una operación óptima.

Palabras clave: Índices metalúrgicos, inventarios de carbón, medio denso, modelos de predicción, análisis estadístico.

Abstract.

Mass balance methodology and prediction of metallurgical indicators in coal washing plants

In a washing plant, the separation of coal and tailings from the backings (floors ,roofs and intercalations) of the coal seams carried out. This operation is of vital importance in coal refining, because the seams intrinsically have a high degree of contamination (minerals), which affects the calorific value of the coal. Currently, the Cerrejón Colombia washing plant uses for this purpose, gravitational separation of dense media, which is based on the use of pseudofluids composed of water suspensions with magnetite.

The company has long identified that the production adjustments of the coal pile inventories coming from the washing plant have been considerably high when compared to the measurements made among the different agents involved in the estimation of mass flows.

In order to make an adjustment that allows the control of the data in the washing plant, a methodology of mass balance and prediction of metallurgical indexes is proposed from the unification and structuring of data coming from the coal washing plant, using the programmatic environment of the statistical software "RStudio". In addition, a thorough metallurgical assessment of the current plant was carried out, comparing it with its design factors for optimum operation.

Keywords: Metallurgical indexes, coal inventories, dense media, predictive models, statistical analysis.

Contenido.

Resumen	VII
Abstract	VIII
Introducción	15
1. Estado del arte	18
1.1 Cerrejón	18
1.1.1 Antecedentes.....	18
1.1.2 Problemática de control de balances en planta.....	20
1.2 Generalidades planta de lavado	23
1.2.1 Principio de separación (medio denso)	23
1.2.2 Material de alimentación	25
1.2.3 Circuito carbón grueso.....	27
1.2.4 Circuito carbón fino	29
1.2.5 Circuito rechazo de gruesos.	30
1.2.6 Circuito rechazo de finos	30
1.2.7 Carbón lavado (producto) planta de lavado	31
1.2.8 Sistemas de medición planta de lavado	32
1.3 Índices metalúrgicos.....	33
1.3.1 Balances de masa en planta de lavado.....	33
1.3.2 Clasificación de índices metalúrgicos	35
1.4 Índice de desbalance global	36
1.5 Índice de desbalance AFC	36
1.6 Estadística y software para el análisis de datos.....	37
1.6.1 Estadística Descriptiva.....	37
1.6.2 Medidas de posición para manejos de bases de datos.....	38
1.6.3 Software R.....	39
2. Metodología de balance de masa	41
2.1 Estructuración y unificación de la big-data.....	41
2.2 Variables operacionales de diseño.....	42
2.2.1 Variables de diseño.	42
2.3 Valoración metalúrgica actual de la planta de lavado	44

VII

2.3.1	Balance de masa y índices metalúrgicos.....	44
2.3.2	Balance de carbón libre de ceniza (AFC: “Ash Free Coal”).....	46
2.3.3	Índices metalúrgicos (rendimiento V y recuperación R en planta).....	49
2.3.4	Índice de desbalance global de la planta.....	50
2.3.5	Índice de consumos.....	51
2.3.6	Flujos globales planta de lavado.....	56
2.3.7	Índices metalúrgicos actuales de la planta	67
3.	Predicción de metas de producción e indicadores metalúrgicos	70
3.1	Modelo de predicción.....	70
3.2	Aplicación del modelo.....	71
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	74
4.1	Conclusiones.....	74
4.2	Discusión y recomendaciones.....	75
5.	Bibliografía.....	76
6.	Anexos.....	78

Lista de figuras, imágenes y gráficos.

Figura 1.	Esquema general de la planta de lavado de carbones en Cerrejón.....	16
Figura 2.	Esquema de entradas y salidas de la Pila 19.....	18
Figura 3.	Visualización base de datos planta de carbón, mayo 2019	22
Figura 4.	Diferencia de inventarios topográficos y estadísticos	22
Figura 5.	Separación estática, (separador tipo tambor).....	24
Figura 6.	Separación dinámica. (Ciclón).....	24
Figura 7.	Flujo para lavado de carbones	32
Figura 8.	Instrumentos para el sistema de medición de la planta.....	33
Figura 9.	Balance de masa planta de lavado Cerrejón, enero 2016	34
Figura 10.	Base de datos final generada por R en formato excel	41

Figura 11. Boxplot BTU para alimento rechazo y producto	45
Figura 12. Balance másico global cada mes. Alimento Vs Periodo.....	45
Figura 13. Datos de planta. Balance global vs. turnos	46
Figura 14. Densidades de probabilidad para el alimento y el carbón lavado (producto) más el rechazo.....	46
Figura 15. Cantidad de carbón (AFC) en las corrientes de alimento, rechazo grueso y producto	48
Figura 16. Desbalance global entre inventarios.	51
Figura 17. Índice de magnetita promedio en el tiempo.....	52
Figura 18. Índice aniónico promedio en el tiempo.....	53
Figura 19. Agua promedio en el tiempo	54
Figura 20. Energía promedio en el tiempo.....	55
Figura 21. Toneladas producidas promedio por hora, en el tiempo.....	59
Figura 22. BTU alimento promedio, en el tiempo.....	60
Figura 23. Cenizas en el alimento promedio, en el tiempo.....	61
Figura 24. Humedad en el alimento promedio, en el tiempo	61
Figura 25. BTU carbón lavado (producto) promedio, en el tiempo	63
Figura 26. Cenizas carbón lavado (producto) promedio, en el tiempo.	63
Figura 27. Humedad carbón lavado (producto) promedio, en el tiempo.....	64
Figura 28. BTU rechazo promedio, en el tiempo.....	65
Figura 29. Cenizas rechazo promedio, en el tiempo	66
Figura 30. Humedad rechazo promedio, en el tiempo.....	66
Figura 31. Rendimiento promedio, en el tiempo.....	67
Figura 32. Rendimiento real promedio, en el tiempo.....	68
Figura 33. Recuperación promedio, en el tiempo.....	68

Figura 34. Recuperación real promedio, en el tiempo	69
Figura 35. Predicción de índices metalúrgicos, Febrero Diurno.....	71
Figura 36. Predicción de índices metalúrgicos, Marzo Nocturno	72
Figura 37. Predicción de planta con datos de alimentación.....	73
Figura 38. Predicción de planta con datos de alimentación 2.....	73
Imagen 1. Planta de lavado de Cerrejón	19
Imagen 2. Carbón contaminado por interface.....	25
Imagen 3. Carbón contaminado por explotación	26
Imagen 4. Ciclones de carbón grueso.....	28
Imagen 5. Espirales para carbón fino.....	29
Imagen 6. Tamiz de producto, carbón lavado.....	31
Gráfico 1. Índice de magnetita por día, en los diferentes años.	52
Gráfico 2. Índice aniónico por día en los diferentes años.	53
Gráfico 3. Agua promedio por día en diferentes años.	54
Gráfico 4. Energía promedio por día en los diferentes años.....	55
Gráfico 5. Densidad promedio por día en los diferentes años.	56
Gráfico 6. Toneladas de alimento promedio hr/día en diferentes años.....	56
Gráfico 7. Toneladas de alimento promedio por hora en los diferentes años.	57
Gráfico 8. Toneladas producidas por día en diferentes años	58
Gráfico 9. Toneladas producidas promedio por hora en diferentes años.....	58
Gráfico 10. BTU carbón lavado (producto) promedio por día en diferentes años.....	62
Gráfico 11. BTU carbón lavado (producto) por mes en diferentes años	62
Gráfico 12. BTU rechazo promedio por día, en los años.	64
Gráfico 13. BTU rechazo promedio por mes, en los años.	65

Lista de tablas.

Tabla 1. Granulometría de carbón	44
Tabla 2. Índices metalúrgicos de planta de lavado en período de enero 2016 – abril 20185	50
Tabla 3. Principales consumos general de la planta de lavado.....	51

Lista de Símbolos y abreviaturas.

<u>Símbolo</u>	<u>Termino</u>	<u>Unidad</u>
V	Volumen	m ³
M	Masa	Kg
A	Área	cm ²

Abreviatura Termino

BTU	British Thermal Unit.
FC	Factor de carga.
AFC	“Ash Free Coal” (Carbón lavado).
Pulpa	(Término minero) mezcla de sólidos con agua.

Metodología de balance de masa y predicción de indicadores metalúrgicos en plantas de lavado de carbones

Introducción.

La actividad extractiva de carbón de Cerrejón se realiza en el Departamento de la Guajira, abarcando un área aproximada de 78.000 hectáreas. Geográficamente se localiza en el valle delimitado por las estribaciones Nororientales de la Sierra Nevada de Santa Marta en el costado Este, y por la Serranía del Perijá y los Montes de Oca, por el costado Oeste. El yacimiento se encuentra dividido en tres grandes zonas:

- Zona Norte.
- Zona Central: Esta se divide en 2 zonas (Zona de Comunidad que es propiedad privada y zona Oreganal).
- Zona Sur.

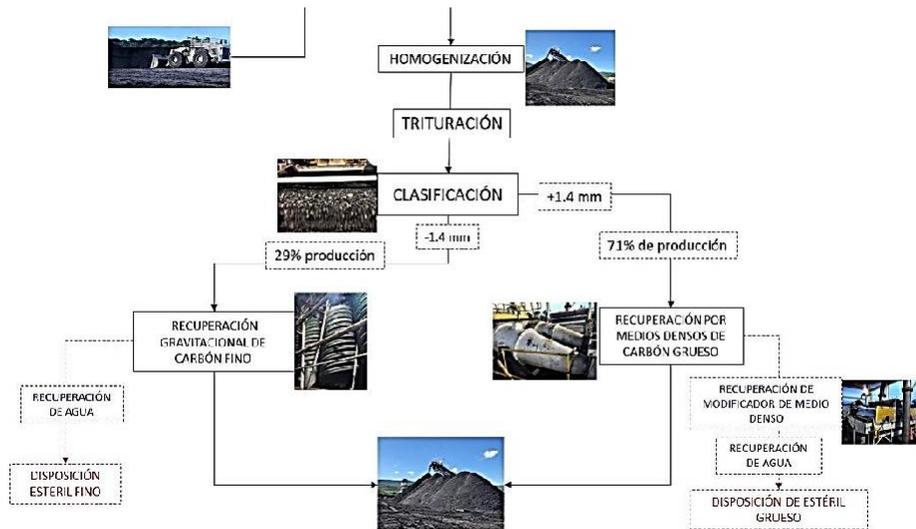
La excavación de la Mina se encuentra localizada entre los municipios de Barrancas, Albania y Maicao, comprende aproximadamente 38.000 hectáreas del sur del Departamento de la Guajira. Cerrejón es una de las operaciones mineras de exportación de carbón a cielo abierto más grandes del mundo, un importante actor de la economía en Colombia y motor de La Guajira, región en la que concentra su actividad productiva. Teniendo como labores fundamentales la exploración, extracción, transporte, embarque y exportación de carbón de diversas calidades.

El carbón es un material rocoso, de carácter sedimentario, combustible, formado por la transformación de restos de vegetales (ANM, 2003). Dicho material se presenta en capas de inclinación variable, unido a materiales estériles intrínsecos (procedentes de elementos inorgánicos que forman parte de la estructura íntima de los vegetales) o materiales estériles que proceden de aportes de sedimentos inorgánicos, arcillosos y arenosos (SGC, 2018) El carbón también se encuentra mezclado con materiales de origen antrópico, los cuales proceden de la imperfección de los procesos de extracción minera.

Desde hace un tiempo atrás, el carbón es un material con alta demanda comercial, dado a que es un recurso energético, no renovable, con un poder calorífico alto y natural; no obstante, a este se le debe aplicar un proceso efectivo de separación, ya que su poder calorífico es directamente proporcional a la cantidad de cenizas que posea como contaminante, lo que implica que carbones mezclados con este tipo de minerales deben ser sometidos a lavado para la concentración de la masa carbonosa. Es decir, entre más puro sea el carbón más será el BTU adquirido. Es entonces

que resulta ser factible la realización de un proceso de lavado, para separarlo de todos aquellos materiales estériles.

Figura 1. Esquema general de la planta de lavado de carbones en Cerrejón.



Fuente: Elaboración propia.

Actualmente, Cerrejón realiza la concentración de carbones en la planta de lavado, que procesa aproximadamente 500 t/h, combinando estrategias de procesos de separación gravitacional con el uso de espirales e hidrociclones de medio denso, usando como propiedad diferencial las velocidades de sedimentación de las partículas en tratamiento (ver Fig. 1.).

El acopio del carbón lavado producto del proceso realizado en planta, se denomina como pila 19. El volumen de la Pila 19, así como de las demás pilas de la empresa al momento de efectuar el inventario, se obtiene por medio de mediciones topográficas, con datos primarios obtenidos a través de fotos aéreas suministradas por el DRON TRIMBLE UX5 HP® (Fragozo, 2015). La información es extraída manualmente con el fin de alimentar bases de datos que son utilizadas para generar y actualizar las geometrías de pila y realizar cálculos volumétricos por medio del software MINEX®.

La evaluación volumétrica de cada pila se registra en una base de datos con la nomenclatura de la respectiva pila con el fin de brindar trazabilidad del dato para luego realizar el reporte definitivo; el cual se revisa por el coordinador de topografía y

posteriormente es enviado al analista encargado de hacer la estimación másica de acuerdo al mapa de proceso.

El balance de material realizado en este estudio, encontró que existe una diferencia de inventarios entre la información estadística reportada mensual y la medición topográfica de las pilas que alimentan la planta de lavado. Para la conciliación másica de estos inventarios el sistema de gestión de Cerrejón enfrenta dos áreas. De un lado está el área Servicios técnicos que es la encargada de consolidar los inventarios topográficos y estadísticos de la empresa, y por otra parte está el área Manejo de Carbones (M-C) que reporta diariamente el peso de las entradas a la Pila 19, por medio de una interface manual.

Esta singularidad, ocurre únicamente en la Pila 19 ya que, para las demás pilas, las entradas y las salidas son estimadas por medio del número de viajes por el factor de carga (FC).

Por esta razón, las áreas operativas mencionadas anteriormente, requieren acciones que permitan tener nuevamente el control sobre estos inventarios, subsanar los fuertes desbalances de masas que se presentan, y, además, poder constatar con datos reales si los equipos presentes en la planta están teniendo un rendimiento acorde con su capacidad.

En respuesta a dicho requerimiento, este estudio plantea una metodología de balance de masa que permita obtener un análisis general del histórico de datos provenientes de la planta de lavado de carbones de Cerrejón, y, por medio de la unificación de las diferentes bases de datos, facilitar el manejo de las variables presentes en el proceso de lavado, de manera automatizada por medio de códigos de programación aplicados en el entorno del software estadístico "RStudio".

1. Estado del arte

1.1 Cerrejón.

1.1.1 Antecedentes.

A partir de información suministrada por Cerrejón, se hace una recopilación de los aspectos involucrados tanto en la planta de lavado como en los inventarios estadísticos y topográficos de la Pila 19. La planta de lavado cuenta con tres basculas dinámicas ubicadas en las corrientes de alimento (CV01), rechazo grueso (CV04) y carbón lavado (producto) (CV02), las basculas marca Ramsey® tienen una capacidad nominal de 500 t/h y un ángulo de inclinación de 14° aproximadamente, el factor de precisión promedio de los últimos 3 años para la báscula de carbón lavado (producto) es de 3.84%, rechazo grueso 6.27% y alimento 3.21%. (ver Fig. 2.). No se presentó para este estudio, la frecuencia de calibración de las básculas dinámicas ni de línea cero, lo que dificulta un ajuste óptimo del FC tanto del alimento como de las salidas de la Pila 19.

Figura 2. Esquema de entradas y salidas de la Pila 19.

- Entrada [Producto de planta de lavado](#)
- Censado por báscula en banda transportadora



- Reclamada con sistema cargador - camión
- Usando [factor de cargue](#)



Fuente: (Planta de lavado, 2017).

Por otro lado, la planta de lavado (ver Img. 1.) al operar en medio húmedo, requiere de agua para la operación de los medios densos. Si se consideran las magnitudes de las

densidades de agua (1,00 g/ml) comparado con la densidad del carbón en Cerrejón (1,20 - 1,30 g/cm³), la humedad se convierte en una variable que impacta la lectura de flujos másicos. Referente a este aspecto, uno de los equipos responsables de la separación de agua son las centrífugas de la planta de lavado, lamentablemente no se precisa el porcentaje esperado de separación de agua y su disponibilidad en las operaciones de la planta (Cerrejón, 2015), por lo que el agua en la corriente de salida de carbón lavado genera una oportunidad de análisis.

Imagen 1. Planta de lavado de Cerrejón.



Fuente: Elaboración propia

Según el plan de gestión de calidad del carbón realizado en 2013 con el fin de reducir las variaciones másicas que reporta la Pila 19 con respecto al inventario estadístico y el inventario topográfico se propone la creación de límites condicionales basados en la capacidad nominal de la pila que es aproximadamente de 21000 toneladas. La aplicación de los límites condicionales se muestra a continuación (Pantoja, 2015):

- Si el inventario final es menor a cero entonces reportar cero para el balance diario.
- Si el inventario final calculado es mayor a cero y menor o igual al límite superior para el balance entonces reportar el inventario final calculado.
- Si el inventario final calculado es mayor al límite superior para el balance y menor o igual al límite superior a reportar entonces reportar el inventario final calculado.

- Si el inventario final calculado es mayor al límite superior a reportar entonces reportar el límite superior.

Por otra parte, con el fin de ajustar el FC de las salidas de la Pila 19 se propuso el pesaje aleatorio de 128 camiones (Van Grieken, 2011), se dedujo que dichos pesos se distribuían normalmente y por lo tanto era posible aplicar métodos de prueba de hipótesis para rechazar factores de carga diferentes a la media de 177.38 Ton, con una desviación de 11.16 Ton. Este estudio no contó con la evidencia de la calibración inicial de la báscula de línea cero ni de la conciliación con el sistema de información VIMS (Sistema de administración de Información Vital CAT) respecto a la información de producción, cabe resaltar la variabilidad a través del tiempo de dicho FC que va desde 178 Ton a 200 Ton según datos analizados (Van Grieken, 2018).

En noviembre del 2015, se realizó una prueba donde se formó una pila húmeda y otra drenada durante un intervalo de tiempo de una noche y se concluyó que la diferencia de peso es del 16% (Planta de lavado, 2017).

1.1.2 Problemática de control de balances en planta.

En el análisis de la problemática del control de inventario en la pila 19, se encuentra que la empresa contaba con dos áreas encargadas de suministrar la información, las cuales, por sus funciones administrativas lo hacían de manera independiente y, por ende, en diferentes formatos. Por un lado, está el área de servicios técnicos que se encarga de la conciliación de inventarios (estadísticos y topográficos), así como de los reportes volumétricos generados a partir del Dron de manera mensual y los movimientos másicos a partir de camiones por medio de FC. Por otro lado está el área de Manejo de carbones que maneja la información concerniente a la generación de índices metalúrgicos e índices de calidades en sus corrientes por medio de muestreos sistemáticos, toda su información es soportada por mediciones directas que arrojan las básculas en unidades de masa y su alcance llega hasta el alimento (entradas pila 19) y disposición del material a la pila 19 (Manejo de Carbones, 2018).

El área de Manejo de Carbones sólo transmite manualmente la información generada por la báscula de carbón lavado (entradas Pila 19) y no hace parte en la conciliación diaria ni mensual de los inventarios del cerrejón. A continuación, se enuncian las diferentes bases

de datos suministradas por cada área para el análisis integral del problema de conciliación de inventarios; se aclara que, los nombres de estas se presentan conforme fueron proporcionadas por la empresa.

Servicios Técnico:

- Inventario final pila cerrejón.
- CTD_2016-2018 (Hoja de cálculo)
- TEC 2016 -2018 (Hoja de cálculo)
- Calibración Red 20151130_JVerdeza2 (Hoja de cálculo)
- Red Neuronal Densidad V2 J Verdeza - CALIBRA_2017 (Hoja de cálculo)
- Resultados_Pila19v2 (Hoja de cálculo)
- Datos_181030_Alturas_Pilas_Octubre_2018_Fragozon (Hoja de cálculo)
- IMPACTO_PILA 19_AL INVENTARIO (Hoja de cálculo)

Manejo de Carbones:

- V4_Datos Planta de Lavado 2016 a - 2018 (Hoja de cálculo)
- V3_Tonelaje Planta de Lavado (Hoja de cálculo)
- Estimación de la cantidad de agua por alimento y producto (Hoja de cálculo)
- Consumo Insumos Planta Lavado (1) (Hoja de cálculo)
- Calidad Planta Lavado (Hoja de cálculo)
- ALIMENTO Y PRODUCTO ELIPSE (Hoja de cálculo)

Un ejemplo de la disposición de los datos se muestra en la Fig. 3. donde se aprecia la presencia de diferentes hojas de Excel en donde almacenaban los datos de manera independiente.

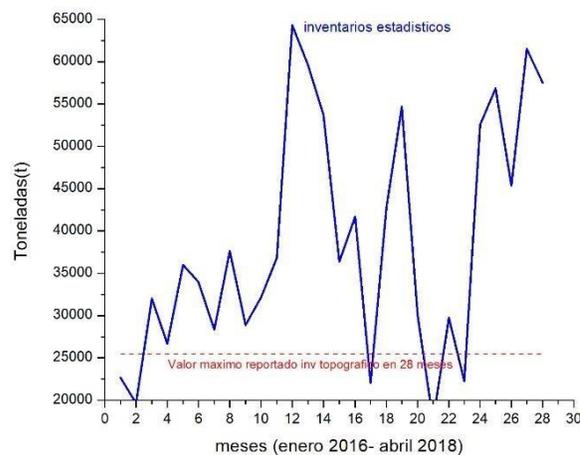
Figura 3. Visualización base de datos planta de carbón, mayo 2019.

SUPERINTENDENCIA DE PLANTAS DE CARBON														
REPORTA CUARTO DE CONTROL - PLANTA DE LAVADO														
FECHA		ANALISTA DÍA			ANALISTA NOCHE				GRUPO DÍA				GRUPO NOCHE	
04/03/2018		JORGE LEAL MUEGUES			LEANDRO PALMEZANO				PATRIOTAS				CARIBES	
HORA	TONELADAS ALIMENTADAS				TONELADAS PRODUCIDAS				PERDIDAS ALIMENTACION PLANTA				COMENTARIOS	
	Meta Hora	REAL vs PLAN	REAL HORA	Acumul.	Meta Hora	REAL vs PLAN	REAL HORA	Acumul.	% Recup.	Down/ Mtto	Stand By	Llenando Tolva		Otros
07,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-					Mantenimiento Programado
08,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-					Mantenimiento Programado
09,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-					Mantenimiento Programado
10,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-					Mantenimiento Programado
11,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-					Mantenimiento Programado
12,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-					Mantenimiento Programado
13,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-					Mantenimiento Programado
14,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-					Mantenimiento Programado
15,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-					Mantenimiento Programado
16,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-					Mantenimiento Programado
17,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-					Mantenimiento Programado
18,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-					Mantenimiento Programado
Total D	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
19,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-	XXXX				Mantenimiento de 18:00 a 02:00
20,00	0	0	0	0	0	0	0	0	-	XXXX				Mantenimiento de 18:00 a 02:00

Fuente: (Planta de lavado, 2017).

Al almacenar los datos de esta manera imposibilitaba hacer análisis estadísticos certeros de manera rápida, debido a la cantidad de archivos independientes que alimentaba la empresa. La Fig. 4. muestra la diferencia entre el máximo valor reportado por el área de topografía para la pila 19 vs los diferentes valores reportados por movimiento de inventarios comprendido en los años 2016 a 2018.

Figura 4. Diferencia de inventarios topográficos y estadísticos.



Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia que los datos suministrados por las áreas encargadas no conciliaban en ninguno de los meses analizados, por ejemplo, el máximo valor de tonelada en pila reportadas por topografía es superado en más del 80% de los meses analizados.

1.2 Generalidades planta de lavado.

1.2.1 Principio de separación (medio denso).

La separación por medio denso se utiliza para separar sólidos por flotación. El medio denso corresponde a una suspensión configurada especialmente para la separación de carbones; formada por agua y una fase dispersa con características granulométricas específicas (Burt & Mills, 1984). Los materiales más usados son ferro silicio y magnetita, suspendidos en agua durante la separación. Esta mezcla actúa como medio de alta densidad que actúa alrededor de $1300 - 1400 \text{ kg/m}^3$. Las fracciones más livianas flotan en esta suspensión mientras que las partículas más pesadas se hunden.

Las condiciones de los medios densos deben cumplir con los siguientes requisitos (Ortiz, 2018):

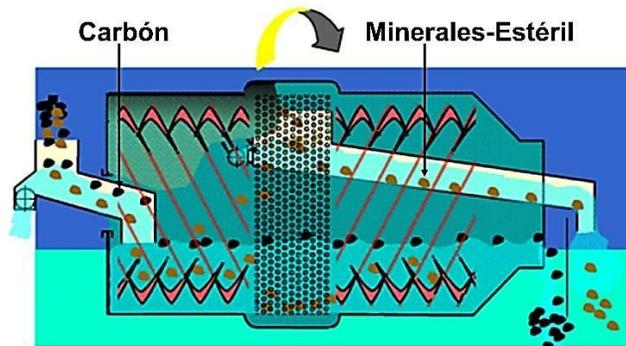
- La densidad del medio denso debe tener un valor intermedio en la de los sólidos a separar.
- La viscosidad del medio denso debe ser lo más baja posible, para disminuir fuerzas de interacción sólido-fluido permitiendo velocidades de sedimentación óptimas.
- La estabilidad del medio denso debe ser muy alta, de tal manera que se requiere una mínima agitación.
- El modificador de medio denso debe ser de fácil separación, tanto del carbón como de los estériles. Se sugiere por ejemplo que tenga alta susceptibilidad magnética

En términos de separación los medios densos operan efectivamente entre $1.3-1.8 \text{ kg/m}^3$. En los extremos de este intervalo se presenta la inestabilidad del medio y pueden manifestarse pequeños cambios en la densidad, calidad y cantidad de producto (carbón lavado) (Ortiz, 2018).

Existen dos tipos de separadores en medio denso: estático y dinámico (Ortiz, 2018).

- Estático: La separación estática se caracteriza por el uso de aparatos concentradores con recipientes de varias formas, donde la separación se realiza en un medio relativamente tranquilo, donde la única fuerza actúa es la fuerza gravitacional. La separación se realiza en estanques tambores vasos o conos.

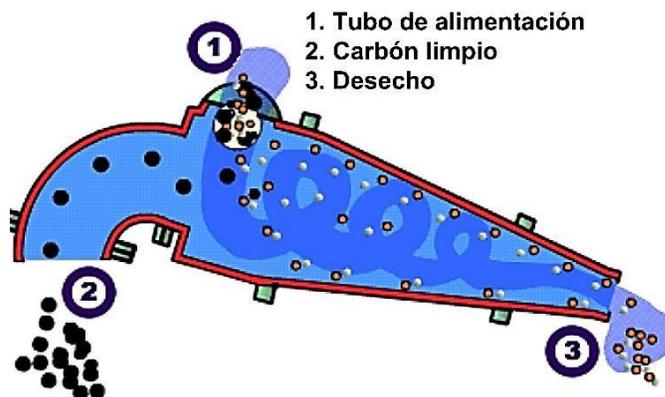
Figura 5. Separación estática, (tipo tambor).



Fuente: (Manejo de Carbones, 2018).

- Dinámico: la separación dinámica se caracteriza por el uso de separadores que emplean fuerzas centrífugas, las cuales pueden ser hasta 20 veces mayores que la fuerza de gravedad. Los equipos más importantes en este tipo de separación son los ciclones de medio denso.

Figura 6. Separación dinámica. (Ciclón)



Fuente: (Manejo de Carbones, 2018).

Para modificar la densidad del medio, la planta de lavado utiliza magnetita, que es un mineral de hierro constituido por óxido ferroso-diférrico, el cual posee en su estado natural propiedades magnéticas; y, además, es un mineral muy denso y frágil. Su color es pardo negruzco, con brillo metálico.

1.2.2 Material de alimentación.

El material de alimentación de la planta de lavado corresponde a material contaminado. El que corresponde al techo y el piso por el proceso de explotación y el material que concierne a las intercalaciones; ambos materiales tienen bajo poder calorífico y por lo tanto no son incluidos dentro de los productos comerciales.

Imagen 2. Carbón contaminado.



Fuente: (Manejo de Carbones, 2018)

- Carbón contaminado por explotación: es el producto de la minería del manto que se contamina con fragmentos de roca (areniscas, lodolitas o arcillolitas) de tamaño menor a 20 cm de diámetro, del techo (parte superior del manto) y del piso (parte inferior del manto), debido al proceso de explotación.

- Imagen 3. Carbón contaminado por explotación.



Fuente: (Manejo de Carbones, 2018)

- Carbón contaminado por intercalaciones: Es el producto de la minería realizada en zonas con condiciones geológicas adversas (fallas, diques, partings, lentes, canales e inyecciones) que genera contaminación del manto de carbón con fragmentos de roca (areniscas, lodolitas o arcillolitas) de hasta de 70 cm de diámetro.

El material de alimentación antes mencionado se dispone en pilas de homogenización antes de ingresar a la planta de lavado por medio de camiones con capacidad aproximada de 190 Ton. La tolva de descargue tiene una capacidad de 500 Ton, lo que equivale a la descarga de aproximadamente 3 camiones completamente ligada a una zaranda con abertura de 700 mm, lo que evita el ingreso de materiales excesivamente grandes que podrían atascar la trituradora primaria.

El material de alimentación que proviene de la tolva es dirigido hacia un alimentador rompedor, donde se fractura a un tamaño nominal de 12 a 14 pulgadas (30,48 y 35,56 cm) para luego ser depositado sobre la banda de alimentación.

El material guiado por la banda de alimentación se deposita en dos trituradoras en serie las cuales lo reducen a un tamaño de 2 pulgadas aproximadamente, posteriormente la descarga de las trituradoras es dispuesta en el primer sistema de cribado donde antes de llegar a la criba de clasificación, se pasa el material de alimentación por un sistema de desenlode el cual consta de aspersores que aplican agua a alta presión, lavándolo y ayudando al material a llegar al tamiz inicial.

Este material ya lavado es pasado por el tamiz de alimentación donde por medio de paneles perforados se reduce el exceso de humedad y se produce la primera separación del sistema.

Se generan dos tipos de flujo, los cuales dependen del tamaño de la partícula. Uno de los flujos está constituido a partir de material grueso (tamaños mayores de 1.4 mm, hasta los 50 mm), mientras que el otro flujo resultante está constituido a partir de material fino (tamaños inferiores o iguales a 1.4 mm). A cada uno de estos flujos se les efectúa y un proceso de limpieza distinta.

1.2.3 Circuito carbón grueso.

El material mayor a 1.4 mm (carbón contaminado grueso) que se descarga sobre el tamiz de alimento, pasa a un sumidero tipo bastidor de nivel constante. Este sumidero es donde se integra medio denso (solución de magnetita con densidad de 1.4 a 1.5 g/cm³), haciendo entonces que el contenido de este sea agua, magnetita y material grueso de separación (carbón u otros materiales intrínsecos).

La mezcla de material grueso y medio denso es bombeada a una caja de distribución para luego a través de mangueras, alimentar los ciclones de medio denso los cuales por acción de la fuerza centrífuga y el medio denso separan el carbón de sus contaminantes.

Los ciclones reciben la pulpa a presiones entre 15 y 16 psi (Ver Img. 4.) a través del tubo de alimentación, al momento de entrar se genera un movimiento tipo espiral descendente, a medida que la sección transversal disminuye en la parte cónica, se superpone una corriente interior que genera un flujo neto ascendente también tipo espiral a lo largo del eje central del equipo.

Imagen 4. Ciclones para carbón grueso.



Fuente: (Manejo de Carbones, 2018)

Continuando el proceso en los ciclones se presenta una separación gravimétrica entre el carbón y la solución de magnetita, la cual se mezcla con los minerales y fragmentos de roca contaminantes. Este efecto se presenta dado a que, la densidad específica del carbón, en este punto del proceso, es menor que la densidad específica del medio denso.

El bajo flujo (material de descarga que sale de los ciclones) se envía al tamiz de rechazo, donde por efectos de la vibración, se le retira la humedad (la solución de magnetita y agua). Luego el material de rechazo grueso es enviado a las bandas transportadoras las cuales lo dirigen al silo de rechazo, mientras que el fluido retirado es enviado al circuito de recuperación de medio denso.

El sobre flujo (material de derrame que sale de los ciclones) se envía al tamiz de producto, de donde se extrae la cantidad de medio denso adherido al carbón. Luego el carbón lavado grueso es descargado sobre la centrifuga con el fin de retirar la humedad, y posteriormente sobre la banda transportadora de producto. Si la centrifuga se encuentra fuera de servicio se descarga el carbón directamente en la banda transportadora que lleva el carbón lavado.

El producto de carbón lavado grueso es almacenado finalmente en pila (intemperie).

1.2.4 Circuito carbón fino.

Luego de clasificar el material fino mediante el tamiz de alimento, este se deposita en el sumidero de finos y posteriormente se bombea hacia los ciclones.

El material fino llega a un grupo de ciclones de 660 mm de diámetro, los cuales cumplen la función de separar por tamaño de grano, de tal manera que, el bajo flujo se lleva directamente al espesador, mientras que, el sobre flujo es dirigido a dos grupos de espirales de ocho espirales cada uno.

Las espirales (ver Imagen 5.) trabajan sobre principios de separación por tamaño y gravedad específica. El sobre flujo entra por la parte superior de la espiral, para luego fluir en dirección descendente. Las partículas de mayor peso se deslizan por el interior de la corriente, formando el conocido rechazo, mientras que, las más finas fluyen por la parte superior del canal. El producto de carbón fino se envía al sumidero de producto y luego se bombea hacia los ciclones deshidratadores, en tanto, el material de rechazo de las espirales se deposita en el espesador.

Imagen 5. Espirales para carbón fino.



Fuente: (Manejo de Carbones, 2018)

El carbón fino ya deshidratado se descarga en la caja de distribución permitiendo el transporte al tamiz de producto fino en donde se acaba de extraer el exceso de humedad

y es depositado en la banda de producto fino para luego mezclarse con el producto de carbón grueso y ser depositados en la misma pila.

1.2.5 Circuito rechazo de gruesos.

El bajo flujo de los ciclones de medio denso del circuito de gruesos es recibido por el tamiz de rechazo grueso el cual está dotado de duchas y un movimiento vibratorio que permite drenar el medio denso que viene con el rechazo grueso a través de los paneles los cuales tiene una apertura de 1.4 mm.

El material de rechazo libre de magnetita es descargado directamente a la banda de rechazo gruesos y dirigido al silo de rechazo, el cual tiene una capacidad de 200 Ton y es un almacenaje temporal

El silo de rechazo tiene una capacidad de 200 Ton, una compuerta de accionamiento electroneumático accionado por el operador del camión, y de vez en cuando por el operador de la planta desde una estación paralela. Este silo posee un chute de sobre flujo empleado en el caso que exista niveles muy altos debido a la demora en la descarga. Es un almacenamiento de tipo temporal cuyo fin es facilitar el cargue del camión para luego transportarlo al botadero.

1.2.6 Circuito rechazo de finos.

Los rechazos finos de las espirales y el sobre flujo de los ciclones de desenlode son descargados en el tanque espesador (18 m de diámetro), a través de un tubo de alimentación. Por medio de válvulas se adiciona una solución de aniónico sobre este material, con el fin de sedimentar las partículas finas ya que el agua en la que se encuentran inmersas será reutilizada en la planta de lavado. El porcentaje de agua reutilizado en la planta de lavado de carbón es del 85%.

Los sólidos que se sedimentan en el espesador se bombean hacia una laguna ubicada a una distancia óptima.

1.2.7 Carbón lavado (producto) planta de lavado.

El carbón lavado o producto de la planta de lavado del cerrejón es carbón térmico de alto poder calorífico sus especificaciones técnicas son las siguientes:

- Poder calorífico 10000-11825 BTU
- Porcentaje de humedad 15% aproximadamente
- Porcentaje de ceniza 4% aproximadamente
- Porcentaje de azufre 0.5% aproximadamente
- Granulometría (d10= 14,025 um, d50=187.391 um, d90=476,079 um).

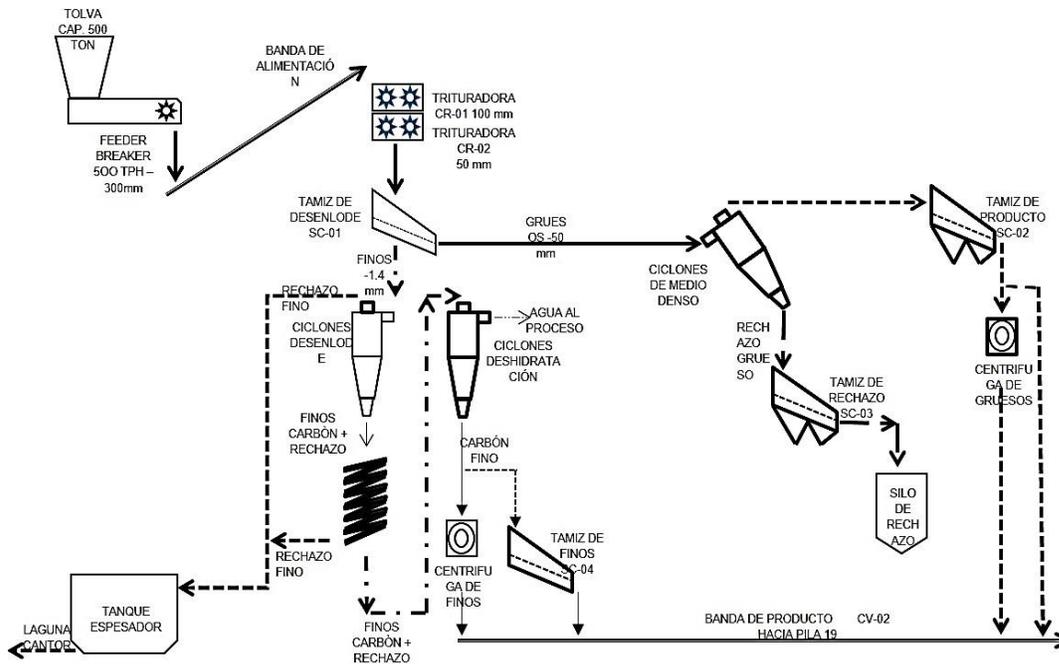
Imagen 6. Tamiz de producto, carbón lavado.



Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 7. se aprecia el flujo de lavado de la planta descrito anteriormente;

Figura 7. Flujo para lavado de carbones.



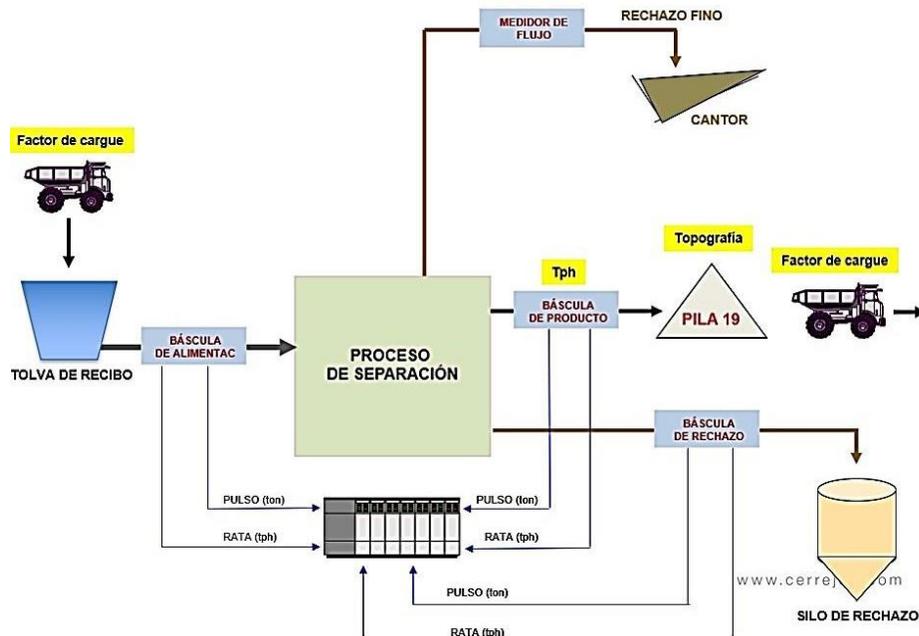
Fuente: (Manejo de Carbones, 2018).

1.2.8 Sistemas de medición planta de lavado.

Cerrejón S.A., cuenta con un sistema estadístico denominado factor de cargue (FC) el cual asigna el tonelaje de material por camión cargado, es decir, si el factor de carga es de 170 Ton bastaría con contar el número de camiones que alimentan la tolva de recibo de la planta de lavado para saber las toneladas alimentadas en el turno evaluado.

Por otro lado, hay un sistema paralelo de medición el cual cuenta con tres basculas dinámicas ubicadas en las corrientes de alimentación, rechazo grueso y carbón lavado. Las basculas marca Ramsey® tienen una capacidad nominal de 500 t/h y un ángulo de inclinación de 14° aproximadamente, el factor de precisión promedio de los últimos 3 años para la báscula de carbón lavado es de 3.84%, rechazo grueso 6.27% y alimento 3.21%. La corriente de rechazo fino cuenta con un densímetro y flujómetro. La Fig. 8. nos muestra los instrumentos de la planta de lavado. (Manejo de Carbones, 2018)

Figura 8. Instrumentos para el sistema de medición de la planta.



Fuente: (Manejo de Carbones, 2018)

1.3 Índices metalúrgicos.

1.3.1 Balances de masa en planta de lavado.

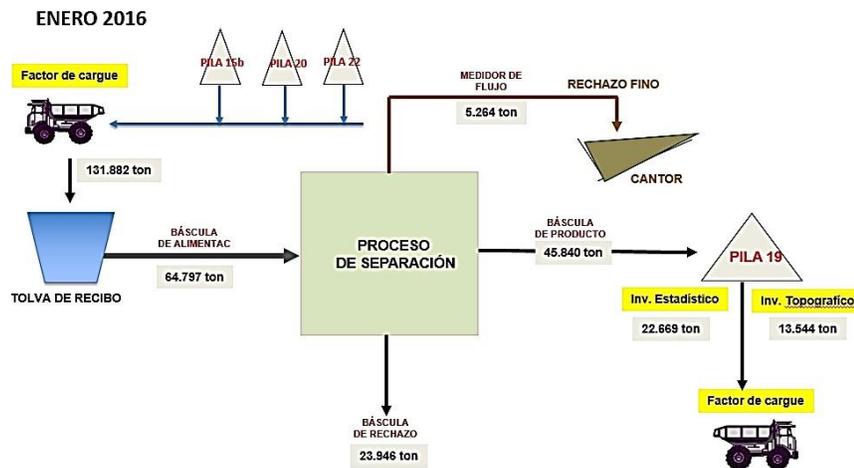
Un balance de masa o de materiales, es una secuencia de cálculos que permite llevar la cuenta de todas las sustancias que intervienen en un proceso de transformación, en la cual se satisface la ley de la conservación de la masa, la cual establece que la materia se transforma, pero no se crea ni se destruye. Un balance de materia es, pues, una contabilidad de los materiales que toman parte del proceso. Al hacer el conteo del material, deben considerarse las entradas y las salidas que atraviesan las fronteras del sistema, las reacciones químicas que suceden pues en ellas se presenta consumo y producción de material y la cantidad de éste que se acumula. (Londoño García, 2015).

Esto quiere decir que en los procesos donde se involucra el concepto de balance de masa, todo material que entre, debe ser igual al que sale (ver Ecuación 1). Bajo este principio se construye el primer análisis que se realiza en este trabajo, dado que, los balances de masa

juegan un rol muy importante en la optimización, evaluación de rendimiento y diagnóstico de problemas de una planta, sin la necesidad de realizar demasiados cambios físicos en ella, permitiendo estudiar el comportamiento de esta en una amplia gama de condiciones de operación y en cualquier situación que implique una modificación de su estado estacionario. Por ejemplo, evaluación de fallas de equipos, cambios en las condiciones de operación, evaluación de estrategias de control, problemas de inventario físicos y toma de decisiones. Además, para poder realizar una determinación adecuada de los índices metalúrgicos del carbón que se está procesando en la planta de lavado, se debe apoyar en un balance de masa, dado que, este balance permite que los índices no generen números absurdos o incoherentes que puedan llegar a desorientar las decisiones y el análisis de los circuitos de concentración (Bustamante Rúa et al., 2008). Cabe resaltar que dicho balance se realiza en base seca, porque el peso específico del agua es muy parecido al del carbón, lo que ocasionaría una alteración en las mediciones.

$$\begin{aligned} & \text{Material que entra (carbón + contaminantes)} = \\ & \text{Material que sale (carbón limpio + material de desecho)}. \quad (1) \end{aligned}$$

Figura 9. Balance de masa planta de lavado Cerrejón, enero 2016.



Fuente: (Ortiz, 2018)

Como metodología de control (ver Fig. 9.) dan solución precisa a medida que se decide por la instrumentalización correcta de la de planta, sin embargo, no basta con disponer de

buena instrumentación para superar los problemas de control. Existen otras causas estrictamente operacionales que influyen de manera negativa en estos controles, como procedimientos inadecuados de muestreo, preparación de las muestras, ensayo químico de las especies de interés y prácticas inadecuadas de mantenimiento, calibración de instrumentos y equipos de medición.

1.3.2 Clasificación de índices metalúrgicos.

El proceso de lavado de carbón es un proceso físico. Como todo proceso de separación, es necesario determinar su eficiencia por medio de índices metalúrgicos que permita relacionar la calidad de la separación con la capacidad del circuito de lavado con el que se cuenta.

Por otra parte, los índices metalúrgicos son números adimensionales que están apoyados por un balance de masa exhaustivo en el proceso de separación, que permiten obtener el rendimiento real de los procesos realizados en planta.

Se asume que los muestreos se realizan en un estado estacionario, ya que, garantiza que las propiedades del sistema de separación son invariantes en el tiempo, debido a que, si el proceso de separación llegase a variar, se promueve una acumulación de masa dentro los equipos y por lo tanto las condiciones de operación no garantizan que los muestreos efectuados sean confiables.

Índices que relacionan calidad

Recuperación. (R). Se define como la relación entre la separación de la masa de carbón que hay en el carbón lavado de la planta con respecto a la cantidad de masa de carbón presente en la alimentación que ingresa

$$R = \frac{\text{Peso de mineral de interes en concentrado}}{\text{Peso de mineral de interes en el alimento}} \quad (2)$$

Es importante tener en cuenta que, el indicador de recuperación se realiza en base seca, por lo tanto, se desconecta la humedad del carbón lavado y del alimento, además, con el fin de obtener el peso de carbón presente en el alimento y en el producto, se realiza con anterioridad un balance de masa de Ash Free Coal (AFC).

Índices que relacionan capacidad.

Rendimiento de concentración. (Ψ). Se define como la relación entre el flujo másico en el concentrado (C : toneladas de carbón lavado) respecto al flujo másico de sólidos en la alimentación (A : toneladas de alimento)

$$\Psi = \frac{C}{A} \quad (3)$$

1.4 Índice de desbalance global.

El índice de desbalance global indica el porcentaje de desajuste del balance másico por hora respecto a las toneladas de alimento. Si el porcentaje es negativo, indica un faltante de toneladas con respecto a lo alimentado y si es positivo indica un exceso de toneladas en las corrientes de carbón lavado y rechazo. El valor ideal del indicador es cuando esté tiende a cero.

El control de dicho índice permite corroborar las mediciones de las basculas de la planta indicando si hay problemas de calibración o control del proceso de lavado.

Para el cálculo de este índice, se requiere aplicar la siguiente formula;

$$Ind_{desbalancegbl} = \frac{\text{Producto libre hmd} + \text{rechazo fino libre hmd} - \text{alimento libre hmd}}{\text{Alimento libre hmd}} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que;

$$\text{Alimento libre hmd} = [Ton_{ali} * (1 - (\frac{\%hmd_{ali}}{100}))] \quad (5)$$

$$\text{Rechazo grueso libre hmd} = [Ton_{rech} * (1 - (\frac{\%hmd_{rech}}{100}))] \quad (6)$$

$$\text{Producto libre hmd} = [Ton_{prod} (1 - (\frac{\%hmd_{prod}}{100}))] \quad (7)$$

1.5 Índice de desbalance AFC.

El carbón AFC presente en la corriente de alimento debe ser igual a la sumatoria de carbón AFC presente en las corrientes de carbón lavado y rechazo, el índice de desbalance AFC permite corroborar el estado estacionario de la planta.

Para calcular este índice, se requiere aplicar la siguiente formula:

$$Ind_{desbalanceAFC} = \left(\frac{Rech_{gruesoAFC} + producto\ libre\ hmd - alimento\ AFC}{Alimento\ AFC} \right) \quad (8)$$

Teniendo en cuenta que;

$$Alimento_{AFC} = [Ton_{ali} * (1 - (\frac{\%hmd_{ali}}{100}))] * \left[\frac{1 - (\frac{\%cz_{ali}}{100})}{1 - (\frac{\%cz_{prod}}{100})} \right] \quad (9)$$

$$Rechazo\ grueso\ AFC = [Ton_{rech} * (1 - (\frac{\%hmd_{rech}}{100}))] * \left[\frac{1 - (\frac{\%cz_{rech}}{100})}{1 - (\frac{\%cz_{prod}}{100})} \right] \quad (10)$$

$$Producto\ libre\ de\ hmd = [Ton_{prod} (1 - (\frac{\%hmd_{prod}}{100}))] \quad (11)$$

1.6 Estadística y software para el análisis de datos.

1.6.1 Estadística Descriptiva.

La primera utilidad de la estadística es la de proporcionar un conjunto de normas que permite elaborar las tablas numéricas adecuadas para cuantificar un determinado fenómeno. Dicho fenómeno está formado por un conjunto de personas o cosas que llamamos población. Las personas o cosas que integran una población se denominan elementos o unidades estadísticas. (Rey & Ramil, 2007).

Cada uno de los elementos de una población puede describirse según uno o varios caracteres. Por ejemplo, si el objetivo de un determinado análisis son los viajeros que llegan a un país, puede centrarse la atención en su edad, su estado civil, su país de procedencia, etcétera. (Rey & Ramil, 2007).

Al observar las diferentes variables o atributos se obtiene un conjunto de resultados, numérico o no, denominado conjunto de datos. Los obtenidos al observar un atributo se denominan modalidades, mientras que los correspondientes a una variable se denominan valores. (Rey & Ramil, 2007).

La estadística descriptiva es un conjunto de técnicas numéricas y gráficas para describir y analizar un grupo de datos, sin extraer conclusiones (inferencias) sobre la población a la

que pertenecen (Faraldo & Pateiro, 2013). Las gráficas muestran las tendencias y pueden ser histogramas, representaciones en “pastel”, “cajas con bigotes”, gráficos de líneas o de puntos de dispersión. Las imágenes sirven para dar ejemplos de conceptos o reforzar hechos. (Rendon Macías et al., 2016).

Un paso importante al comenzar a manejar un conjunto de datos es identificar cuántas variables se han registrado y cómo fueron registradas esas variables, lo que permitirá definir la estrategia de análisis. (Orellana, 2001).

De manera que es importante registrar las variables bajo un mismo orden, de esta manera la unificación de las bases de datos por el método de Data Frames en el software “RStudio”, arrojará resultados esperados y proporcionará información confiable y real.

1.6.2 Medidas de posición para manejos de bases de datos.

Los fenómenos que se observan sometidos al azar no suelen ser constantes, por lo que será necesario que junto a una medida que indique el valor alrededor del cual se agrupan los datos, se disponga de una medida que haga referencia a la variabilidad que refleje dicha fluctuación. En este sentido pueden examinarse varias características, siendo las más comunes: la tendencia central de los datos, la dispersión o variación con respecto a este centro, los datos que ocupan ciertas posiciones, la simetría de los datos y la forma en la que los datos se agrupan. (Marin, 2015).

Por ejemplo, los cuantiles son valores de la distribución que dividen en partes iguales los datos que posea la información, es decir, en intervalos que comprenden el mismo número de valores. Cuando la distribución contiene un número alto de intervalos o de marcas y se requiere obtener un promedio de una parte de ella. Generalmente, se divide la distribución en cuatro, en diez o en cien partes. (Becerra Espinosa, 2015).

Los cuantiles más usados son los percentiles, cuando dividen la distribución en cien partes, los deciles, cuando dividen la distribución en diez partes y los cuartiles, cuando dividen la distribución en cuatro partes (Becerra Espinosa, 2015). Esto permite conciliar información, eliminar información redundante, reducir tiempo de búsqueda y facilitar análisis de datos.

- Percentiles: Los percentiles son números que dividen en 100 partes iguales un conjunto de datos ordenados. Es decir, El percentil k es un valor que deja

aproximadamente el k por ciento de los datos por abajo de él. Se denota por medio de $P(k\%)$.

- **Deciles:** Los deciles son números que dividen la sucesión de datos ordenados en diez partes porcentualmente iguales. Los deciles se denotan $D(1)$, $D(2)$,..., $D(9)$, que se leen primer decil, segundo decil, etc.
- **Cuartiles:** Los cuartiles se definen como los tres valores que dividen la distribución en cuatro partes iguales. En términos de percentiles el primer cuartil $Q(1)$ coincide con el $P(25)$ (percentil 25); el segundo cuartil $Q(2)$ con el $P(50)$ o mediana, y el tercer cuartil $Q(3)$ con el $P(75)$. Entre el primer y el tercer cuartil se encuentra el 50% central de las observaciones.

1.6.3 Software R.

R es un lenguaje de programación usado para realizar procedimientos estadísticos y gráficos de alto nivel, este lenguaje fue creado en 1993 por los profesores e investigadores Robert Gentleman y Ross Ihaka. Inicialmente el lenguaje se usó para apoyar los cursos que tenían a su cargo los profesores, pero luego de ver la utilidad de la herramienta desarrollada, decidieron colocar copias de R en StatLib. A partir de 1995 el código fuente de R está disponible bajo licencia GNU GPL para sistemas operativos Windows, Macintosh y distribuciones Unix/Linux. (Hernandez, 2021).

Entonces podemos decir que R es un conjunto integrado de programas para manipulación de datos, cálculo y gráficos. Algunas características que dispone R según (R Development Core Team, 2016) son:

- Almacenamiento y manipulación efectiva de datos.
- Operadores para cálculo sobre variables indexadas (arrays), en particular matrices.
- Amplia, coherente e integrada colección de herramientas para análisis de datos.
- Posibilidades gráficas para análisis de datos, que funcionan directamente sobre pantalla o impresora.

- Lenguaje de programación bien desarrollado, simple y efectivo, que incluye condicionales, ciclos, funciones recursivas y posibilidad de entradas y salidas. (Debe destacarse que muchas de las funciones suministradas con el sistema están escritas en el lenguaje R)

El término “entorno” lo caracteriza como un sistema completamente diseñado y coherente, antes que como una agregación incremental de herramientas muy específicas e inflexibles, como ocurre frecuentemente con otros programas de análisis de datos.

R es en gran parte un vehículo para el desarrollo de nuevos métodos de análisis interactivo de datos. Como tal es muy dinámico y las diferentes herramientas que provee al usuario permite una amplia gama de soluciones al momento de organizar datos. (R Development Core Team, 2016).

Data Frames:

Los data frames son estructuras de datos de dos dimensiones (rectangulares) que pueden contener datos de diferentes tipos, por lo tanto, son heterogéneas. Esta estructura de datos es la más usada para realizar análisis de datos y seguro te resultará familiar si has trabajado con otros paquetes estadísticos. (Mendoza, 2014)

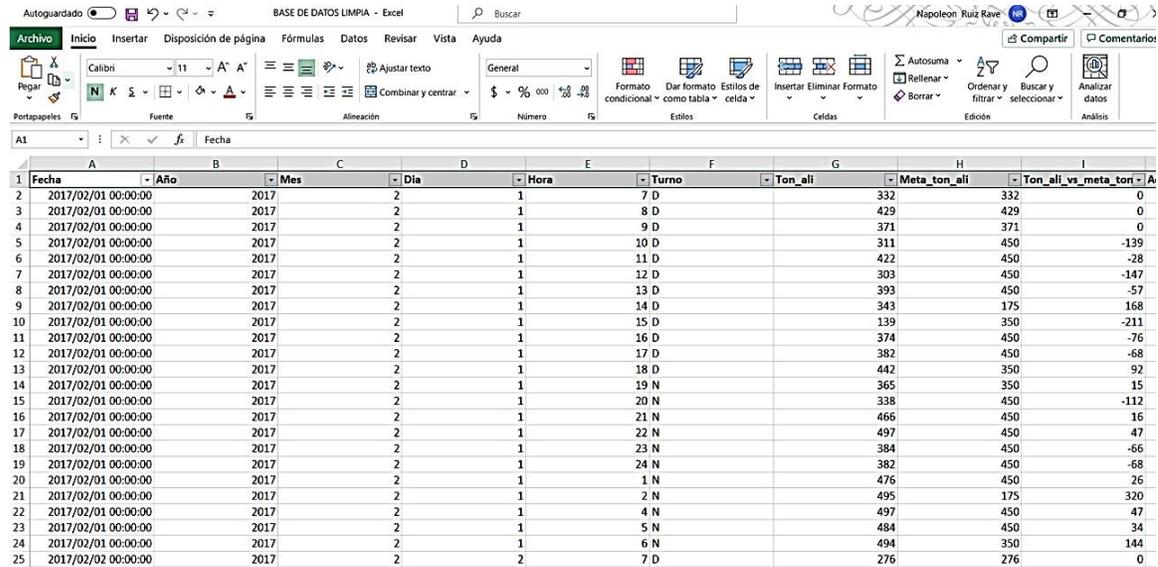
Podemos entender a los data frames como una versión más flexible de una matriz. Mientras que en una matriz todas las celdas deben contener datos del mismo tipo, los renglones de un data frame admiten datos de distintos tipos, pero sus columnas conservan la restricción de contener datos de un sólo tipo. (Mendoza, 2014)

En términos generales, los renglones en un data frame representan casos, individuos u observaciones, mientras que las columnas representan atributos, rasgos o variables. Por ejemplo, así lucen los primeros cinco renglones del objeto iris, el famoso conjunto de datos Iris de Ronald Fisher, que está incluido en todas las instalaciones de R. (Mendoza, 2014)

En este caso particular se utilizó esta herramienta para el manejo y organización de las bases de datos de la pila 19. Cada fila de la hoja de datos corresponde a una observación o valor de una instancia, mientras que cada columna corresponde a un vector que contiene los datos de una variable.

Obteniendo como resultado una base de datos unificada (ver Fig. 10.) en donde se recopilan todas las variables del proceso de manera automatizada por medio de códigos programados en R en formato Excel.

Figura 10. Base de datos final generada por R en formato Excel.



1	Fecha	Año	Mes	Día	Hora	Turno	Ton_ali	Meta_ton_ali	Ton_ali_vs_meta_ton_ali
2	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	7 D		332	332	0
3	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	8 D		429	429	0
4	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	9 D		371	371	0
5	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	10 D		311	450	-139
6	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	11 D		422	450	-28
7	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	12 D		303	450	-147
8	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	13 D		393	450	-57
9	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	14 D		343	175	168
10	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	15 D		139	350	-211
11	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	16 D		374	450	-76
12	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	17 D		382	450	-68
13	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	18 D		442	350	92
14	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	19 N		365	350	15
15	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	20 N		338	450	-112
16	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	21 N		466	450	16
17	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	22 N		497	450	47
18	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	23 N		384	450	-66
19	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	24 N		382	450	-68
20	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	1 N		476	450	26
21	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	2 N		495	175	320
22	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	4 N		497	450	47
23	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	5 N		484	450	34
24	2017/02/01 00:00:00	2017	2	1	6 N		494	350	144
25	2017/02/02 00:00:00	2017	2	2	7 D		276	276	0

Fuente: Elaboración propia.

2. Metodología de balance de masa.

2.1 Estructuración y unificación de la big-data.

A partir de los reportes diarios realizados por la planta de lavado y los reportes de calidad, se generó una base de datos compuesta por 24024 registros y 56 variables, hora a hora desde el 2 febrero del 2017 hasta 7 de octubre del 2019, con el fin de contar con un volumen significativo de datos que permitan analizar la operación y calidad del proceso de separación, dando como resultado la creación del modelo conceptual de la planta de lavado para:

- Toma de decisiones.

- Creación de índices de calidad y rendimiento.
- Control de la operación.
- Indicadores de consumos.
- Capacidad optima.
- Metas por turno, mensuales y anuales.
- Generar e ilustrar informes diarios.
- Correlación y predicción de la producción con respecto a la cantidad y calidad en el alimento.
- Balance de masas globales y AFC.

El proceso de unificación de bases de datos requirió la depuración de los datos procedentes de la planta de lavado (V4_Datos Planta de Lavado 2016 al 2018), para reemplazar o eliminar los valores ausentes con valores más plausibles. Se debe recalcar que, aunque en ocasiones estas técnicas pueden llegar a funcionar bien, no son recomendables en procedimientos en los que se requiere un resultado preciso, ya que estos algoritmos trabajan sobre el supuesto de un cierto sesgo, luego se unificaron las tres bases de datos anteriormente mencionadas.

Gracias a esta estructuración se pudo utilizar herramientas de analítica descriptiva, analítica predictiva, aprendizaje automático (machine learning) y análisis de sensibilidad en los resultados de este trabajo.

La generación de la base de datos estructurada y su análisis estadístico se realizó en el software de análisis estadístico “R” por medio de una herramienta llamada Data Frames.

2.2 Variables operacionales de diseño.

2.2.1 Variables de diseño.

La planta está diseñada para recuperar el carbón de interfase y mejorar la calidad del mismo que posea alta ceniza.

Carbón de interfase: El diseño inicial con el cual fue instalada la planta de lavado para los carbones con bajo BTU o de interfaz (aproximadamente 8400) permite que se obtengan carbones con alto contenido de BTU (aproximadamente 11800), logrando mejoras de calidades del 72%, dependiendo del contenido inicial de BTU con el cual llegue el carbón de interfaz a la planta.

Carbón de alta ceniza: El diseño inicial con el cual se instaló la planta de lavado para el procesamiento de carbones con alta ceniza (aproximadamente 33%) permite que se obtengan carbones con bajos niveles de ceniza (aproximadamente 3-5%).

Cabe resaltar que estas variables fueron diseñadas para un estado estacionario de la planta, o sea, para 500 toneladas de carbón por hora, como se describe a continuación:

- Corriente de alimento:

En esta corriente la planta se diseñó a partir de:

- 480 t/h de carbón.
- 20 m³ de agua por hora.
- Humedad: 12%.
- Carbón de interfase: 8400 BTU y 33% de ceniza.
- Carbón de alta ceniza: 10500 BTU y 16% de ceniza.
- Azufre: 0.80%.

- Corriente de producto:

Esta corriente la planta se diseñó a partir de:

- 288 t/h de carbón.
- Humedad: 14%.
- Carbón de interfase: 11800 BTU y 5% de ceniza.
- Carbón de alta ceniza: 11800 BTU y 3% de ceniza.
- Azufre: 0.60%.

- Corriente de rechazo:

Esta corriente de la planta se diseñó a partir de:

- 192 t/h de carbón.
- BTU de rechazo: 2500-4000

- Recirculación de agua: 95%
- Adición de agua nueva: 5-10%
- % ceniza rechazo: 75%

A demás, la planta tiene un diseño estándar de granulometría de carbón como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Granulometría de carbón.

TAMAÑO	FINOS	NOMINAL	GRUESOS
<50mm, ^, >1,4mm	63%	77%	86%
<1,44 mm, ^, >0,125mm	14%	10%	11%
<0,125mm, ^, > 0mm	23%	13%	3%
	100%	100%	100%
Porcentaje Cap Nominal	77,66%	100%	64%
Rata de alimentación	373 t/h	500 t/h	320 t/h

Fuente: Elaboración propia.

2.3 Valoración metalúrgica actual de la planta de lavado.

2.3.1 Balance de masa y índices metalúrgicos.

Balance global:

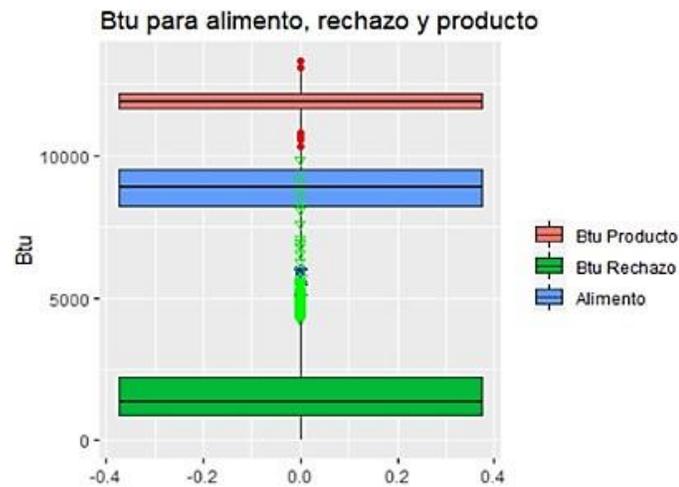
Un balance másico global de planta corresponde a:

$$Alimento_{Planta} = Producto + Rechazo_{Grueso} + Rechazo_{Fino} \quad (12)$$

El balance se puede efectuar por reporte de datos mensuales (ver Fig. 11.) y reporte de datos diarios (ver Fig. 12.). Con los datos mensuales se encuentra que en promedio hay un exceso del 14% en los flujos de salida, mientras que por turnos en igual periodo el balance cierra muy ajustado con error tendiendo a cero (ver Fig. 12. para 500 turnos), esto es; con cero pérdidas. Lo anterior se puede verificar estadísticamente (ver Fig. 13.), realizando un histograma entre las funciones de densidad de masa contra las toneladas de alimento y de la suma de flujos de rechazo más producto. La superposición de ambos

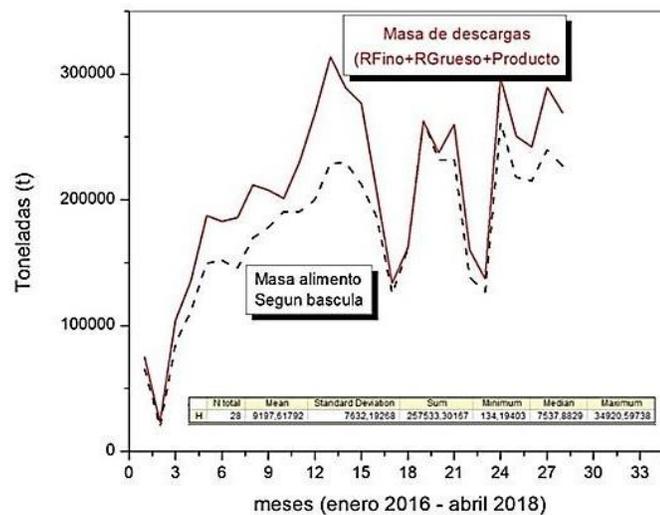
histogramas tan ajustada muestra una tendencia de cero errores en la medición de los balances. Los resultados anteriores con errores tendiendo a cero deberían ser comparables con los errores de medida de las básculas reportados en el diagrama de proceso con factor de precisión entre el 3 y el 6%.

Figura 11. Boxplot BTU para alimento rechazo y producto.



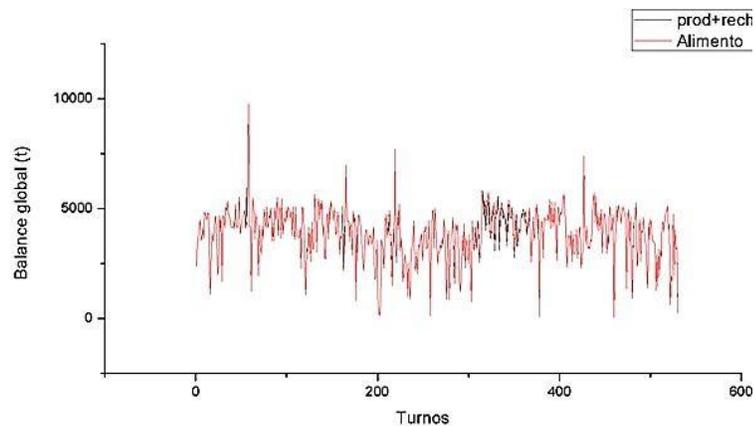
Fuente: (Manejo de Carbones, 2018).

Figura 12. Balance másico global cada mes. Alimento Vs Periodo



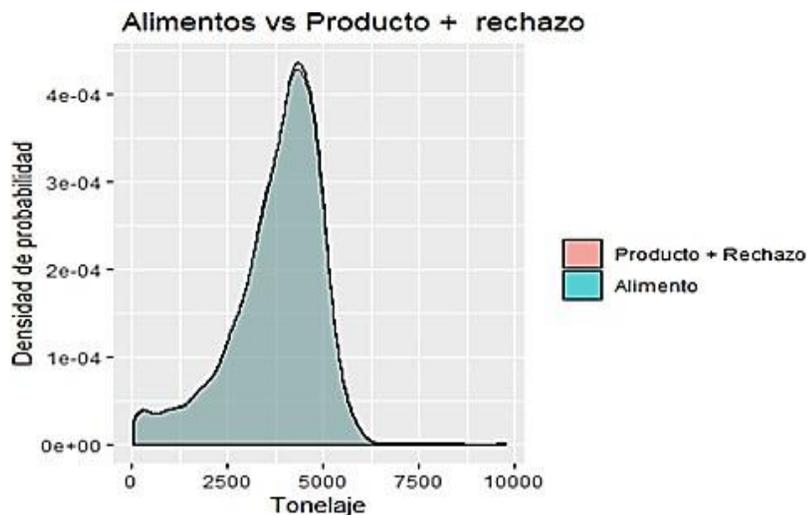
Fuente: (Ortiz, 2018).

Figura 13. Datos de planta. Balance global vs. turnos



Fuente: (Manejo de Carbones, 2018).

Figura 14. Densidades de probabilidad para el alimento y el carbón lavado (producto) más el rechazo.



Fuente: (Planta de lavado, 2017).

2.3.2 Balance de carbón libre de ceniza (AFC: “Ash Free Coal”).

La dilución de la planta de lavado se contempla como el porcentaje de materia mineral que va por cada corriente de ésta, es decir, el alimento de la planta se puede ver como un material binario compuesto por carbón y estéril. Esta dilución se calcula a partir de muestreos sistemáticos proporcionados por la planta, donde para cada mes se registran

valores de ceniza correspondientes a las corrientes de alimento, rechazos gruesos y producto.

Si una corriente cualquiera de la planta está compuesta por carbón y materia mineral, la ceniza reportada en el análisis comprenderá la ceniza estructural ($\%Cz_{INTRINSICA}$) que es la que hace parte del manto de carbón, más la ceniza que proviene de la dilución (material del techo y piso del manto de carbón) ($\%Cz_{INOR}$):

$$M_{MUESTRA} = M_{CARBON} + M_{MINERAL} \quad (13)$$

La masa de ceniza después de una combustión de carbón será:

$$M_{Ceniza} = M_{CARBON} * \frac{\%Cz_{INTRINSICA}}{100} + M_{MINERAL} * \frac{\%Cz_{INOR}}{100} \quad (14)$$

Dividendo la ec. (14) con la ec. (13), se tiene que:

$$\%Cz_{TOTAL} = \%CARBON * \frac{\%Cz_{INTRINSICA}}{100} + (100 - \%CARBON) * \frac{\%Cz_{INTRINSICA}}{100} \quad (15)$$

Sin embargo, considerando la definición del concepto de ceniza, se puede asumir que con la quema de la materia inorgánica formada por aluminosilicatos que configuran los respaldos de los mantos de carbón genera un peso similar al de la materia mineral inicial, de esta manera, el $\%C_{INOR}$ es cercano al 100%, así que la ec. (15) se puede reescribir así:

$$\%CARBON * [1 - \frac{\%Cz_{INTRINSICA}}{100}] = [1 - \frac{\%Cz_{TOTAL}}{100}] \quad (16)$$

$$\%CARBON = \frac{[1 - \frac{\%Cz_{TOTAL}}{100}]}{[1 - \frac{\%Cz_{INTRINSICA}}{100}]} \quad (17)$$

La ec. (17) permite estimar el porcentaje de carbón en una muestra o corriente, si se conoce el $\%Cz_{INTRINSICA}$ y el $\%Cz_{TOTAL}$, lo cual suele determinarse en el laboratorio.

Si se multiplica la ec. (17) a ambos lados por la masa de la muestra global o el flujo másico de la corriente en la planta, queda que:

$$[\text{Masa (o flujo másico) de carbón en la corriente}] = [\text{Masa (o flujo másico) global de la corriente}] * \frac{[1 - \frac{\%Cz_{TOTAL}}{100}]}{[1 - \frac{\%Cz_{INTRINSICA}}{100}]} \quad (18)$$

Una buena aproximación, radica en considerar que el porcentaje de ceniza de la corriente de carbón lavado o de producto es igual al $\%Cz_{INTRINSICA}$, ya que esta corriente es puro carbón sin dilución de los respaldos. De acuerdo con lo anterior:

$$\%Cz_{INTRINSICA} \approx \%Cz_{producto} \quad (19)$$

Aplicando la ec. (18) a cada una de las corrientes alrededor de la planta y teniendo en cuenta la ec. (19), se tiene que:

✓ Para flujo de alimento:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Masa de Carbon} \\ \text{en alimento} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Masa global} \\ \text{de alimento en bascula} \end{array} \right] * \left[\frac{1 - \left(\frac{\%Cz_{ali\ total}}{100} \right)}{1 - \left(\frac{\%Cz_{prod}}{100} \right)} \right] \quad (20)$$

✓ Para corriente de rechazo grueso:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Masa de Carbon} \\ \text{en rechazo grueso} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Masa global} \\ \text{de rechazo grueso} \end{array} \right] * \left[\frac{1 - \left(\frac{\%Cz_{rech\ grueso}}{100} \right)}{1 - \left(\frac{\%Cz_{prod}}{100} \right)} \right] \quad (21)$$

✓ Para corriente de rechazo fino (lodos):

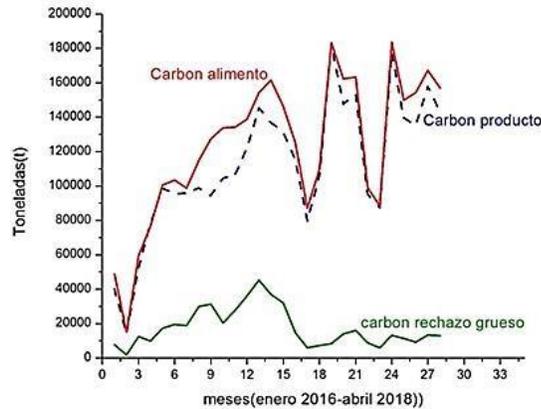
$$\left[\begin{array}{l} \text{Masa de Carbon} \\ \text{en rechazo fino} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Masa global} \\ \text{de rechazo fino} \end{array} \right] * \left[\frac{1 - \left(\frac{\%Cz_{en\ rech\ fino}}{100} \right)}{1 - \left(\frac{\%Cz_{en\ prod}}{100} \right)} \right] \quad (22)$$

El carbón reportado en las ec. 20, 21 y 22 es un carbón libre de ceniza (AFC).

Al utilizar las ecuaciones anteriores es posible determinar para cada mes la cantidad de carbón (AFC) en las corrientes de alimento, rechazo grueso y carbón lavado (producto) (ver Fig. 14.). Para la corriente de rechazo finos, debido a la falta de información, se asume que el 100% de este material es material estéril.

El balance másico de carbón (AFC) reporta que la mayoría de los balances (ver Fig. 15.) reportan más cantidad de carbón en la salida respecto al que se ingresa por el alimento, y estadísticamente hablando se muestra una clara tendencia de estos errores.

Figura 15. Cantidad de carbón (AFC) en las corrientes de alimento, rechazo grueso y carbón lavado (producto).



	N total	Mean	Standard Deviation	Sum	Minimum	Median	Maximum
diferencia alimento - producto menos rechazo grueso	28	-6387,50556	9392,33715	-178850,15567	-36330,3352	-4979,91379	9460,90492

Fuente: (Manejo de Carbones, 2018).

En la Fig. 15. se detalla la diferencia de las masas de carbón (AFC) durante el periodo evaluado según los resultados de la ec. (23). Se puede observar que la mayoría de los resultados del balance genera una diferencia menor a cero, lo que implica que se registra más masa de carbón en las salidas respecto a la de carbón que se alimenta a la planta.

$$[(\text{Masa de carbón en corriente de carbón lavado}) + (\text{Masa de carbón en corriente de rechazo})] - [\text{Masa de carbón en corriente de alimento}] \quad (23)$$

2.3.3 Índices metalúrgicos (rendimiento V y recuperación R en planta).

A partir de las definiciones de indicadores metalúrgicos en proceso de separación:

$$V (\text{Rendimiento}) = \frac{\text{Masa de la corriente de producto}}{\text{Masa de Alimento a la Planta}} \quad (24)$$

$$\%R (\text{Recuperación}) = 100 * \frac{\text{Masa de Carbón (AFC) en corriente de producto}}{\text{Masa de carbon (AFC) en Alimento de Planta}} \quad (25)$$

La tabla 1 presenta los índices de recuperación y rendimiento a partir del balance de masas y basado en los datos suministrados por el Cerrejón, asumiendo que, la corriente de carbón lavado no contiene minerales o estériles provenientes de la dilución de respaldos y que las cenizas que reportan los análisis próximos sólo son el aporte de las cenizas intrínsecas del carbón, a su vez se analizaron las muestras de la corriente rechazo fino en el IM CIMEX hallando el porcentaje de carbón presente que es de 18%.

La recuperación R promedio de la planta de lavado en este período fue del 86.4% (con SD 6.03). El % de pérdidas de carbón en promedio fue de 15.5 % (con SD 6.0).

Tabla 2. Índices metalúrgicos de planta de lavado en período de enero 2016 – abril 20185

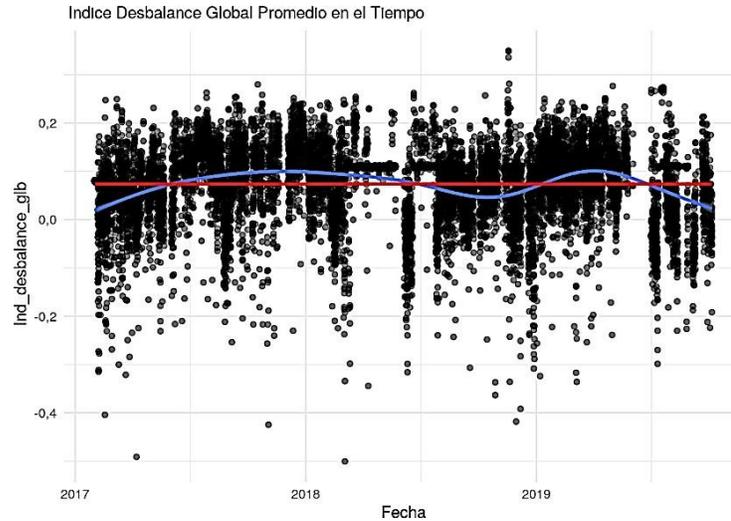
Periodo	Masa de corriente alimento planta (bascula-banda (ton)	Masa de Carbón alimento AFC (bascula banda (ton)	Masa de Carbón AFC en rechazo grueso (bascula banda)	Masa de Carbón AFC en carbón lavado (bascula banda) (ton)	% de Recuperación de carbón AFC	% Rendimiento V	% Perdida de carbón
2016/01	59.154	48,788	7,571	40,316	82,6	68,2	17,4
2016/02	18.126	15,095	1,779	14,031	87,3	77,4	12,7
2016/03	77.645	59,500	12,412	52,574	79,9	67,7	20,1
2016/04	101.499	76,743	9,807	78,366	87,4	77,2	12,6
2016/05	133.612	100,602	17,316	98,721	83,3	73,9	16,7
2016/06	137.207	103,486	19,484	95,450	81,5	69,6	18,5
2016/07	134.632	98,692	18,782	95,870	81,9	71,2	18,1
2016/08	154.204	114,936	30,032	98,885	75,1	64,1	24,9
2016/09	163.527	127,478	31,375	94,314	73,5	57,7	26,5
2016/10	173.502	133,692	20,333	104,518	81,7	60,2	18,3
2016/11	170.949	134,101	27,539	106,432	77,7	62,3	22,3
2016/12	182.766	138,883	36,128	122,055	76,0	66,8	24,0
2017/01	204.196	154,353	45,295	145,389	75,1	71,2	24,9
2017/02	210.738	161,442	37,058	136,657	77,0	64,8	23,0
2017/03	194.454	146,303	31,917	131,308	78,8	67,5	21,2
2017/04	169.088	125,033	14,700	115,305	86,6	68,2	13,4
2017/05	113.909	87,068	5,888	79,834	89,5	70,1	10,5
2017/06	139.660	109,786	7,282	105,997	91,9	75,9	8,1
2017/07	236.345	183,168	8,393	181,686	94,2	76,9	5,8
2017/08	207.262	162,344	13,980	147,557	89,9	71,2	10,1
2017/09	206.992	163,241	16,004	153,642	89,3	74,2	10,7
2017/10	125.964	98,859	8,685	95,162	90,3	75,5	9,7
2017/11	113.736	88,538	5,969	87,308	91,6	76,8	8,4
2017/12	230.587	183,658	13,086	177,596	90,2	77,0	9,8
2018/01	191.951	149,860	11,304	139,529	88,7	72,7	11,3
2018/02	195.490	154,225	9,302	135,462	89,5	69,3	10,5
2018/03	217.073	167,163	13,354	157,827	88,4	72,7	11,6
2018/04	200.653	156,903	12,928	143,294	87,7	71,4	12,3

Fuente: Elaboración propia.

2.3.4 Índice de desbalance global de la planta.

En el análisis realizado, se encontró que la planta de lavado presentaba un desbalance global por hora de 10,34 Ton – 43,51 Ton, como se observa a continuación;

Figura 16. Desbalance global entre inventarios.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.5 Índice de consumos.

Los índices de consumos son valores que reflejan la cantidad de materia prima en kilogramos, que requiere la planta de lavado para procesar 1 Ton carbón.

La tabla 2 muestra un resumen estadístico general de los principales consumos que se presentan en la planta de lavado.

Tabla 3. Principales consumos general de la planta de lavado.

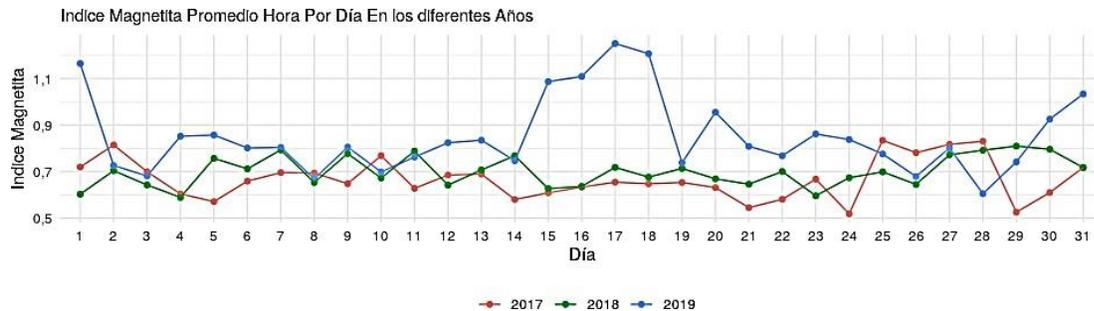
	Magnetita Kg/Ton	Índice aniónico Kg/Ton	Agua m ³	Densidad Kg/m ³	Energía Kw
Q1	0,4211	0,008359	1493	1,340	7300
Median	0,5882	0,010784	1993	1,360	8460
Q3	0,7874	0,013441	2239	1,370	9270

Fuente: Elaboración propia.

Índice Magnetita.

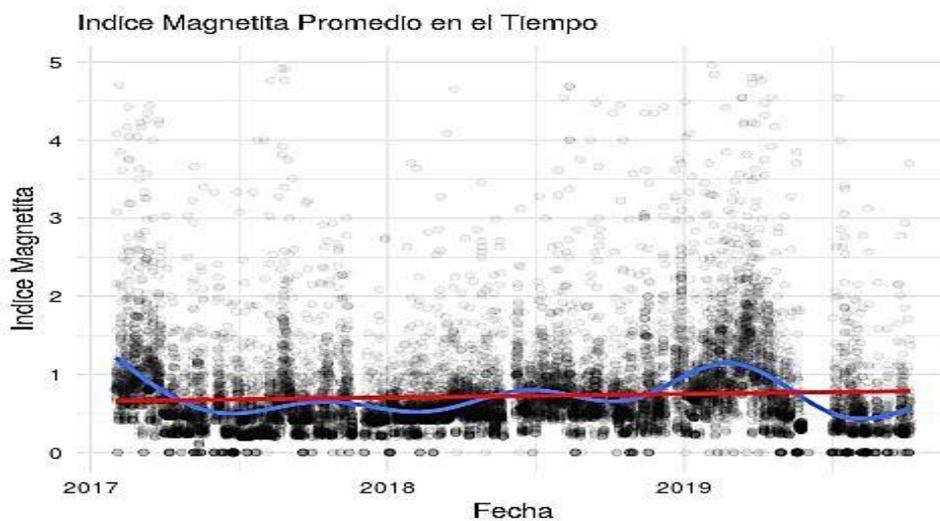
Para el año del 2019 el consumo promedio de magnetita es de 0.82, superando los índices de magnetita promedio para los años 2017 y 2018 donde los promedios de consumos fueron de 0.66 y 0.69. En general el consumo de magnetita oscila entre 0.42 y 0.86, con un valor medio de 0.72.

Gráfico 1. Índice de magnetita por día, en los diferentes años.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Índice de magnetita promedio en el tiempo.

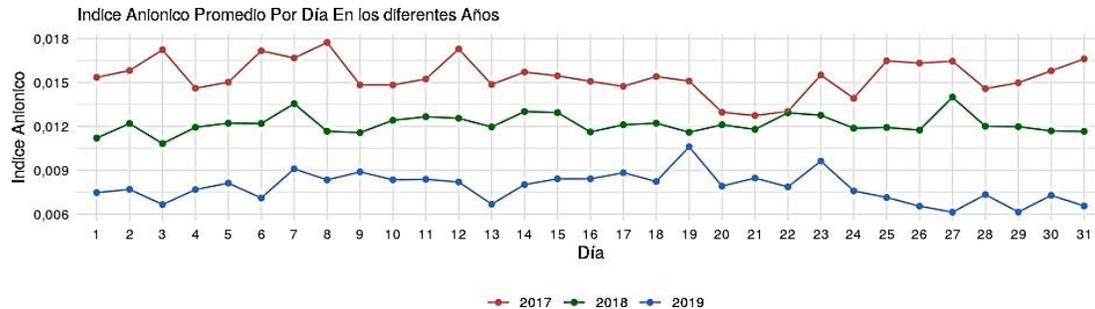


Fuente: Elaboración propia.

Índice Aniónico:

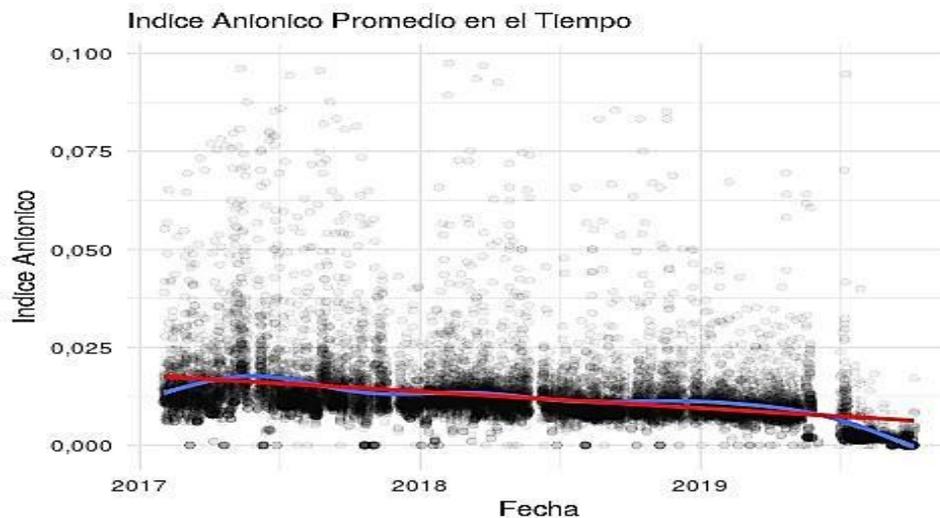
El índice aniónico en general oscila entre 0.08 y 0.01, con un valor promedio de 0.12. Se observa que disminuye el consumo de aniónico para el año 2019 con respecto a los años anteriores.

Gráfico 2. Índice aniónico por día en los diferentes años.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Índice aniónico promedio en el tiempo.

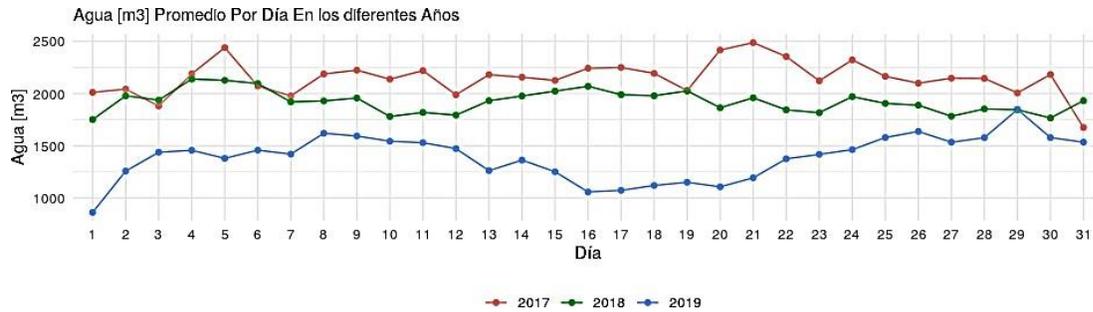


Fuente: Elaboración propia.

Agua (m³):

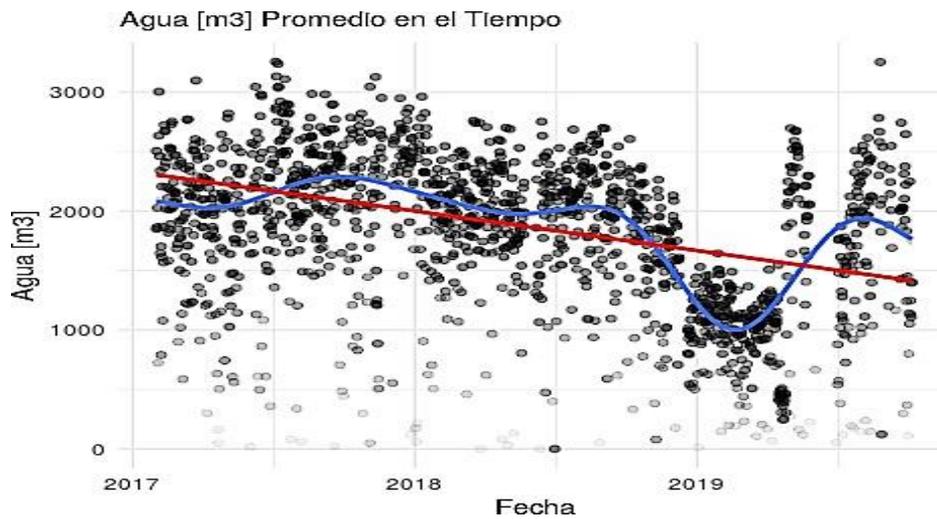
El consumo de agua en general oscila entre 1904 m³ y 2494 m³, con un valor promedio de 2165 m³. Se observa que disminuye el consumo de agua para el año 2019 con respecto a los años anteriores en gran medida, debido a que el promedio es de 1414 m³ para el año 2019, 1930 m³ para el año 2018 y 2165 m³ para el año 2017.

Gráfico 3. Agua promedio por día en diferentes años.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Agua promedio en el tiempo.

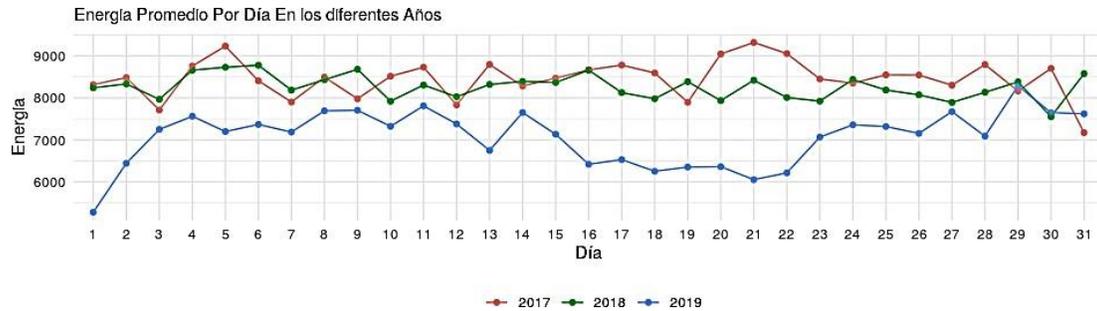


Fuente: Elaboración propia.

Energía:

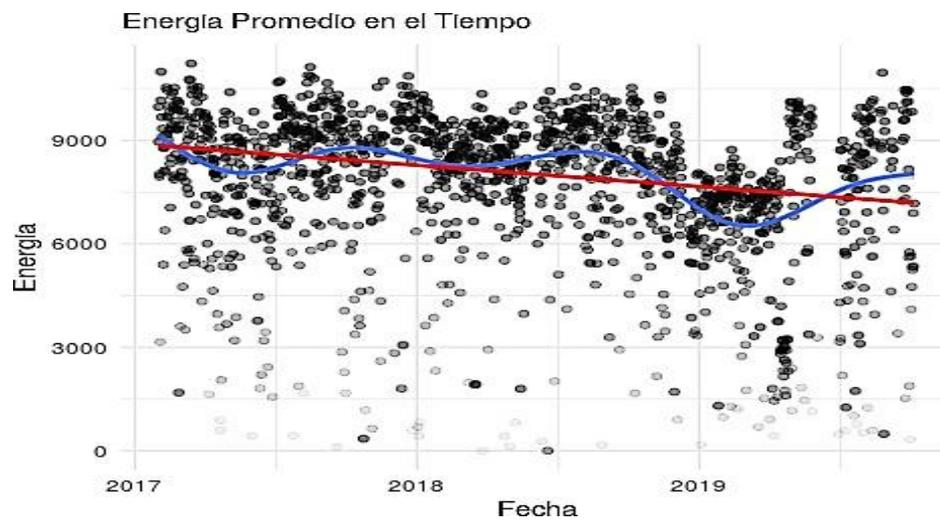
El consumo de energía promedio es de 8059 Kw/hr, oscilando entre 7300 Kw/hr y 9321 Kw/hr, para el año 2019 el consumo promedio disminuye con respecto a los años 2017 y 2018 con un promedio de consumo de 7118 Kw/hr.

Gráfico 4. Energía promedio por día en los diferentes años.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Energía promedio en el tiempo.

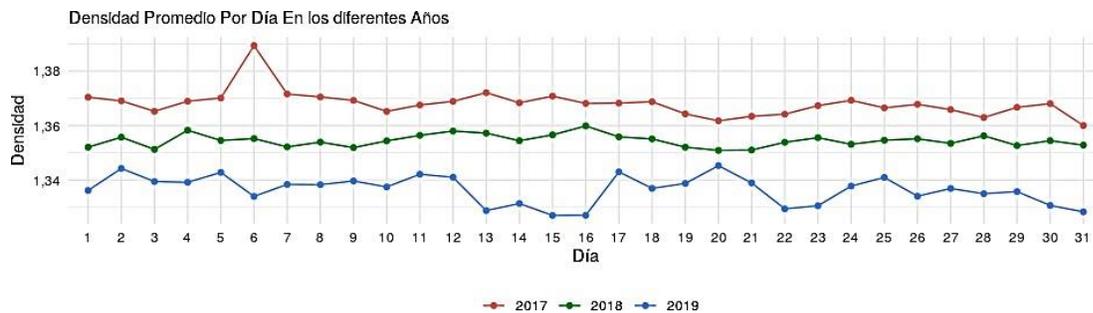


Fuente: Elaboración propia.

Densidad:

La densidad del medio denso en general oscila entre 1.34 y 1.37, con un valor promedio de 1.35. Para el año 2019 la densidad del medio denso promedio 1.33.

Gráfico 5. Densidad promedio por día en los diferentes años.



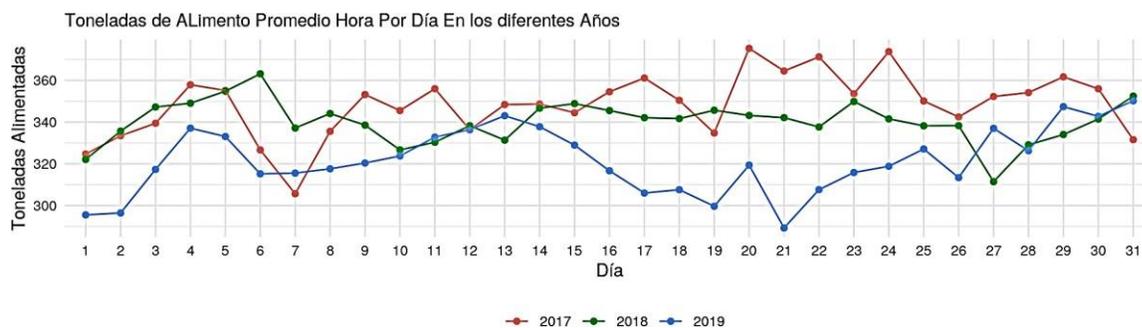
Fuente: Elaboración propia.

2.3.6 Flujos globales planta de lavado.

Corriente de alimento:

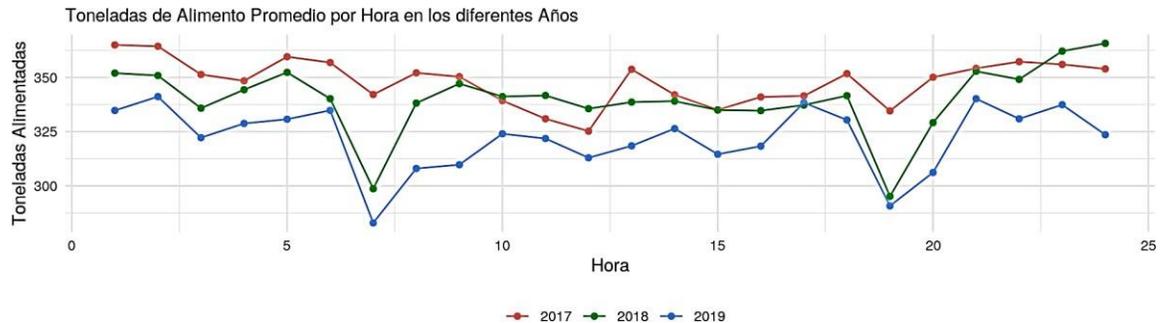
Se aprecia el comportamiento en horas y días respectivamente de las toneladas alimentadas en los periodos 2017, 2018 y 2019. Claramente se observa que las toneladas de alimento han disminuido en los periodos analizados. Para el año 2017 el promedio de alimento por hora fue de 348.5 toneladas, donde 75% de los datos no superan las 430 toneladas por hora, para el 2018 el promedio de toneladas por hora alimentadas fue de 340, donde 75% de los datos no superan las 409 toneladas por hora y para el 2019 el promedio de toneladas por hora alimentadas fue de 322.3, donde 75% de los datos no superan las 394 toneladas por hora.

Gráfico 6. Toneladas de alimento promedio h/día en diferentes años.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 7. Toneladas de alimento promedio por hora en los diferentes años.



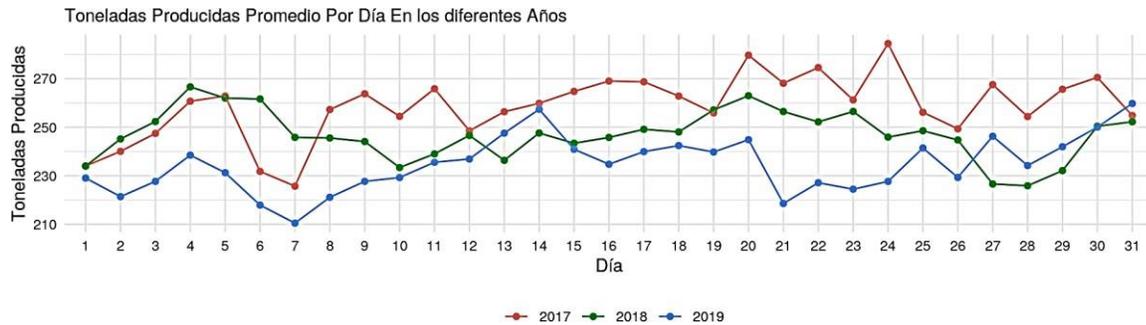
Fuente: Elaboración propia.

EL gráfico anterior muestra la tendencia promedio de las toneladas de alimento por hora (en azul), descontando las horas sin alimento por diferentes motivos para los datos suministrados entre 2017 y 2019. Se evidencia una alta variabilidad de los mismos, en consecuencia, la planta de lavado tiene tasas de alimento muy altas o muy bajas, es decir no conserva el estado estacionario en el tiempo, lo que impide que se alcancen las condiciones de diseño para el proceso de separación, debido a que se presenta acumulación de material en la planta de lavado.

Corriente de carbón lavado:

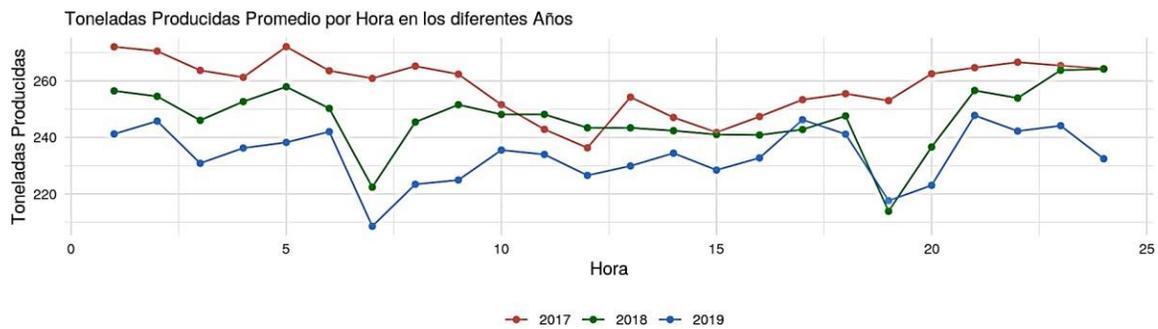
Se aprecia el comportamiento en horas y días respectivamente de las toneladas producidas en los periodos 2017, 2018 y 2019; como es de esperar el comportamiento de los flujos máxicos de la corriente de carbón lavado, tuvo la misma tendencia que el alimento. Para el año 2017, el promedio de toneladas producidas por hora fue de 258.6 toneladas, donde 75% de los datos no superan las 321 toneladas por hora; para el año 2018 el promedio de toneladas producidas por hora fue de 247.13 toneladas, donde 75% de los datos no superan las 300 toneladas por hora, para el año 2019 el promedio de toneladas producidas por hora fue de 233 toneladas, donde 75% de los datos no superan las 287 toneladas por hora. Cabe señalar que, en el turno nocturno, para los tres años, se alimentan y producen más toneladas de material respecto a los otros.

Gráfico 8. Toneladas producidas por día en diferentes años.



Fuente: Elaboración propia.

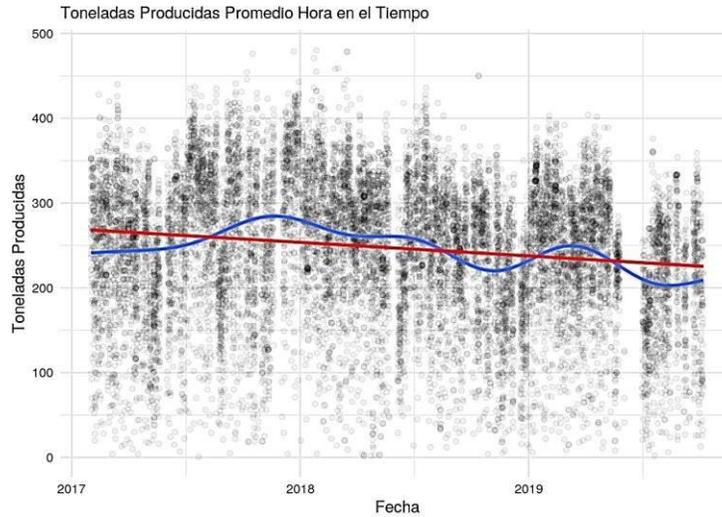
Gráfico 9. Toneladas producidas promedio por hora en diferentes años.



Fuente: Elaboración propia.

La siguiente figura muestra la variabilidad respecto a la media de las toneladas producidas, como se mencionó para los datos del alimento, éstas no conservan el estado estacionario en el tiempo.

Figura 21. Toneladas producidas promedio por hora, en el tiempo.

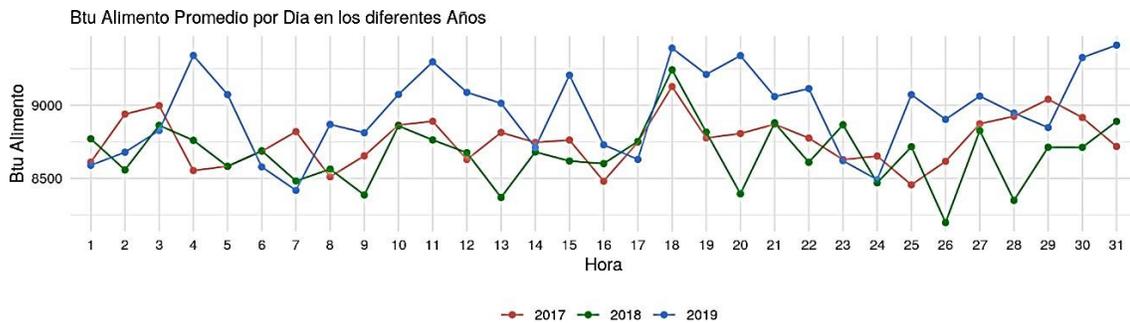


Fuente: Elaboración propia.

Calidades de las corrientes principales

BTU corriente de alimento:

En el periodo del 2019 el BTU de alimento aumenta significativamente respecto a los años anteriores, obteniendo valores promedios de 9000 BTU, mientras que para los años 2017 y 2018 se presentan valores promedios de 8800 y 8700 BTU respectivamente, además se observa una baja variabilidad del BTU del alimento, por consiguiente, se conserva un poder calorífico estable en el tiempo, lo cual asegura un BTU óptimo del carbón lavado.



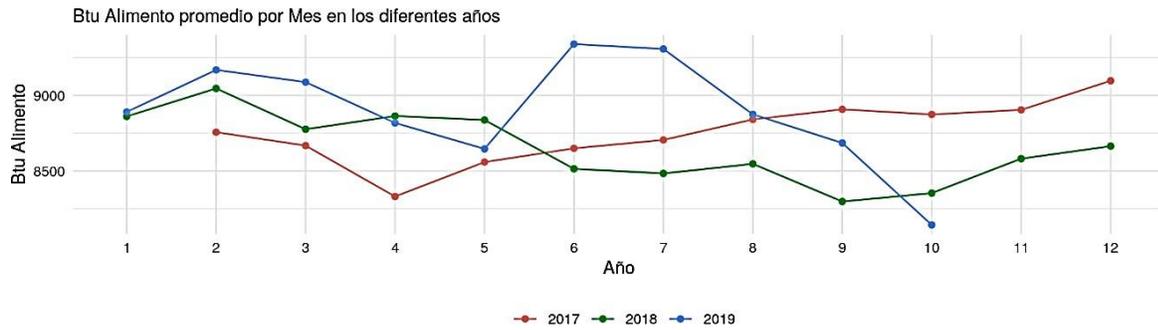
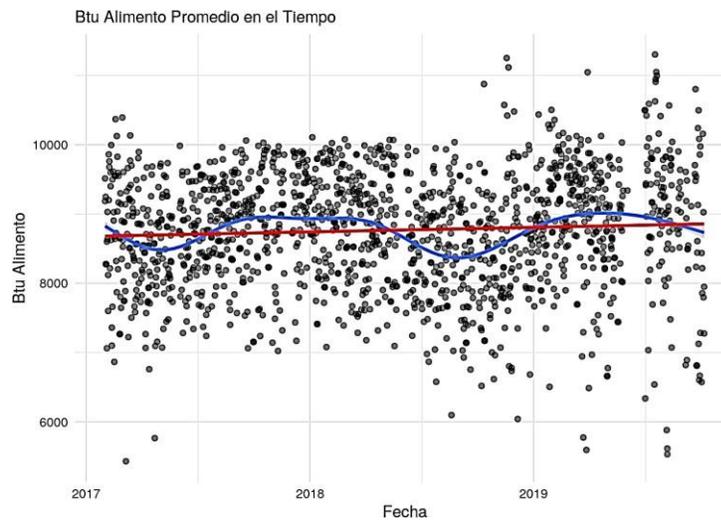


Figura 22. BTU alimento promedio, en el tiempo.

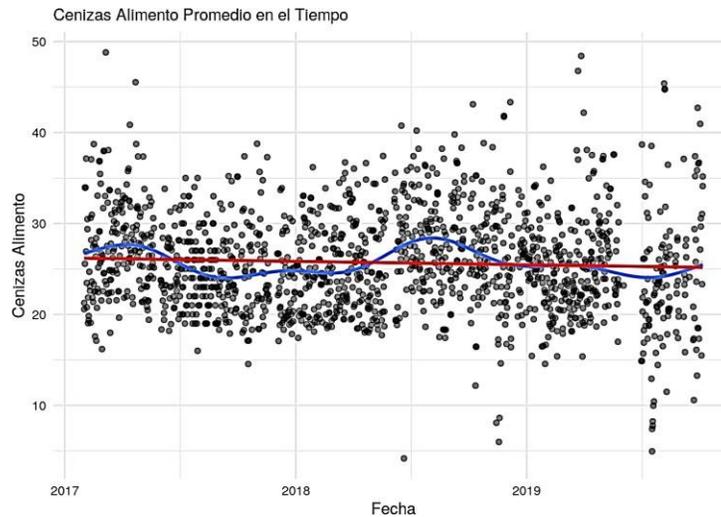


Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de ceniza corriente de alimento:

La cantidad de ceniza de alimento oscila entre un 21% y 29%, con un valor promedio de cenizas del 25%, alcanzando valores máximos hasta el 48%, sin embargo, la tendencia es estable respecto al valor medio reportado para los tres años.

Figura 23. Cenizas en el alimento promedio, en el tiempo.

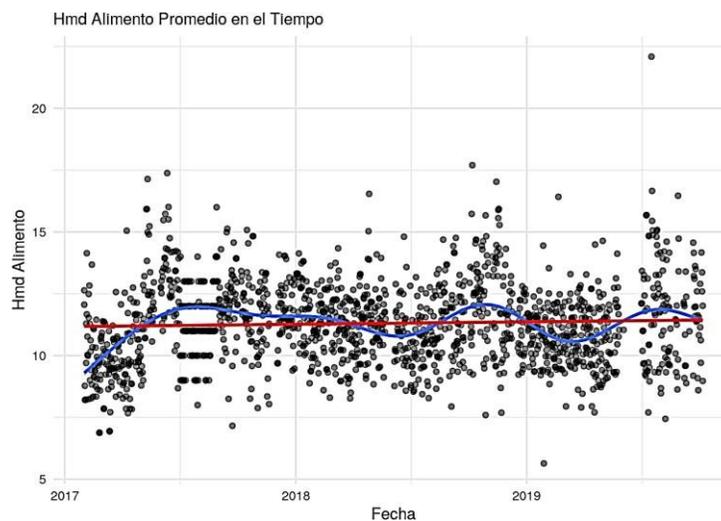


Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de humedad:

Para los tres años analizados se tiene que el valor promedio de porcentaje de humedad alimentada es de 11.30%, oscilando su valor entre 10.12% y 12.26%.

Figura 24. Humedad en el alimento promedio, en el tiempo.



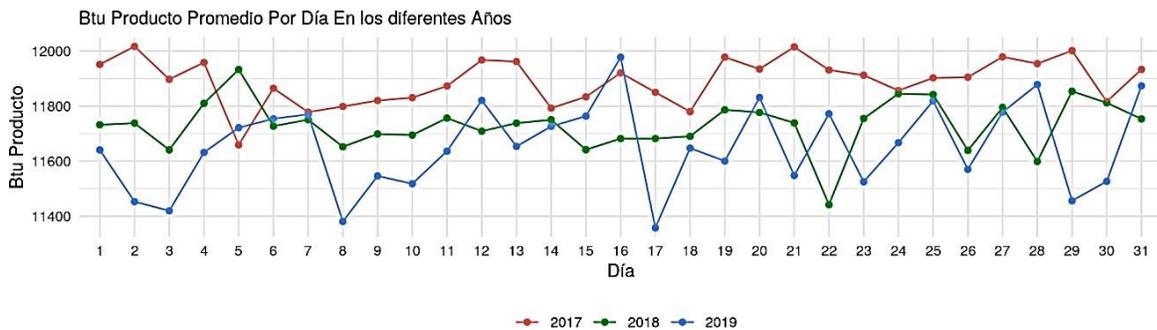
Fuente: Elaboración propia.

BTU corriente de carbón lavado:

En el periodo del 2019 el BTU de carbón lavado disminuye respecto a los años anteriores, el valor promedio de BTU de todas las horas de la planta de lavado de 8944 BTU, mientras que para los años 2017 y 2018 se presentan valores promedios de 11890 y 11727 BTU respectivamente. Para todos los años el BTU del carbón lavado oscila entre 11537 BTU y 12023 BTU.

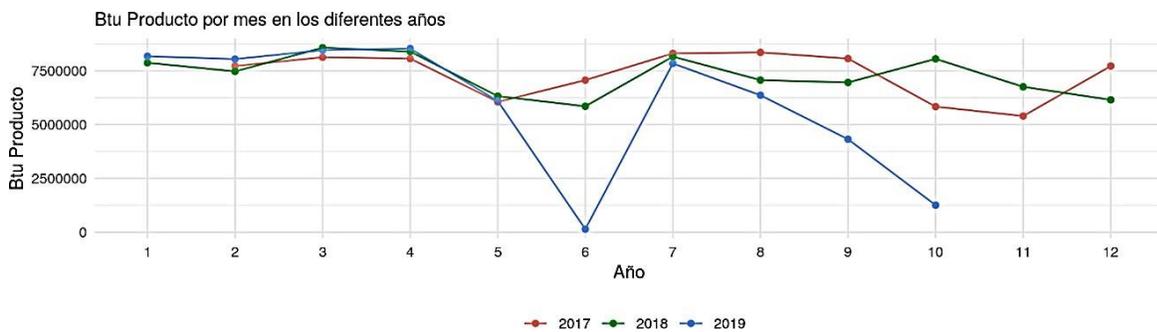
Cabe resaltar que, en los años 2017 y 2018 el contenido de BTU en los carbones es mayor, debido a que la empresa en ese periodo de tiempo extraía un mineral con mayor calidad que el que se comenzó a extraer del 2019 hasta la fecha.

Gráfico 10. BTU carbón lavado (producto) promedio por día en diferentes años.



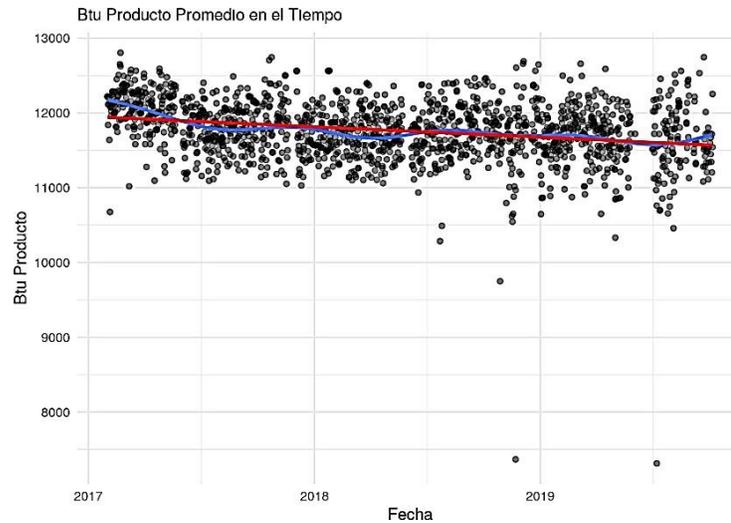
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 11. BTU carbón lavado (producto) por mes en diferentes años.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 25. BTU carbón lavado (producto) promedio, en el tiempo

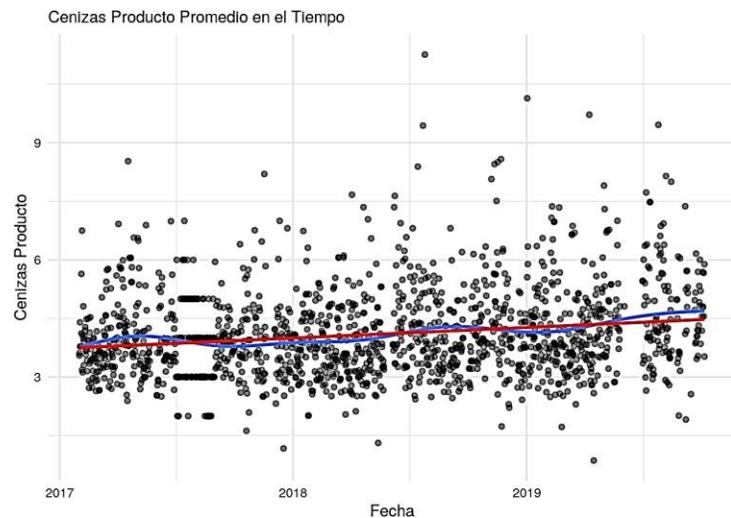


Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de ceniza corriente de carbón lavado:

La cantidad de ceniza de carbón lavado oscila entre un 3.32% y 4.6%, con un valor promedio de cenizas del 4%, alcanzando valores máximos hasta del 11.2%.

Figura 26. Cenizas carbón lavado (producto) promedio, en el tiempo.

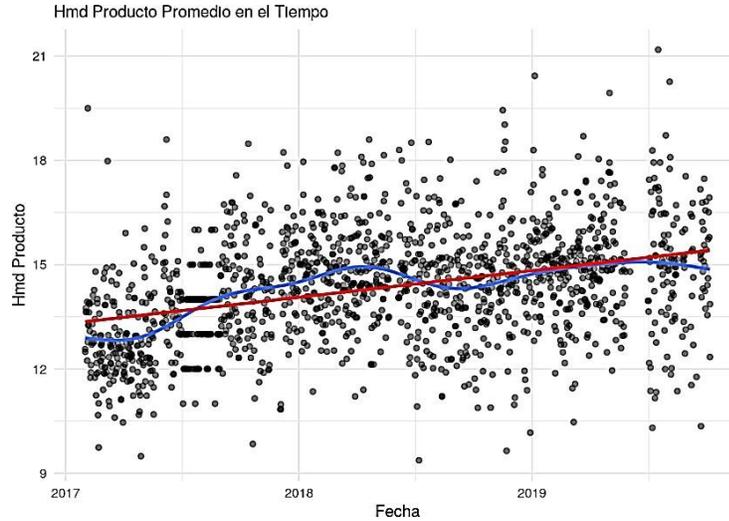


Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de humedad corriente de producto:

Para los tres años analizados se tiene que el valor promedio de porcentaje de Humedad del carbón lavado es de 14.35%, oscilando su valor entre 13.26% y 15.24%, reportando valores máximos del 21.18%. Además, la humedad del carbón lavado tiene una alta variabilidad respecto a su valor promedio.

Figura 27. Humedad carbón lavado (producto) promedio, en el tiempo.

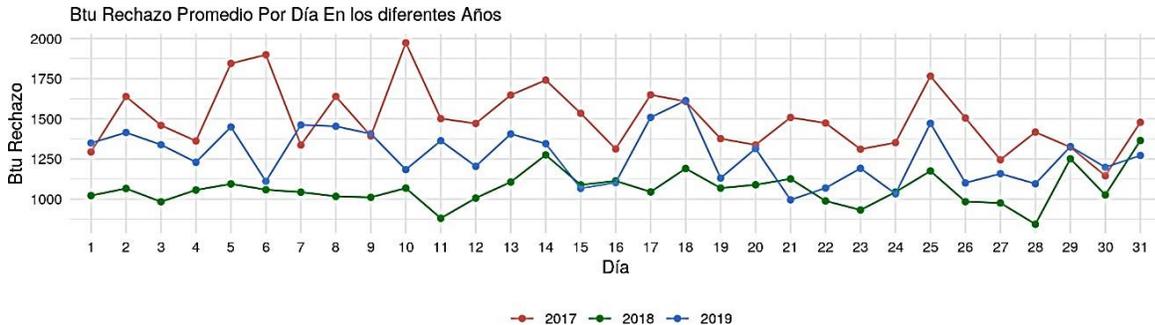


Fuente: Elaboración propia.

BTU rechazo gruesos:

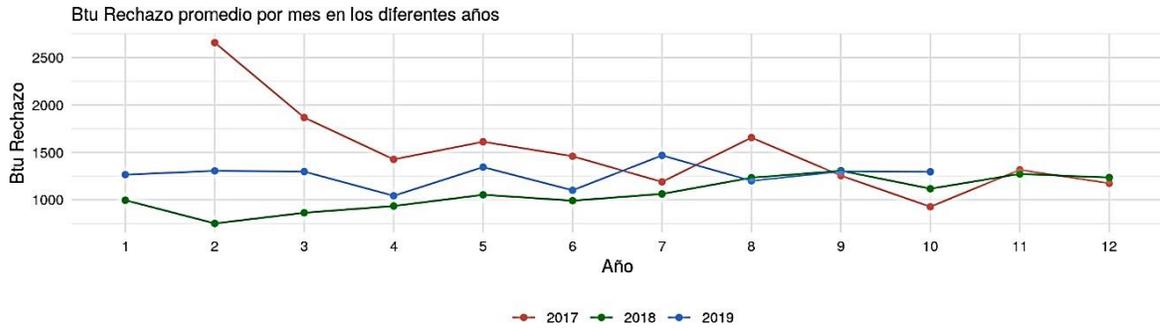
En el periodo del 2019 el BTU de rechazo es menor respecto al 2017, pero es mayor al 2018. El BTU promedio para el 2019 es del 1274, oscilando el BTU entre 911,5 y 1545,4.

Gráfico 12. BTU rechazo promedio por día, en los años.



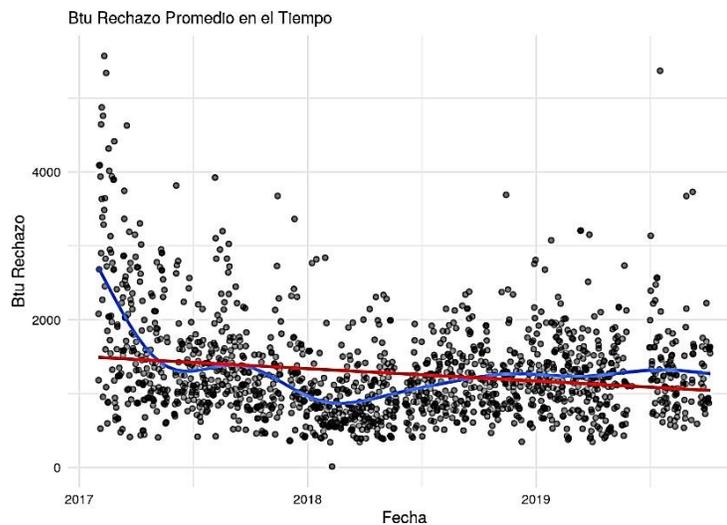
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 13. BTU rechazo promedio por mes, en los años.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. BTU rechazo promedio, en el tiempo.

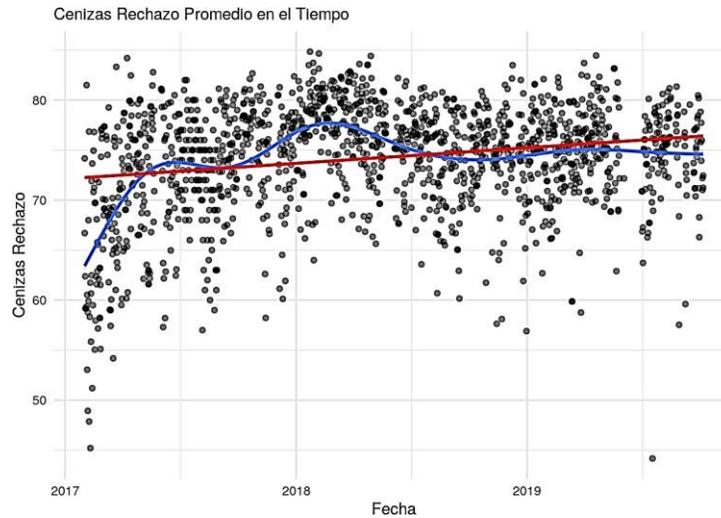


Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de ceniza corriente de rechazo:

La cantidad de ceniza del rechazo oscila entre un 71.53% y 77.97%, con un valor promedio de cenizas del 74.25%, alcanzando valores máximos hasta del 84.84%.

Figura 29. Cenizas rechazo promedio, en el tiempo.

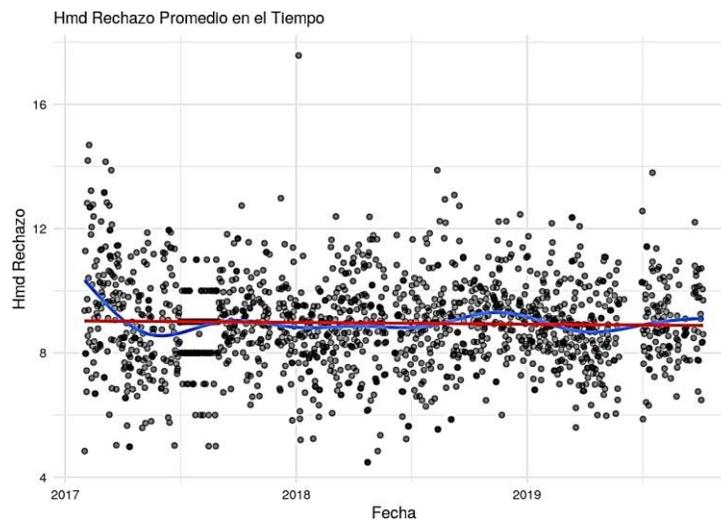


Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje de humedad:

Para los tres años analizados se tiene que el valor promedio de porcentaje de Humedad del rechazo es de 9%, oscilando su valor entre 8% y 9.9%, reportando valores máximos del 14.69%.

Figura 30. Humedad rechazo promedio, en el tiempo.



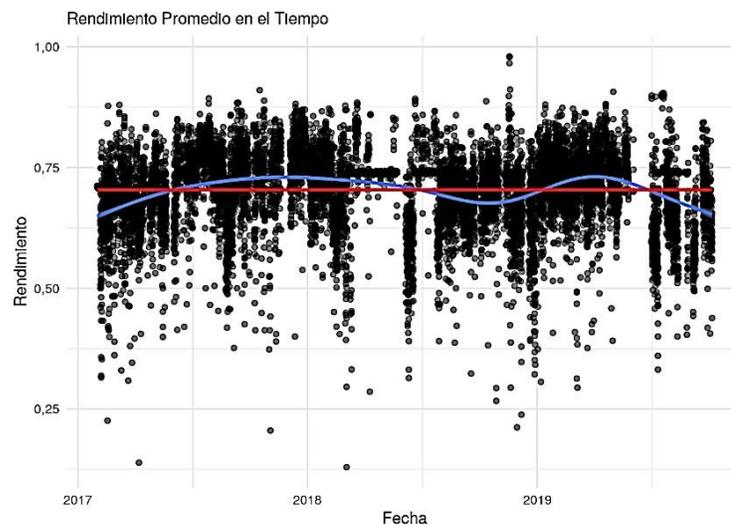
Fuente: Elaboración propia.

2.3.7 Índices metalúrgicos actuales de la planta.

Rendimiento:

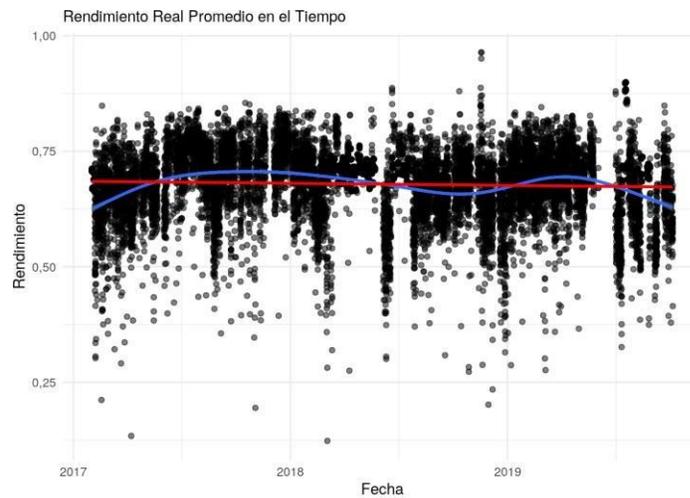
El rendimiento se calcula a partir de la base seca de alimento y carbón lavado por lo tanto se debe descontar las humedades reportadas en los muestreos diarios. El rendimiento promedio en base humedad corresponde al 70,52%, oscilando entre 65,99% y 74,70% en cambio el rendimiento en base seca disminuye al 67,33% en promedio oscilando sus valores entre 63,31% y 72,58%.

Figura 31. Rendimiento promedio, en el tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Rendimiento real promedio, en el tiempo.

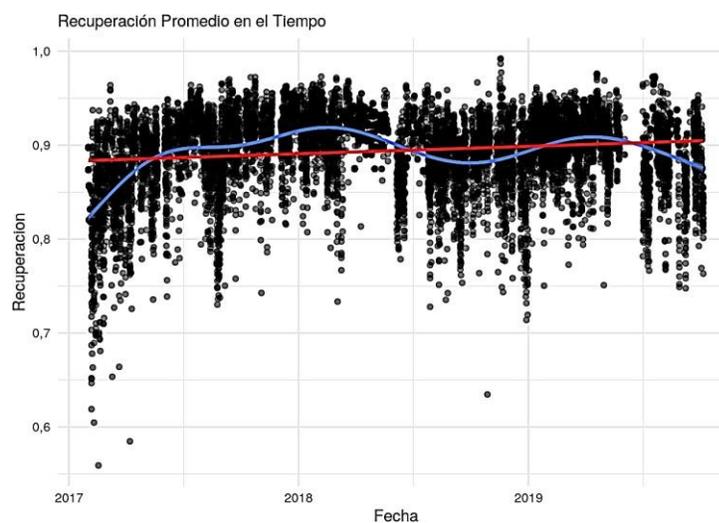


Fuente: Elaboración propia.

Recuperación:

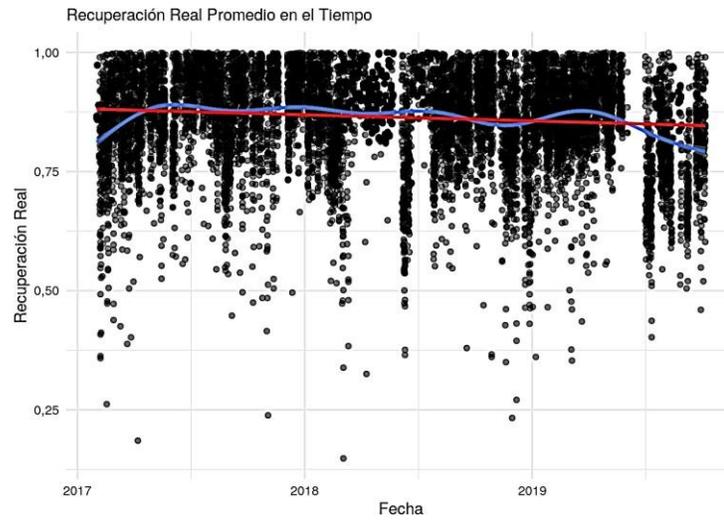
Al igual que en el rendimiento de la planta de lavado por medio del muestreo realizado para el mes de mayo se estima que la recuperación real de la planta de lavado está en un intervalo entre el 87.03% y 90.10%, con un valor promedio del 88.88%.

Figura 33. Recuperación promedio, en el tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Recuperación real promedio, en el tiempo.



Fuente: Elaboración propia.

3. Predicción de metas de producción e indicadores metalúrgicos.

3.1 Modelo de predicción.

Antes de obtener resultados hay que preparar los datos de que dispongamos. Los datos se suelen obtener de muy diversas fuentes y con codificaciones a veces inverosímiles. Pero el delicado programa estadístico, para no indigestarse, necesita que los cocinemos un poco. Normalmente tendremos que jugar con datos ausentes, datos irracionales (en el sentido coloquial no matemático), re-escalar variables, linealizarlas, etc. Para la preparación de los datos se puede disponer de unas reglas elementales generales, pero probablemente sea el momento en que la experiencia y el genio del modelador tengan más cabida e importancia. (Montero Granado, 2016).

El modelo de predicción fue entrenado gracias a la estructuración de los datos recopilados de la planta de lavado cada hora que tuviera alimentación, producción y rechazo, asegurando así un estado estacionario. Las horas sin alimentación fueron depuradas, es decir, las predicciones realizadas obedecen a las horas en que la planta de lavado no presento paros por operación ni mantenimiento estableciendo la meta mínima de alimentación y producción diaria.

También este modelo está diseñado para predecir la calidad y cantidad de carbón lavado a partir de ingresar las toneladas deseadas con sus respectivas calidades. La precisión del modelo está directamente asociado al comportamiento de las variables independientes que influyen en el proceso de lavado, en consecuencia, a medida que se le ingresen nuevas variables (caracterización de la ceniza, distribuciones granulométricas de entrada y salida, caracterización de los mantos de alimento y pilas de acumulación).

3.2 Aplicación del modelo.

Predicción para índices metalúrgicos:

Una vez realizada la estructuración de los datos de la planta y la alimentación de las fórmulas necesarias para la predicción de índices metalúrgico, se obtuvo como resultado una herramienta que pronostica, dependiendo el mes, día y turno, los índices que manejaría la planta como se observa en las figuras 35 y 36.

Figura 35. Predicción de índices metalúrgicos, Febrero Diurno.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 36. Predicción de índices metalúrgicos, Marzo Nocturno.



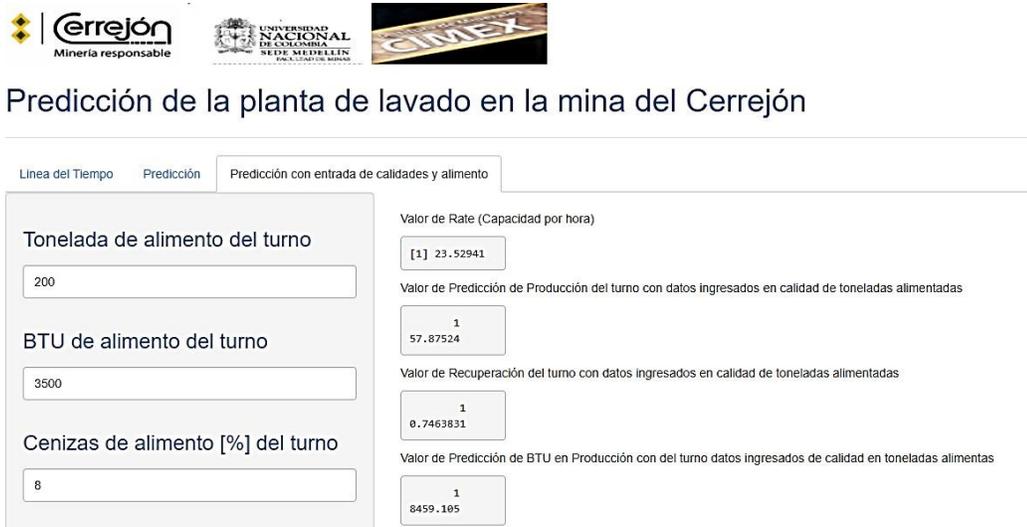
Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que el análisis de los datos nos permite realizar predicciones puntuales debido al comportamiento de los mismos en el tiempo, lo que le permite a la empresa una toma de decisiones conveniente dependiendo de dichas predicciones.

Predicción con entrada de calidades en el alimento.

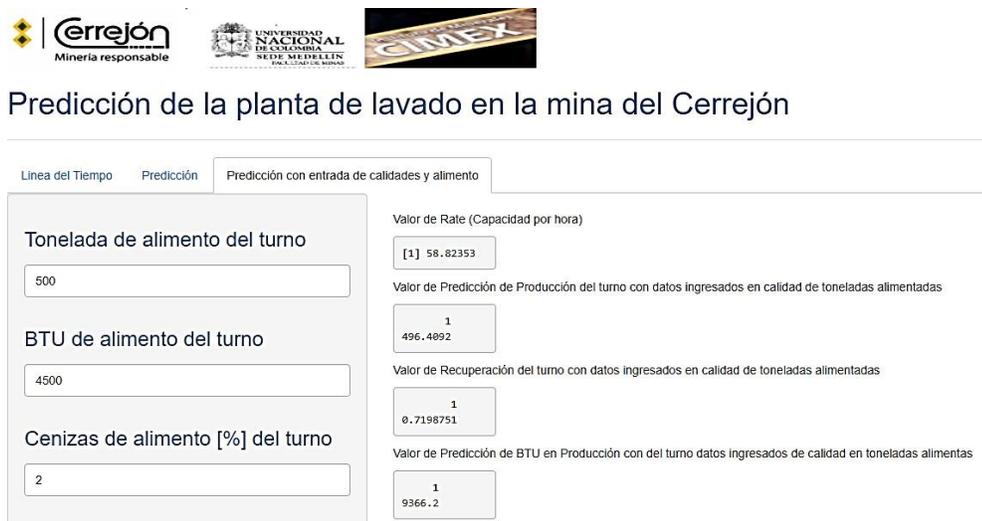
Al mismo tiempo, el análisis de los datos nos permite realizar las predicciones partiendo de una entrada con ciertas características en el alimento, lo que brinda un mayor control en los turnos y optimiza el cumplimiento de metas establecidas. Como se muestra en las figuras 37 y 38.

Figura 37. Predicción de planta con datos de alimentación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 38. Predicción de planta con datos de alimentación 2.



Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones y recomendaciones.

4.1 Conclusiones.

- Actualmente el desbalance másico que presentaba la planta de lavado de Cerrejón mejoró notablemente comparado con los desbalances realizados en los años anteriores. Lo que significa que las recomendaciones realizadas en este estudio fueron aplicadas por la compañía y se refleja en la mejora del rendimiento de los procesos de lavado de carbón de Cerrejón.
- La planta en sus valores promedio no se acerca a sus específicos de 500 t/hora.
- La fuerte variación de los flujos másicos en las diferentes corrientes de la planta refleja condiciones no estacionarias durante la operación de la planta en las diferentes escalas de tiempo (hora, turno, día etc.).
- La variación de ceniza y BTU en la corriente de alimento, se sugiere controlarla con operaciones de homogenización en la pila de entrada, la cual sería una especificación de diseño.
- No se encuentra una relación explícita entre BTU y contenido de ceniza dado que ambos indicadores especifican calidad de carbón.
- El aumento de magnetita se debe a fallas en el tamiz 1, el cual deja pasar partículas finas a las corrientes de gruesos.
- La generación y estandarización de la información en base de datos estructuradas permite analizar el comportamiento de las principales variables de operación, generando herramientas para toma de decisión.
- Actualmente la planta de lavado cuenta con una capacidad promedio de 338.4 toneladas alimentadas por hora, con un porcentaje de cenizas de 25,7%, porcentaje de humedad de 11,30% y un BTU de 8765 BTU. Por otra parte, el carbón lavado que corresponde a esta capacidad de alimentación es de 247.5 toneladas por hora, con un porcentaje de cenizas de 4.09%, porcentaje de azufre del 0.5%, porcentaje de humedad del 14.35% y un BTU de 11773 BTU.

- La capacidad óptima de alimentación varía entre 283 tonelada por hora y 412 tonelada por hora.

4.2 Discusión y recomendaciones.

Es necesario que a futuro la planta de lavado se automatice en un 100% dada su importancia en la refinación de carbón. Esto debe ir intrínsecamente relacionado con la aplicación de herramientas tecnológicas como la anteriormente descrita, debido a que, facilitaría la toma de decisiones, organización de los datos y optimización de equipos, lo que brindaría grandes ventajas y altos rendimientos a la hora de obtener resultados.

Y no solo verlo desde el punto de vista de automatización de plantas, también puede verse desde un espectro mayor, dada la versatilidad de aplicabilidad que tienen estas herramientas tecnológicas, es decir, pueden permitir mejoría en muchas operaciones relacionadas con la minería.

Recomendaciones:

- Se debe alimentar constantemente la base de datos obtenida del proceso realizado por R, para que el modelo cada día mejore su predicción.
- La planta debe mantener el estado estacionario, de tal manera que no se saturen los equipos.
- Realizar constantemente los balances de masas con el fin de disminuir el índice de desbalance global del proceso.
- Ajustar la operación de la planta a las características dadas en la valoración metalúrgica actual.
- Permitir que la academia siga realizando ajustes a los procesos industriales que se manejan en estas faenas mineras.

5. Bibliografía.

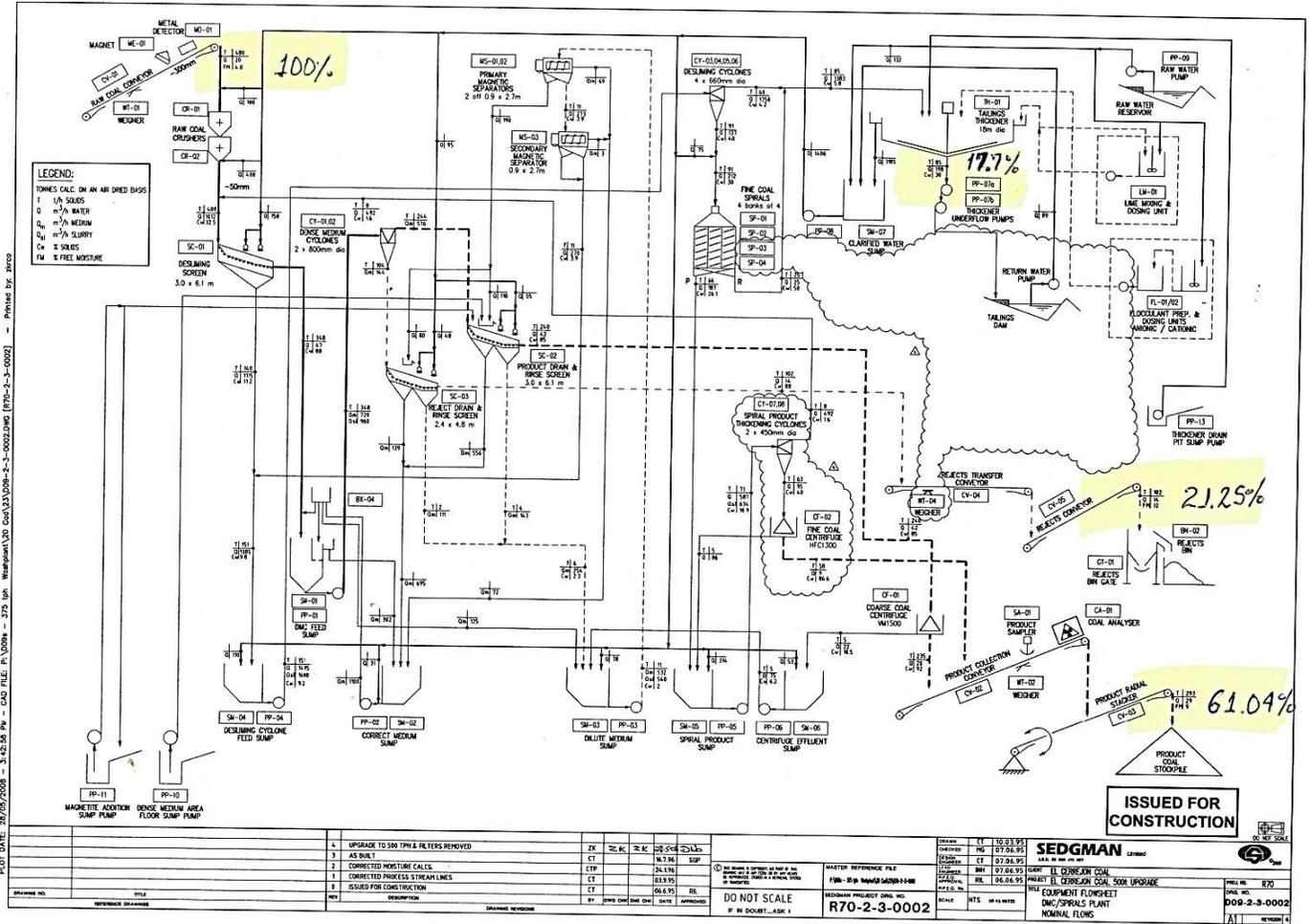
- ANM, A. N. M. (2003). *Glosario minero*.
- Becerra Espinosa, J. . (2015). *Estadística Descriptiva*.
- Burt, R., & Mills, C. (1984). Gravity concentration technology. *Elsevier*.
- Bustamante Rúa, O., Jaime Restrepo, O., & Gaviria Cartagena, C. (2008). *Concentración de Minerales*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Corrección. (2015). *Discrepancias Pila 19 (Producto)*.
- Faraldo, P., & Pateiro, B. (2013). *Estadística y Metodología de la Investigación*.
- Fragozo, N. (2015). *Presentación-UAS-especificaciones ux5_DRON_CERREJON*.
- Hernandez, F. (2021). *Manual de R*.
- Londoño Garcia, R. (2015). *Balance de masa y energía sin reacciones químicas*.
- Manejo de Carbones. (2018). *V4_Datos Planta de Lavado 2016 a 2018*.
- Marin, J. M. (2015). *Medidas descriptivas*. Departamento de estadística.
- Mendoza, J. (2014). *R para principiantes*.
- Montero Granada, R. (2016). *Modelos de regresión lineal múltiple*.
- Orellana, L. (2001). *Estadística Descriptiva*.
- Ortiz, A. (2018). *Datos Planta de Lavado 2016-2018*.
- Pantoja, J. (2015). *Ajuste Volumétrico Diario de la Pila 19*.
- Planta de lavado. (2017). *Registro de medición de la Planta de lavado y Pila 19*.
- R Development Core Team. (2016). *Introducción a R*.
- Rendon Macías, M. E., Villasis Keeve, M. A., & Miranda Novales, M. G. (2016). Estadística Descriptiva. *Revista Alergia Mexico*, 63(4), 397–407.
- Rey, C., & Ramil, M. (2007). *Introducción a la estadística descriptiva*. (Segunda ed).
- SGC, S. G. C. (2018). *Recursos minerales de Colombia*.

Van Grieken, K. (2011). *Informe Cálculo de Muestreo_kvangrie*.

Van Grieken, K. (2018). *Peso camiones carboneros Pila 19*.

6. Anexos.

A. Anexo 1. Proceso planta de lavado.



```
##  
## Attaching package: 'dplyr'
```

```
## The following objects are masked from 'package:stats':  
##  
##   filter, lag
```

```
## The following objects are masked from 'package:base':  
##  
##   intersect, setdiff, setequal, union
```

```
## New names:  
## * ` ` -> ...2  
## * ` ` -> ...3  
## * ` ` -> ...4  
## * ` ` -> ...5  
## * ` ` -> ...6  
## * ... and 9 more problems
```

```
## New names:  
## * ` ` -> ...2  
## * ` ` -> ...3  
## * ` ` -> ...4  
## * ` ` -> ...5  
## * ` ` -> ...6  
## * ... and 15 more problems
```

- Viendo la clase de tabla

```
## [1] "tbl_df"      "tbl"        "data.frame"
```

- Pasando a data Frames

```
## [1] "data.frame"
```

- Creando tabla de la base de datos complemento

FECHA	Tur...	Grupo	Analista	Btu_Ali	Cen_Ali	Azu_Ali	Hmd_...	Btu_Pro	Cen_Pro
<date>	<chr>	<chr>	<chr>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>
2017-02-25	D	TITANES	AORTIZ1	8651	29.13	0.52	9.74	12369	3.47

1 row | 1-10 of 17 columns

FECHA	Tur...	Grupo	Analista	Btu_Ali	Cen_Ali	Azu_Ali	Hmd_...	Btu_Pro	Cen_Pro
<date>	<chr>	<chr>	<chr>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>
2017-02-25	N	PATRIOTAS	MNARVA2	7266	36.85	0.32	6.88	12125	3.57

1 row | 1-10 of 17 columns

FECHA	Tur...	Grupo	Analista	Btu_Ali	Cen_Ali	Azu_Ali	Hmd_...	Btu_Pro	Cen_Pro
<date>	<chr>	<chr>	<chr>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>
2017-02-25	D	TITANES	AORTIZ1	8651	29.13	0.52	9.74	12369	3.47
2017-02-25	N	PATRIOTAS	MNARVA2	7266	36.85	0.32	6.88	12125	3.57

2 rows | 1-10 of 17 columns

FECHA	Tur...	Grupo	Analista	Btu_Ali	Cen_Ali	Azu_Ali	Hmd_...	Btu_Pro	Cen_Pro
<date>	<chr>	<chr>	<chr>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>
2016-01-14	D	TITANES	MNARVA2	9549	24.07	0.66	8.25	12181	3.03
2016-01-15	D	CARIBES	HLAMBRA	10185	19.77	0.73	9.01	12253	3.15
2016-01-20	D	LIDERES	AORTIZ1	9954	24.43	0.64	5.01	11732	3.29
2016-01-20	N	TITANES	MNARVA2	9678	23.62	0.61	6.86	11332	6.37
2016-01-21	D	PATRIOTAS	AORTIZ1	9967	19.73	0.82	10.46	11772	3.23
2016-01-21	N	LIDERES	MNARVA2	9676	21.57	0.71	9.51	12256	3.36
2016-01-22	D	TITANES	AORTIZ1	11161	12.94	0.76	9.72	13086	2.66
2016-01-22	N	PATRIOTAS	MNARVA2	10170	17.63	0.70	9.72	11795	2.60
2016-01-23	D	CARIBES	DUSMA1	9714	20.68	0.60	10.63	12206	4.14
2016-01-23	N	TITANES	HLAMBRA	8475	28.44	0.86	10.59	12291	3.67

1-10 of 1,326 rows | 1-10 of 17 columns

Previous **1** 2 3 4 5 6 ... 133 Next

- **Viendo tabla 1**

SUPERINTENDENCIA DE PLANTAS DE CARBON <chr>	...2 <chr>	...3 <chr>
REPORTE CUARTO DE CONTROL - PLANTA DE LAVADO	NA	NA
FECHA	NA	ANALISTA DÍA
42791	NA	ABELIS ORTIZ ARÉVALO
HORA	TONELADAS ALIMENTADAS	NA
NA	Meta Hora	REAL vs PLAN
7	379	o
8	342	o
9	402	o
10	450	-88
11	450	-104

1-10 of 32 rows | 1-3 of 15 columns Previous 1 2 3 4 Next

- **Viendo la tabla adiciones.**

SUPERINTENDENCIA DE PLANTAS DE CARBON <chr>
REPORTE CUARTO DE CONTROL
METALES Y ROCAS
FECHA MM-DD-AA
42791
EVENT.
1
2
3
4
PLANTA # 1: Compuerta cambio de silo obstruida de 08:12 a 08:40, de 11:33 a 12:07. Rata restringida x alta granulometría, se detiene la Trituradora #1 para ajuste de segmentos de 13:20 a 17:42.

1-10 of 102 rows | 1-1 of 21 columns Previous 1 2 3 4 5 6 ... 11 Next

- **Viendo el nombre de las variables.**

```
## [1] "SUPERINTENDENCIA DE PLANTAS DE CARBON"  
## [2] "...2"  
## [3] "...3"  
## [4] "...4"  
## [5] "...5"  
## [6] "...6"  
## [7] "...7"  
## [8] "...8"  
## [9] "...9"  
## [10] "...10"  
## [11] "...11"  
## [12] "...12"  
## [13] "...13"  
## [14] "...14"  
## [15] "...15"
```

```
## [1] "SUPERINTENDENCIA DE PLANTAS DE CARBON"  
## [2] "...2"  
## [3] "...3"  
## [4] "...4"  
## [5] "...5"  
## [6] "...6"  
## [7] "...7"  
## [8] "...8"  
## [9] "...9"  
## [10] "...10"  
## [11] "...11"  
## [12] "...12"  
## [13] "...13"  
## [14] "...14"  
## [15] "...15"  
## [16] "...16"  
## [17] "...17"  
## [18] "...18"  
## [19] "...19"  
## [20] "...20"  
## [21] "...21"
```

- **Llamando librería.**

SUPERINTENDENCIA DE PLANTAS DE CARBON <chr>	...2 <chr>	...3 <chr>
REPORTE CUARTO DE CONTROL - PLANTA DE LAVADO	NA	NA
FECHA	NA	ANALISTA DÍA
42791	NA	ABELIS ORTIZ ARÉVALO
HORA	TONELADAS ALIMENTADAS	NA
NA	Meta Hora	REAL vs PLAN
7	379	o
8	342	o
9	402	o
10	450	-88
11	450	-104

1-10 of 32 rows | 1-3 of 15 columns Previous **1** 2 3 4 Next

SUPERINTENDENCIA DE PLANTAS DE CARBON <chr>
REPORTE CUARTO DE CONTROL
METALES Y ROCAS
FECHA MM-DD-AA
42791
EVENT.
1
2
3
4
PLANTA # 1: Compuerta cambio de silo obstruida de 08:12 a 08:40, de 11:33 a 12:07. Rata restringida x alta granulometría, se detiene la Trituradora #1 para ajuste de segmentos de 13:20 a 17:42.

1-10 of 102 rows | 1-1 of 21 columns Previous **1** 2 3 4 5 6 ... 11 Next

Limpiando base de datos.

- Eliminando filas innecesarias.

SUPERINTENDENCIA DE PLANTAS DE CARBON		...2	...3	...4	...5	...6
<chr>		<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>
6	7	379	0	379	379	246.35
7	8	342	0	342	721	222.3
8	9	402	0	402	1123	261.3
9	10	450	-88	362	1485	292.5
10	11	450	-104	346	1831	292.5
11	12	450	50	500	2331	292.5
12	13	450	26	476	2807	292.5
13	14	300	148	448	3255	195
14	15	450	-37	413	3668	292.5
15	16	450	26	476	4144	292.5

1-10 of 27 rows | 1-7 of 16 columns Previous **1** 2 3 Next

```
## [1] "SUPERINTENDENCIA DE PLANTAS DE CARBON"
## [2] "...2"
## [3] "...3"
## [4] "...4"
## [5] "...5"
## [6] "...6"
## [7] "...7"
## [8] "...8"
## [9] "...9"
## [10] "...10"
## [11] "...11"
## [12] "...12"
## [13] "...13"
## [14] "...14"
## [15] "...15"
## [16] "...16"
## [17] "...17"
## [18] "...18"
## [19] "...19"
## [20] "...20"
## [21] "...21"
```

- **Cambiando nombre de variable.**

Hora <chr>	Meta_ton_ali <chr>	Ton_ali_vs_meta_ton_ali <chr>	Ton_ali <chr>	Acumulado_ton_ali <chr>	Meta_ton_prod <chr>
6 7	379	0	379	379	246.35
7 8	342	0	342	721	222.3
8 9	402	0	402	1123	261.3
9 10	450	-88	362	1485	292.5
10 11	450	-104	346	1831	292.5
11 12	450	50	500	2331	292.5
12 13	450	26	476	2807	292.5
13 14	300	148	448	3255	195
14 15	450	-37	413	3668	292.5
15 16	450	26	476	4144	292.5

1-10 of 27 rows | 1-7 of 16 columns Previous 1 2 3 Next

- **Eliminando fila total.**

H... <chr>	Meta_ton_ali <chr>	Ton_ali_vs_meta_ton_ali <chr>	Ton_ali <chr>	Acumulado_ton_ali <chr>	Meta_ton_prod <chr>
7	379	0	379	379	246.35
8	342	0	342	721	222.3
9	402	0	402	1123	261.3
10	450	-88	362	1485	292.5
11	450	-104	346	1831	292.5
12	450	50	500	2331	292.5
13	450	26	476	2807	292.5
14	300	148	448	3255	195
15	450	-37	413	3668	292.5
16	450	26	476	4144	292.5

1-10 of 24 rows | 1-6 of 15 columns Previous 1 2 3 Next

- **Eliminando variables Down y otras.**

H...	Meta_ton_ali	Ton_ali_vs_meta_ton_ali	Ton_ali	Acumulado_ton_ali	Meta_ton_prod
<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>
7	379	0	379	379	246.35
8	342	0	342	721	222.3
9	402	0	402	1123	261.3
10	450	-88	362	1485	292.5
11	450	-104	346	1831	292.5
12	450	50	500	2331	292.5
13	450	26	476	2807	292.5
14	300	148	448	3255	195
15	450	-37	413	3668	292.5
16	450	26	476	4144	292.5

1-10 of 24 rows | 1-6 of 11 columns

Previous 1 2 3 Next

- Eliminando variables en adicciones.

	...10	...11	...12	...13	...14	...15	...16	...17	...18
	<lg>	<chr>							
29	NA	7200	NA	65	NA	2470	NA	10149	100
31	NA	4800	NA	75	NA	2150	NA	9890	0

2 rows | 1-10 of 11 columns

- Cambiando los nombres de las variables en adicciones.

Tu...	Magnetita_kg	Indice_magnetita	Anionico_kg	Indice_anionico	Agua...	Indice_agua
<lg>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>
29	NA	7200	NA	65	NA	2470
31	NA	4800	NA	75	NA	2150

2 rows | 1-8 of 11 columns

- Tabla en adicciones.

Tur...	Magnetita_kg	Indice_magnetita	Anionico_kg	Indice_anionico	Agua_...	Indice_agua
<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>
D	7200	NA	65	NA	2470	NA
N	4800	NA	75	NA	2150	NA

2 rows | 1-7 of 10 columns

- Viendo los tipos de datos en las variables.

```
## 'data.frame': 24 obs. of 11 variables:  
## $ Hora : chr "7" "8" "9" "10" ...  
## $ Meta_ton_ali : chr "379" "342" "402" "450" ...  
## $ Ton_ali_vs_meta_ton_ali : chr "0" "0" "0" "-88" ...  
## $ Ton_ali : chr "379" "342" "402" "362" ...  
## $ Acumulado_ton_ali : chr "379" "721" "1123" "1485" ...  
## $ Meta_ton_prod : chr "246.35" "222.3" "261.3" "292.5" ...  
## $ Ton_prod_vs_meta_ton_prod: chr "-11.349999999999994" "-7.3000000000000114" "-8.3000000000000114" "-2  
8.5" ...  
## $ Ton_prod : chr "235" "215" "253" "264" ...  
## $ Acumulado_ton_prod : chr "235" "215" "253" "264" ...  
## $ Rendimiento : chr "0.62005277044854878" "0.62865497076023391" "0.62935323383084574" "0.  
72928176795580113" ...  
## $ Comentarios : chr "Fusible FB01 roto x rocas" "Fusible FB01 roto x rocas" NA "Fusible F  
B01 roto x rocas" ...
```

- Tipo de datos en adicciones.

```
## 'data.frame': 2 obs. of 10 variables:  
## $ Turno : chr "D" "N"  
## $ Magnetita_kg : chr "7200" "4800"  
## $ Indice_magnetita: chr NA NA  
## $ Anionico_kg : chr "65" "75"  
## $ Indice_anionico : chr NA NA  
## $ Agua_m3 : chr "2470" "2150"  
## $ Indice_agua : chr NA NA  
## $ Energia : chr "10149" "9890"  
## $ Cal_kg : chr "100" "0"  
## $ Densidad : chr "1.36" "1.35"
```

- Transformando los tipos de datos a factor y numéricos.

```
## 'data.frame': 24 obs. of 11 variables:  
## $ Hora : chr "7" "8" "9" "10" ...  
## $ Meta_ton_ali : chr "379" "342" "402" "450" ...  
## $ Ton_ali_vs_meta_ton_ali : chr "0" "0" "0" "-88" ...  
## $ Ton_ali : chr "379" "342" "402" "362" ...  
## $ Acumulado_ton_ali : chr "379" "721" "1123" "1485" ...  
## $ Meta_ton_prod : chr "246.35" "222.3" "261.3" "292.5" ...  
## $ Ton_prod_vs_meta_ton_prod: chr "-11.349999999999994" "-7.3000000000000114" "-8.3000000000000114" "-2  
8.5" ...  
## $ Ton_prod : chr "235" "215" "253" "264" ...  
## $ Acumulado_ton_prod : chr "235" "215" "253" "264" ...  
## $ Rendimiento : chr "0.62005277044854878" "0.62865497076023391" "0.62935323383084574" "0.  
72928176795580113" ...  
## $ Comentarios : chr "Fusible FB01 roto x rocas" "Fusible FB01 roto x rocas" NA "Fusible F  
B01 roto x rocas" ...
```

H...	Meta_ton_ali	Ton_ali_vs_meta_ton_ali	Ton_ali	Acumulado_ton_ali	Meta_ton_prod
<chr><chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>
19 1	450	48	498	3100	292.5
20 2	250	197	447	3547	162.5
21 3	450	-182	268	3815	292.5
22 4	450	-142	308	4123	292.5
23 5	450	-155	295	4418	292.5
24 6	450	47	497	4915	292.5

6 rows | 1-7 of 12 columns

- Creando variable diurno y nocturno.

H...	Meta_ton_ali	Ton_ali_vs_meta_ton_ali	Ton_ali	Acumulado_ton_ali	Meta_ton_prod
<chr><chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>
7	379	0	379	379	246.35
8	342	0	342	721	222.3
9	402	0	402	1123	261.3
10	450	-88	362	1485	292.5
11	450	-104	346	1831	292.5
12	450	50	500	2331	292.5
13	450	26	476	2807	292.5
14	300	148	448	3255	195
15	450	-37	413	3668	292.5
16	450	26	476	4144	292.5

1-10 of 24 rows | 1-6 of 12 columns

Previous **1** 2 3 Next

- Uniendo los datos de la tabla 3, “adicciones”.

```
## [1] "2470"
```

```
## [1] 205.8333
```

```
## [1] 600 600 600 600 600 600 600 600 600 600 600 600 600 400 400 400 400 400
## [18] 400 400 400 400 400 400 400
```

H...	Meta_ton_ali	Ton_ali_vs_meta_ton_ali	Ton_ali	Acumulado_ton_ali	Meta_ton_prod
<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>
7	379	0	379	379	246.35
8	342	0	342	721	222.3
9	402	0	402	1123	261.3
10	450	-88	362	1485	292.5
11	450	-104	346	1831	292.5
12	450	50	500	2331	292.5
13	450	26	476	2807	292.5
14	300	148	448	3255	195
15	450	-37	413	3668	292.5
16	450	26	476	4144	292.5

1-10 of 24 rows | 1-6 of 31 columns

Previous **1** 2 3 Next

```
## [1] 1.5831135 1.7543860 1.4925373 1.6574586 1.7341040 1.2000000 1.2605042
## [8] 1.3392857 1.4527845 1.2605042 1.3856813 1.1952191 0.9070295 1.0416667
## [15] 0.8032129 0.9756098 0.8948546 0.9478673 0.8032129 0.8948546 1.4925373
## [22] 1.2987013 1.3559322 0.8048290
```

- **Creando variables fecha, año, mes y día.**

```
##
## Attaching package: 'lubridate'
```

```
## The following objects are masked from 'package:chron':
##
##   days, hours, minutes, seconds, years
```

```
## The following object is masked from 'package:base':
##
##   date
```

H...	Meta_ton_ali	Ton_ali_vs_meta_ton_ali	Ton_ali	Acumulado_ton_ali	Meta_ton_prod
<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>
7	379	0	379	379	246.35
8	342	0	342	721	222.3
9	402	0	402	1123	261.3
10	450	-88	362	1485	292.5
11	450	-104	346	1831	292.5
12	450	50	500	2331	292.5
13	450	26	476	2807	292.5
14	300	148	448	3255	195
15	450	-37	413	3668	292.5
16	450	26	476	4144	292.5

1-10 of 24 rows | 1-6 of 35 columns Previous 1 2 3 Next

- Agregando variables de la tabla complementos.

H...	Meta_ton_ali	Ton_ali_vs_meta_ton_ali	Ton_ali	Acumulado_ton_ali	Meta_ton_prod
<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>	<chr>
19 1	450	48	498	3100	292.5
20 2	250	197	447	3547	162.5
21 3	450	-182	268	3815	292.5
22 4	450	-142	308	4123	292.5
23 5	450	-155	295	4418	292.5
24 6	450	47	497	4915	292.5

6 rows | 1-7 of 51 columns

- Cambiando los tipos de datos.

```

## 'data.frame':  24 obs. of  50 variables:
## $ Hora                : num  7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 ...
## $ Meta_ton_ali        : num  379 342 402 450 450 450 450 300 450 450 ...
## $ Ton_ali_vs_meta_ton_ali : num  0 0 0 -88 -104 50 26 148 -37 26 ...
## $ Ton_ali             : num  379 342 402 362 346 500 476 448 413 476 ...
## $ Acumulado_ton_ali   : num  379 721 1123 1485 1831 ...
## $ Meta_ton_prod       : num  246 222 261 292 292 ...
## $ Ton_prod_vs_meta_ton_prod: num  -11.3 -7.3 -8.3 -28.5 -47.5 ...
## $ Ton_prod           : num  235 215 253 264 245 352 331 316 298 325 ...
## $ Acumulado_ton_prod  : num  235 215 253 264 245 352 331 316 298 325 ...
## $ Rendimiento        : num  0.62 0.629 0.629 0.729 0.708 ...
## $ Comentarios        : chr  "Fusible FB01 roto x rocas" "Fusible FB01 roto x rocas" NA "Fusible F
B01 roto x rocas" ...
## $ Turno               : Factor w/ 2 levels "D","N": 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ...
## $ Magnetita_kg        : num  7200 7200 7200 7200 7200 7200 7200 7200 7200 7200 ...
## $ Magnetita_kg_hr     : num  600 600 600 600 600 600 600 600 600 600 ...
## $ Indice_Magnetita    : num  NA ...
## $ Anionico_kg         : num  65 65 65 65 65 65 65 65 65 65 ...
## $ Anionico_kg_hr      : num  5.42 5.42 5.42 5.42 5.42 ...
## $ Indice_Anionico     : num  NA ...
## $ Agua_m3            : num  2470 2470 2470 2470 2470 2470 2470 2470 2470 2470 ...
## $ Agua_m3_hr         : num  206 206 206 206 206 ...
## $ Indice_Agua        : num  NA ...
## $ Energia            : num  10149 10149 10149 10149 10149 ...
## $ Energia_hr         : num  846 846 846 846 846 ...
## $ Cal_kg             : num  100 100 100 100 100 100 100 100 100 100 ...
## $ Cal_kg_hr          : num  8.33 8.33 8.33 8.33 8.33 ...
## $ Densidad           : num  1.36 1.36 1.36 1.36 1.36 1.36 1.36 1.36 1.36 1.36 ...
## $ Indice_Magnetita_hr : num  1.58 1.75 1.49 1.66 1.73 ...
## $ Indice_Anionico_hr  : num  0.0143 0.0158 0.0135 0.015 0.0157 ...
## $ Indice_Agua_hr     : num  0.543 0.602 0.512 0.569 0.595 ...

## $ Indice_Energia_hr  : num  2.23 2.47 2.1 2.34 2.44 ...
## $ Indice_Cal_hr      : num  0.022 0.0244 0.0207 0.023 0.0241 ...
## $ Fecha              : Date, format: "2017-02-25" "2017-02-25" ...
## $ Año                : int  2017 2017 2017 2017 2017 2017 2017 2017 2017 2017 ...
## $ Mes                : int  2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 ...
## $ Dia                : int  25 25 25 25 25 25 25 25 25 25 ...
## $ Grupo              : Factor w/ 2 levels "PATRIOTAS","TITANES": 2 2 2 2 2 2 2 2 2 ...
## $ Analista           : Factor w/ 2 levels "AORTIZ1","MNARVA2": 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ...
## $ Btu_Ali            : num  8651 8651 8651 8651 8651 ...
## $ Cen_Ali            : num  29.1 29.1 29.1 29.1 29.1 ...
## $ Azu_Ali            : num  0.52 0.52 0.52 0.52 0.52 0.52 0.52 0.52 0.52 0.52 ...
## $ Hmd_Ali           : num  9.74 9.74 9.74 9.74 9.74 9.74 9.74 9.74 9.74 9.74 ...
## $ Btu_Pro            : num  12369 12369 12369 12369 12369 ...
## $ Cen_Pro            : num  3.47 3.47 3.47 3.47 3.47 3.47 3.47 3.47 3.47 3.47 ...
## $ Azu_Pro            : num  0.43 0.43 0.43 0.43 0.43 0.43 0.43 0.43 0.43 0.43 ...
## $ Hmd_Pro           : num  12.2 12.2 12.2 12.2 12.2 ...
## $ Mv_Pro             : num  33.9 33.9 33.9 33.9 33.9 33.9 33.9 33.9 33.9 33.9 ...
## $ Btu_Rec           : num  3898 3898 3898 3898 3898 ...
## $ Cen_Rec           : num  58.2 58.2 58.2 58.2 58.2 ...
## $ Azu_Rec           : num  0.82 0.82 0.82 0.82 0.82 0.82 0.82 0.82 0.82 0.82 ...
## $ Hmd_Rec           : num  8.27 8.27 8.27 8.27 8.27 8.27 8.27 8.27 8.27 8.27 ...
    
```

```

## [1] "Hora" "Meta_ton_ali"
## [3] "Ton_ali_vs_meta_ton_ali" "Ton_ali"
## [5] "Acumulado_ton_ali" "Meta_ton_prod"
## [7] "Ton_prod_vs_meta_ton_prod" "Ton_prod"
## [9] "Acumulado_ton_prod" "Rendimiento"
## [11] "Comentarios" "Turno"
## [13] "Magnetita_kg" "Magnetita_kg_hr"
## [15] "Indice_Magnetita" "Anionico_kg"
## [17] "Anionico_kg_hr" "Indice_Anionico"
## [19] "Agua_m3" "Agua_m3_hr"
## [21] "Indice_Agua" "Energia"
## [23] "Energia_hr" "Cal_kg"
## [25] "Cal_kg_hr" "Densidad"
## [27] "Indice_Magnetita_hr" "Indice_Anionico_hr"
## [29] "Indice_Agua_hr" "Indice_Energia_hr"
## [31] "Indice_Cal_hr" "Fecha"
## [33] "Año" "Mes"
## [35] "Día" "Grupo"
## [37] "Analista" "Btu_Ali"
## [39] "Cen_Ali" "Azu_Ali"
## [41] "Hmd_Ali" "Btu_Pro"
## [43] "Cen_Pro" "Azu_Pro"
## [45] "Hmd_Pro" "Mv_Pro"
## [47] "Btu_Rec" "Cen_Rec"
## [49] "Azu_Rec" "Hmd_Rec"

```

#Cambiando orden de las variables

```

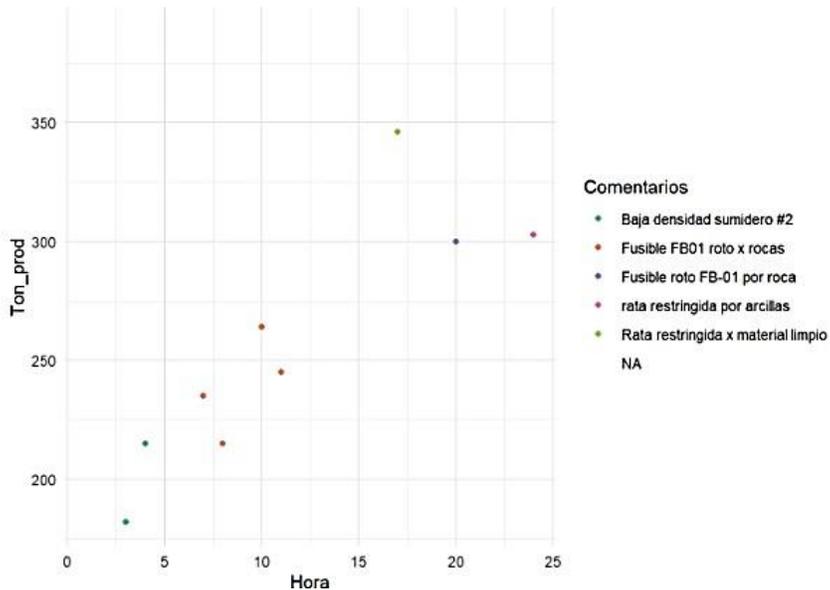
## [1] "Fecha" "Año"
## [3] "Mes" "Día"
## [5] "Hora" "Turno"
## [7] "Ton_ali" "Meta_ton_ali"
## [9] "Ton_ali_vs_meta_ton_ali" "Acumulado_ton_ali"
## [11] "Ton_prod" "Meta_ton_prod"
## [13] "Ton_prod_vs_meta_ton_prod" "Acumulado_ton_prod"
## [15] "Rendimiento" "Magnetita_kg"
## [17] "Magnetita_kg_hr" "Indice_Magnetita"
## [19] "Indice_Magnetita_hr" "Anionico_kg"
## [21] "Anionico_kg_hr" "Indice_Anionico"
## [23] "Indice_Anionico_hr" "Agua_m3"
## [25] "Agua_m3_hr" "Indice_Agua"
## [27] "Indice_Agua_hr" "Cal_kg"
## [29] "Cal_kg_hr" "Indice_Cal_hr"
## [31] "Densidad" "Energia"
## [33] "Energia_hr" "Indice_Energia_hr"
## [35] "Btu_Ali" "Cen_Ali"
## [37] "Azu_Ali" "Hmd_Ali"
## [39] "Btu_Pro" "Cen_Pro"
## [41] "Azu_Pro" "Hmd_Pro"
## [43] "Mv_Pro" "Btu_Rec"
## [45] "Cen_Rec" "Azu_Rec"
## [47] "Hmd_Rec" "Comentarios"

```

Guardando base de datos.

- Graficando.

```
## Warning: Removed 15 rows containing missing values (geom_point).
```



C. Control de densidad. Medio denso y diluido

Control De Densidad

Para mantener un medio sobre denso en el sumidero de medio correcto (SM-02) se necesita que una parte del medio correcto vaya al sumidero de medio diluido (SM-03) a través del derivador de flujo (SX-01), de allí el flujo es bombeado al circuito de recuperación de magnetita y devuelto como concentraciones de magnetita.

Cuando la densidad disminuye aún con el paso de medio denso a través del (SX-01) es necesario agregar magnetita al sumidero de medio correcto (SM-02) para que el valor retorne a la normalidad (2.0 a 2.2). La magnetita en suspensión es agregada desde el sumidero de preparación (SM-11) con la bomba (PP-11).

La densidad de proceso que normalmente funciona entre (1.35 a 1.45). también puede ser variada agregando agua en la tubería de succión de la bomba de medio denso (PP-02).

- ¿Por qué se incrementa el consumo de magnetita?

El consumo de magnetita se incrementa por la pérdida de densidad del medio denso en el sumidero SM-02.

- ¿Porque se pierde la densidad en el sumidero SM-02?

La densidad en el sumidero de medio correcto SM-02, se pierde porque no hay una recuperación apropiada de magnetita en los tamices de carbón lavado y rechazo y en los separadores magnéticos, además por el desbalance hidráulico del sistema del Medio denso y diluto.

Causas de pérdida de magnetita en el tamiz de carbón lavado SC-02 y descargada hacia la banda CV-02.

- Boquillas de flauta de enjuague obstruidas.

SOLUCIÓN: Limpiar o cambiar boquillas.

- Magnetita atrapada en bandejas inferiores

SOLUCIÓN: Lavar bandejas.

- Válvula de control de flujo de la flauta de enjuague abierta parcialmente.

SOLUCIÓN: Abrir válvula completamente.

- Capacidad de alimentación y rendimiento alto (capacidad mayor que 450 TPH y rendimiento mayor que 85).

SOLUCIÓN: Bajar capacidad, informar al Supervisor de calidad del alto rendimiento y la restricción que genera.

- Material de alimentación con sobrecarga de finos

SOLUCIÓN: Bajar capacidad, informar al Supervisor de calidad del alto rendimiento y la restricción que genera

- Centrifuga de gruesos fuera de servicio

SOLUCIÓN: Habilitar centrifuga de gruesos

Causas de pérdida de magnetita en el tamiz de rechazo SC-03 y descargada hacia la banda CV-04.

- Boquillas de flauta de enjuague obstruidas.

SOLUCIÓN: Limpiar o cambiar boquillas.

- Magnetita atrapada en bandejas inferiores.

SOLUCIÓN: Lavar bandejas.

- Válvula de control de flujo de la flauta del enjuague abierta parcialmente.

SOLUCIÓN: Abrir válvula completamente

Causas de pérdida de magnetita en los separadores magnéticos MS-01-02-03 y descargada hacia el sumidero SM-04.

- Separadores magnéticos sin sobreflujo apropiado

SOLUCIÓN: Ajustar platinas hasta alcanzar el sobreflujo adecuado

- Separadores magnéticos contaminados con material mayor de 1.4 (carbón y/o rechazo) SOLUCIÓN: Revisar y cambiar paneles en mal estado en los screens SC02 y SC03

- Separadores magnéticos obstruidos, sucios.

SOLUCIÓN: Lavar frecuentemente los separadores magnéticos.

Causas de pérdidas por desbalance hidráulico en el circuito de medio denso y diluido

- Válvula de control proporcional de reposición de agua en el sumidero SM-02 funcionando incorrectamente.

SOLUCIÓN: Verificar presión de aire, que la válvula no esté pegada y funcionando en posición de automático.

- Flujo de caja BX-04 hacia el derivador SX-01 obstruido.

SOLUCIÓN: Desatascar tubería entre BX-04 y derivador de flujo SX.01.

- Correas de la bomba PP-02 flojas.

SOLUCIÓN: Ajustar correas o cambiar si es necesario

- Impeler de la bomba PP02 desajustado

SOLUCIÓN: Ajustar Impeler

- Impeler de la bomba PP02 desgastado. Esto se observa por la disminución de la corriente de la bomba

SOLUCIÓN: Cambiar bomba en parada programada

- Descalibración platinas en Caja BX04

SOLUCIÓN: Ajustar platinas en caja BX04, garantizando sobre flujo desde el WingTank hacia el sumidero 2

- Sin sobre flujo desde el sumidero SM-01 hacia el sumidero SM-02.

SOLUCIÓN: Verificar y ajustar platinas en caja BX04, inspeccionar platina de orificio en el sumidero SM-01 por desgaste o porque se haya movido de posición.

- Tubería de succión (interna en sumidero 2) de la bomba PP-02 desgastada.

SOLUCIÓN: Esta tubería se debe inspeccionar y reemplazar dependiendo del estado en las paradas semestrales.

D. Enlace de acceso al aplicativo.

https://demo-unal.shinyapps.io/prediccion_planta_lavado/