

VALORIZACIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINAS DE CARBÓN (DAMC):
UN ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA LA
PRODUCCIÓN DE PIGMENTOS INORGÁNICOS

ISABELLA DAZA RUBIO
FRANCISCO QUESADA CALDERÓN

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI

2025

VALORIZACIÓN DE DRENAJES ÁCIDOS DE MINAS DE CARBÓN (DAMC): UN
ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA PARA LA
PRODUCCIÓN DE PIGMENTOS INORGÁNICOS

ISABELLA DAZA RUBIO
FRANCISCO QUESADA CALDERÓN

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

DIRECTOR: Ing. NILSON DE JESUS MARRIAGA CABRALES, Ph.D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI
2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, por ser mi principal fuente de inspiración, apoyo y fortaleza en cada etapa de mi vida.

A mis amigos y seres queridos, quienes me acompañaron y animaron en los momentos de dificultad y celebración.

A Somos Identidad, mi segunda familia.

A mi compañera de trabajo de grado. Gracias por acompañarme en este camino a pesar de las dificultades.

Y a todas las personas que creen en el poder del esfuerzo y la perseverancia para alcanzar los sueños.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo de grado.

En primer lugar, a mi familia por su apoyo incondicional, paciencia y motivación constante durante todo el proceso académico.

A mi director de tesis, por su orientación, enseñanzas y valiosas sugerencias, que fueron fundamentales para el desarrollo de este proyecto.

A los profesores y compañeros de la universidad, quienes con sus conocimientos y amistad contribuyeron a mi formación profesional y personal.

Agradezco también a las entidades y laboratorios que facilitaron los recursos y el espacio necesario para la ejecución de los experimentos.

Finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, aportaron su tiempo y conocimientos para que este trabajo se hiciera realidad.

RESUMEN

El presente trabajo aborda la problemática ambiental de los drenajes ácidos de minas de carbón (DAMC) y plantea su aprovechamiento en la obtención de pigmentos inorgánicos como alternativa sostenible. Por esto, el objetivo general fue determinar la prefactibilidad técnico-económica de producir un pigmento a partir de la neutralización de los DAMC.

La metodología consistió en ensayos de laboratorio con diseño experimental, el dimensionamiento preliminar de equipos mediante heurísticas de ingeniería y la elaboración de un modelo financiero de flujo de caja proyectado.

Los resultados mostraron que fue posible obtener pigmentos a partir de los lodos neutralizados, lo que valida la factibilidad técnica del proceso. Asimismo, se estableció una configuración preliminar de planta que garantiza indicadores económicos favorables, incluyendo un VAN positivo de USD 83.497 y una TIR del 27 %.

En conclusión, la valorización de los lodos de DAMC en forma de pigmentos constituye una solución ambiental viable y una alternativa económicamente atractiva, cumpliendo con el propósito planteado en el objetivo general.

Palabras claves: Dimensionamiento de equipos, diseño experimental, lodos y VAN.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
MARCO TEÓRICO	11
ANTECEDENTES	14
METODOLOGÍA	16
RESULTADOS Y ANÁLISIS	25
CONCLUSIONES	37
REFERENCIAS	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diseño experimental 2^2 de la neutralización del DAMC.	16
Tabla 2. Diseño experimental 2^3 con punto central, puntos estrella y réplica.	18
Tabla 3. Resumen de heurísticas y parámetros.	21
Tabla 4. Características de los equipos.	
28	
Tabla 5. Costos de los equipos	30
Tabla 6. Consideraciones para los costos variables.	32
Tabla 7. Costos fijos anuales	32
Tabla 8. Comportamiento IPC en los últimos 5 años.	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Caracterización del pigmento mediante la realización de una paleta de colores.	19
Figura 2. Superficie de respuesta del diseño experimental 2^3 con punto central y puntos estrella	26
Figura 3. Flujo de caja	34
Figura 4. VAN proyectado ante variaciones en la producción anual	35
Figura 5. Comportamiento del VAN ante variaciones en el precio de venta por unidad.	36
Figura 6. Análisis bidimensional de VAN ante variaciones simultáneas de precio y producción	37

NOMENCLATURA

DAMC: Drenaje Ácido de Minas de Carbón.

DAM: Drenaje Ácido de Minas.

ASR: Análisis de Superficie de Respuesta.

VAN: Valor Actual Neto.

TIR: Tasa Interna de Retorno.

WACC: Weighted Average Cost of Capital (Costo Promedio Ponderado de Capital)

USD: United States Dollar. Dolar estadounidense.

ISO: International Standards Organization (sensibilidad del sensor).

f/4: Números f o apertura del diagrama. Indica la apertura del fondo de la imagen.

f/7: Números f o apertura del diagrama. Indica la apertura del fondo de la imagen.

EXIF: Exchangeable Image File Format. Formato de Metadatos de la fotografía.

INTRODUCCIÓN

Los drenajes ácidos de minas de carbón (DAMC) representan una de las principales fuentes de contaminación hídrica asociadas a la actividad minera, debido a su bajo pH y alto contenido de metales pesados disueltos. Esta problemática ambiental afecta negativamente a los ecosistemas acuáticos y al entorno social y económico de las regiones mineras. En respuesta a esta situación, se han implementado diversas estrategias de tratamiento, entre ellas la neutralización con compuestos alcalinos como el carbonato de calcio (CaCO_3) y el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2). Estas técnicas permiten precipitar los metales en forma de lodos, cuya disposición final aún plantea retos ambientales y logísticos.

Frente a esta situación, han surgido propuestas orientadas al aprovechamiento de estos lodos como materia prima para la elaboración de materiales de valor agregado. Una alternativa prometedora consiste en transformar los lodos generados por la neutralización del DAMC en pigmentos inorgánicos, capaces de ser utilizados en industrias como la de pinturas, polímeros, recubrimientos y resinas. Sin embargo, el potencial de uso de estos subproductos como pigmentos aún no ha sido explorado satisfactoriamente en muchos contextos locales, especialmente en Colombia.

Este trabajo de grado se enmarca en la búsqueda de soluciones sostenibles para el tratamiento del DAMC en la Quebrada El Chocho, ubicada en el corregimiento de Montebello, zona rural de Santiago de Cali, Colombia. En esta zona se construye actualmente una planta piloto para el tratamiento del drenaje ácido.

Estos residuos representan una oportunidad para desarrollar una alternativa de valorización mediante la producción de pigmentos inorgánicos, contribuyendo así a mitigar los impactos ambientales y a generar beneficios económicos adicionales.

Durante el desarrollo del proyecto se diseñó y ejecutó un plan experimental de laboratorio orientado a obtener un pigmento rojizo a partir del DAMC. En una primera etapa, se identificaron y cuantificaron los factores experimentales clave —volumen de Ca(OH)_2 , cantidad de CaCO_3 y agitación— mediante un diseño experimental truncado de dos niveles.

Posteriormente, se aplicó un análisis de superficie de respuesta (ASR) considerando como variables de respuesta el color y la masa del pigmento.

Este trabajo aporta una alternativa técnicamente viable y potencialmente rentable para la valorización de los residuos generados en la neutralización del DAMC. Además, sienta bases para futuros estudios de escala piloto o industrial en Colombia y otros contextos mineros similares.

Complementando los ensayos de laboratorio, se desarrolló un proceso detallado de escalado a nivel industrial y un análisis económico exhaustivo que incluyó el diseño del sistema de producción, la selección de equipos, estimaciones de consumo energético y operatividad, así como el cálculo del flujo de caja y los indicadores financieros. Se proyectó una producción anual de 28500 unidades de pigmento, alcanzando un VAN positivo de \$83497 USD y una TIR del 27%. Estos resultados permiten concluir que no solo es factible técnicamente, sino que dicha solución también puede ser rentable desde una perspectiva financiera si se estructura adecuadamente el sistema de producción.

MARCO TEÓRICO

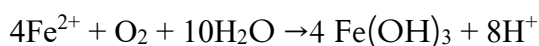
Los drenajes ácidos de minas de carbón (DAMC) son sustancias líquidas derivadas de la oxidación de sulfuros metálicos, principalmente pirita (FeS_2), al contacto con oxígeno y agua, lo que libera metales pesados y ácido sulfúrico, afectando las fuentes hídricas y su biodiversidad. Según Almeida (2023), esta condición da lugar a aguas con un pH extremadamente bajo y altas concentraciones de metales como Fe, Al, Mn, Zn y Cu, lo que representa un riesgo para el medio ambiente.

El DAMC se considera uno de los problemas más complejos de tratar en la minería, debido a su continua generación, incluso después del cierre de las minas. Por lo tanto, se ha pensado en diversos tratamientos, centrándonos en soluciones sostenibles, de bajo costo y con posibilidades de valorización de los residuos generados.

Uno de los métodos empleados para el tratamiento de los DAMC es la neutralización, en la cual se adicionan compuestos alcalinos para elevar el pH de la solución y promover la

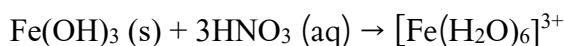
precipitación de los metales en forma de hidróxidos. En este trabajo se utiliza aireación, carbonato de calcio (CaCO_3) e hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) como agentes neutralizantes.

Hariani, Salni y Riyanti (2017) explican que el CaCO_3 actúa inicialmente por su bajo costo y su capacidad para tamponar el pH sin producir un incremento abrupto. Posteriormente, el Ca(OH)_2 , de mayor basicidad, permite un ajuste más fino del pH, facilitando la neutralización de los DAMC. Este doble tratamiento, complementado con aireación forzada, promueve la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} , paso necesario para la formación de Fe(OH)_3 , especie encargada de brindar el color rojizo al pigmento.

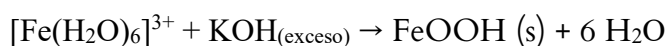


Ecuación 1. Oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} .

Según Almeida (2017), durante la neutralización los metales presentes precipitan como hidróxidos. En particular, el hierro se transforma en Fe(OH)_3 , compuesto fundamental en la elaboración del pigmento. Este precipitado puede contener fases amorfas como la ferrihidrita, que, bajo ciertas condiciones, actúa como precursor de óxidos de hierro más estables y coloridos, como la hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) o la goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$). Para garantizar la formación de ferrihidrita, se recomienda generar un hexa-aqua-complejo de hierro en medio ácido mediante la adición de HNO_3 ; posteriormente, en presencia de un exceso de KOH , se obtiene la ferrihidrita.



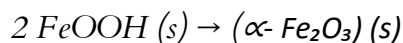
Ecuación 2. Formación del hexa-aqua-complejo.



Ecuación 3. Formación de Ferrhidrita.

Almeida (2023) señala que la ferrihidrita es una fase metaestable que puede transformarse térmicamente en óxidos de hierro con propiedades pigmentarias deseables. La calcinación a

temperaturas controladas, como 350 °C, elimina el exceso de agua, estabiliza la estructura del material y permite obtener un pigmento con coloración rojiza, asociado principalmente a la hematita. Esta transformación depende de factores como el pH, el tiempo de calentamiento y el uso de bases fuertes como el hidróxido de potasio (KOH).



Ecuación 4. Calcinación que transforma la ferrhidrita en hematita

Para evaluar la calidad del pigmento obtenido se consideraron dos variables fundamentales; la cantidad de producto obtenido medido por su peso y el color.

El color fue evaluado mediante fotografía profesional y comparación con una paleta cromática estándar. Aunque se planteó inicialmente el uso de espectroscopía UV/Vis, se descartó por no proporcionar información confiable sobre la percepción visual del color.

De acuerdo con el portal Juanra.art (2021), este método se llama extracción de paleta cromática o paleta de colores y consiste en identificar y seleccionar los colores predominantes o característicos de una fotografía para crear una gama o conjunto de colores representativos de esa imagen. La paleta de colores permite comprender la armonía y el impacto visual de una imagen y constituye una forma efectiva de analizar o replicar el estilo cromático de una fotografía en otros proyectos visuales.

En estudios de prefactibilidad técnica y económica, es necesario utilizar ciertos indicadores financieros que permiten evaluar si un proyecto es viable desde el punto de vista de rentabilidad. Estos indicadores ofrecen una visión preliminar pero crítica para la toma de decisiones sobre escalamiento o inversión industrial. Entre los más empleados se encuentran:

Valor actual neto:

Representa la diferencia entre el valor presente de los ingresos y el valor presente de los egresos del proyecto, descontados a una tasa determinada. Un VAN positivo sugiere que el proyecto genera valor económico y es potencialmente rentable.

Tasa interna de retorno (TIR):

Es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Cuanto mayor sea la TIR respecto a la tasa mínima esperada (WACC o costo de oportunidad), más atractivo resulta el proyecto.

Periodo de recuperación (payback):

Indica el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a partir de los flujos netos de caja. Aunque no refleja rentabilidad total, sí brinda información útil sobre el riesgo y el retorno temprano del proyecto.

Para este tipo de estudios, es común asumir supuestos simplificados como ingresos constantes, costos fijos proyectados, vida útil estimada de los equipos (entre 5 y 10 años), y tasas de descuento promedio de entre el 12 % y 20 % anual, dependiendo del riesgo país y el tipo de industria. Aunque estos valores pueden variar, sirven como punto de partida razonable para el análisis preliminar.

ANTECEDENTES

Diversos estudios a nivel internacional han explorado la recuperación de metales presentes en los drenajes ácidos de minas de carbón (DAMC) para la obtención de pigmentos inorgánicos, particularmente óxidos de hierro de tonalidad rojiza, amarilla o marrón. Estas investigaciones coinciden en resaltar que, además de tratar un residuo ambientalmente problemático, se puede generar un producto con valor agregado para la industria de pinturas, recubrimientos, polímeros y materiales de construcción.

En el estudio de De Almeida Silva et al. (2017), se logró recuperar hierro mediante precipitación selectiva desde un DAMC con una concentración inicial de 3200 mg Fe/L, obteniendo goethita como producto intermedio. Posteriormente, este material fue calcinado, generando un pigmento que rindió 5.9 g/L de drenaje ácido. Este pigmento fue aplicado con éxito sobre una pasta blanca de cemento en una proporción del 10 %, cambiando su tonalidad a un amarillo ocre.

En Estados Unidos, Guy Riefler, John Sabraw y un grupo de investigadores de la Universidad de Ohio desarrollaron un sistema para tratar el drenaje ácido de una mina

abandonada mediante neutralización con reactivos alcalinos de bajo costo y presencia de oxígeno. El precipitado férrico obtenido fue transformado térmicamente en pigmentos artísticos y comerciales, que se emplearon como base para pinturas con aplicación real en galerías. De acuerdo con Rural Action (2020), este proyecto sirvió de base para la creación de la empresa True Pigments, la cual implementó una planta piloto capaz de procesar más de 1000 toneladas anuales de pigmento, cubriendo los costos del tratamiento del agua mediante la comercialización del subproducto.

En otro estudio reciente, Lermen et al. (2023) utilizaron técnicas hidrometalúrgicas para precipitar el hierro contenido en el DAMC, logrando una recuperación cercana al 80 % del metal inicial. El pigmento obtenido mostró características óptimas para aplicaciones industriales, y la metodología empleada permitió una caracterización detallada de las fases minerales involucradas, destacándose la hematita como principal responsable de la coloración deseada.

A escala más técnica, otros autores han descrito la formación espontánea de “yellow boy”, un residuo compuesto de hidróxidos de hierro que precipita al aire libre cuando se oxida el Fe^{2+} a Fe^{3+} en condiciones básicas. Estos residuos, generalmente considerados contaminantes secundarios, han sido estudiados como materia prima para pigmentos, aprovechando su alto contenido férrico (EPA, 2016). En algunos enfoques innovadores, también se ha planteado el uso de bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans* para acelerar la oxidación férrica y facilitar la precipitación en etapas posteriores.

Si bien estas investigaciones han demostrado viabilidad técnica, en muchos casos los estudios han sido desarrollados en contextos extranjeros (Estados Unidos, Brasil o Europa), bajo condiciones logísticas, regulatorias y de mercado distintas a las de países como Colombia. Además, no todos los estudios incluyen evaluaciones económicas rigurosas, especialmente en etapas de prefactibilidad.

En ese sentido, este proyecto representa un aporte diferencial al abordar no solo la síntesis de pigmento a partir del DAMC en condiciones locales (Corregimiento de Montebello, Cali, Valle del Cauca), sino también el escalado técnico del proceso y su correspondiente evaluación económica, integrando variables como eficiencia energética, disponibilidad de reactivos, capacidad de producción, costos de operación y posibles retornos sobre la inversión.

METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el proyecto, se inició con la identificación y cuantificación de los factores experimentales clave y sus niveles para diseñar la matriz de prueba en el laboratorio. Por lo tanto, se elaboró un diseño experimental con dos niveles (alto y bajo) y dos factores: volumen de solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, cantidad de CaCO_3 . Adicionalmente, se utilizó el parámetro de operación de agitación. Este diseño incluyó un total de cuatro experimentos. En la realización de cada uno de los experimentos, se utilizó 1.6 L de DAMC recolectado de la Quebrada El Chocho y se utilizó aireación constante con ayuda de dos motores de acuario marca SOBO SB 538A en donde se bombeó 7 L/Min de aire. En la tabla 1 se muestran las distintas combinaciones en cada uno de los experimentos ejecutados. Con estas pruebas, se estableció un parámetro de operación para la neutralización de 1.6 L de drenaje ácido de mina de carbón (DAMC), el cual, consistió en la adición de 4000 mg/L de CaCO_3 grado reactivo, seguido de una hora de agitación a 1000 rpm con un agitador mecánico Velp Stirrer Type BS, y posteriormente la adición de 60 mL de una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ grado reactivo a 10500 mg/L en incrementos de 10 mL con aireación constante a 7 L/Min.

Tabla 1. Diseño experimental 2² de la neutralización del DAMC.

Experimento	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (ppm)	CaCO_3 (mg)	Agitación (rpm)	pH final	Color del precipitado
1	8000	2000	0	4.66	Verde Oscuro
2	4000	2000	1000	5.33	Rojo-Marrón
3	8000	4000	1000	6.03	Rojo-Marrón
4	4000	4000	0	5.83	Verde Oscuro

Para determinar las mejores condiciones de producción de pigmentos, se implementó un diseño experimental 2³ con punto central, puntos estrella y 1 réplica en donde se ejecutó un total de 11 experimentos, cada uno con su réplica, en donde se realizó la variación de la

masa de KOH con una pureza de 90% en 340 mL de agua, la temperatura de calcinación y el tiempo de calcinación. La concentración de HNO_3 se fijó en 0.1 M.

Para la elaboración del producto final a escala de laboratorio, este procedimiento se basó en el experimento que se obtuviera la mayor masa, un mejor color, a menor temperatura, en menor tiempo y en las propuestas de De Almeida Silva y De Oliveira (2023) y consistió en adicionar 6 g de precipitado, producto de la neutralización de DAMC, en un beaker. Al precipitado se le agregó 850 mL de HNO_3 0.1 M y 340 mL de solución de KOH con 10.6 g de reactivo con una pureza de 90%, es decir, con una concentración de 0.5 M de KOH. Tras una hora, tiempo en el que ocurre la formación y sedimentación del precipitado, este fue decantado y sometido a calentamiento a 350 °C durante dos horas, obteniéndose el pigmento deseado. Para evaluar el color se optó por realizar una identificación de la gama de colores mediante el uso de una paleta cromática y un estudio profesional de fotografía, con las siguientes características: Cámara: Sony A7III; lente: 28-70 mm f/4; distancia: 40 cm; plano cenital; luz Godox AD400 Pro con ventana Godox UB-165W; flash a 1/16 + 0.7; temperatura de color: 5600 K (intervalo: 2000–7000 K). EXIF: 1/200 s, f/7.1, ISO 400. Fotos tomadas bajo ambiente controlado sin emisión de luces externas.

Tabla 2. Diseño experimental 2³ con punto central, puntos estrella y 1 réplica.

Experimento	KOH (g)	Temperatura (°C)	Tiempo (Horas)	Masa obtenida (mg)
1	6.36	300	1	480.6±77.3
2	10.6	300	1	1185.6±4.4
3	6.36	400	1	609.5±0.4
4	10.6	400	1	717.8±1.8
5	6.36	300	3	358.9±30.4
6	10.6	300	3	946.6±3.7
7	6.36	400	3	292.4±15.4
8	10.6	400	3	651.1±5.9
9 (Punto central)	8.48	350	2	223.7±61.3
10 (Punto estrella)	4.24	250	0.5	109.1±42.4
11 (Punto estrella)	12.7	450	4	689.3±15.6



Figura 1. Caracterización del pigmento mediante la realización de una paleta de colores.

Escalado técnico y económico

El proceso de escalado técnico y económico se desarrolló con el objetivo de trasladar los resultados experimentales de laboratorio a una operación viable en condiciones reales. Este se fundamentó en la integración de criterios de ingeniería, el análisis iterativo mediante tanteo y el uso de herramientas computacionales como Microsoft Excel y Aspen para el cálculo y simulación de escenarios.

El dimensionamiento de los equipos principales, como los reactores batch y el horno de calcinación, se realizó mediante un proceso de tanteo. Este proceso consistió en evaluar diferentes combinaciones de volúmenes de reactores y número de ciclos diarios, ajustando los parámetros en cada iteración. En cada caso, se simuló el flujo de caja asociado a la configuración propuesta, calculando los ingresos, los costos y los principales indicadores financieros, como el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR).

Mediante este proceso iterativo, se logró determinar una configuración final que equilibró la capacidad operativa, la eficiencia en el uso de los recursos y la viabilidad económica del proyecto.

Etapla 1: Definición del proceso productivo

Se inició con la especificación del proceso químico requerido para la producción del pigmento, el cual comprende una etapa de reacción, seguida de tratamiento físico (decantación) y posterior calcinación a alta temperatura.

Esta caracterización técnica definió el marco operativo para el posterior escalado.

Etapla 2: Proceso de tanteo para el dimensionamiento de equipos

El dimensionamiento de los equipos se realizó mediante un proceso de tanteo iterativo. Se comenzó con volúmenes iniciales de reactores de 1.1 m³, incrementando su capacidad y ajustando el número de ciclos diarios por reactor. El objetivo fue encontrar una configuración que:

- Permitiera un número factible de batches por jornada laboral.
- Estuviera dentro de las capacidades técnicas de operación y mantenimiento.
- Se integrará eficientemente con el resto del proceso (calcinación, secado, etc.).

El tanteo se realizó evaluando diferentes combinaciones de:

- Capacidad de los reactores (m³).
- Número de reactores operativos.
- Número de ciclos por reactor/día.
- Capacidad del horno (kg por ciclo).

- Días operativos por año.

Durante el dimensionamiento técnico del sistema, se aplicó una serie de heurísticas de ingeniería y criterios empíricos, con el fin de guiar las decisiones de escalado de forma sistemática y segura:

Tabla 3. Resumen de heurísticas y parámetros

Área / Etapa	Heurística / Parámetro aplicado	Valor adoptado / Intervalo	Referencia técnica / Justificación
Tanques batch / reactores	Diseño debe permitir carga, mezcla, decantación y descarga secuencial		Práctica de Ingeniería
Tanques batch / reactores	Uso de chaquetas o serpentines si el volumen $< 1 \text{ m}^3$	No aplica (volumen $> 1 \text{ m}^3$)	Doc. 105 – Heurísticas Reactores Químicos
Tanques batch / reactores	Evitar agitación excesiva que interfiera con la decantación	Agitación apagable	Doc. 105 – Heurísticas Reactores Químicos
Tanques batch / reactores	Tiempo de retención para decantación	1–2 horas	Doc. 114 – Heurísticas Tanques y Recipientes
Tanques batch / reactores	Relación altura/diámetro (H/D) recomendada	1.2	Turton et al., 5th Ed., Cap. 6 y 11
Tanques batch / reactores	Volumen libre de seguridad (headspace)	$\geq 10\%$ del volumen total	Doc. 114 – Heurísticas Tanques y Recipientes

Tanques batch / reactores	Fondo cónico o semiesférico, altura 15–25% del diámetro	Fondo cónico, 23% de D	Ludwig's Applied Process Design
Tanques batch / reactores	Relación D/T para agitación (impulsor/tanque)	0.33	Perry's Handbook, 8th Ed.; Harnby et al., 1997
Tanques batch / reactores	Ubicación del impulsor: 1/3 desde el fondo	0.40 m desde base	Doc. 105 – Heurísticas Reactores Químicos
Tanques batch / reactores	Número de baffles: 4, ancho 1/12 del diámetro	4 baffles, 0.10 m	Perry's Handbook, Marriaga – Doc. 114
Agitación	Potencia para líquidos tipo agua: 0.5–1 HP/m ³	0.99 HP (mezcla ligera)	Perry's, Turton et al.
Agitación	Potencia para lodos viscosos: 1.5–3 HP/m ³	-	Doc. 105 – Heurísticas Reactores Químicos
Agitación	Número de potencia adimensional (Np) para turbina Rushton	5.5	Perry & Green, 2008; Harnby et al., 1997
Bombas y transporte de lodo	Bombas tipo desplazamiento positivo o neumática tipo diafragma	Neumática de diafragma	Perry's, Coulson & Richardson, SEEPEX, Marriaga (2020)
Bombas y transporte de lodo	Velocidad recomendada de flujo en tuberías	1–2 m/s	Ludwig's Applied Process Design

Bombas y transporte de lodo	Eficiencia global de bombeo (hidráulica × motor)	50–60%	Perry's, NEMA, EERE
Hornos y combustión	Tipo de horno: rotatorio para polvos finos (continuo) o bandejas (batch/piloto)	Horno estático tipo bandejas	Perry's, Turton et al., experiencia piloto
Hornos y combustión	Temperatura máxima de operación para pigmentación	350 °C	Datos técnicos proceso DAMC
Hornos y combustión	Tiempo de residencia en horno rotatorio o bandejas	1 hora	Perry's, analogía hornos industriales
Hornos y combustión	Fracción de llenado recomendada	15% del volumen útil	Perry's, experiencia piloto
Hornos y combustión	Eficiencia térmica estimada	65%	Hoja técnica fabricante
Hornos y combustión	Pendiente interna del horno rotatorio (si aplica)	2–5%	Analogía hornos cementeros

En cada iteración se calculó la producción diaria y anual, sirviendo de base para el análisis económico posterior.

Etapas 3: Modelado del flujo de caja proyectado

Una vez definidos los escenarios técnicos viables, se elaboró un modelo financiero de flujo de caja a 10 años. Este modelo consideró:

- Inversión inicial total estimada: Corresponde al desembolso en tiempo cero, necesario para poner en marcha el proyecto.
- Vida útil del proyecto: Define el horizonte de evaluación y un periodo de depreciación.
- Precio de venta por unidad del producto: Se estimó en comparaciones con el mercado actual, teniendo en cuenta el mercado objetivo y el tipo de distribución.
- Costos variables y fijos anuales: Los costos variables cambian directamente con el nivel de producción, como materias primas, energía o insumos, y se expresan por unidad producida. Su valor total aumenta o disminuye según la cantidad de unidades fabricadas
Los costos fijos, en cambio, permanecen constantes dentro de la operación, independiente del volumen producido. Incluyen gastos como salarios administrativos, seguros, alquileres o mantenimiento básico.
- Depreciación: Es el proceso contable y financiero mediante el cual se distribuye el costo de los activos fijos a lo largo de su vida útil. De esta forma, cada año del horizonte del proyecto se reconoce una porción del valor de los equipos como un gasto, reflejando el desgaste o consumo de dichos activos en la operación.
- Tasa de descuento: Se adoptó una tasa del 15 % anual, seleccionada como referencia para proyectos industriales en contextos de riesgo medio-alto. Este valor combina la tasa libre de riesgo internacional y la prima de riesgo país.
- WACC: Se consideró un escenario hipotético con una estructura de financiamiento compuesta por 50 % de capital propio y 50 % de deuda bancaria. Con estos supuestos, y aplicando una tasa de impuesto a la renta del 35 %, el costo promedio ponderado de capital (WACC) alcanzó 17.25 %.

Cada una de las consideraciones permitió simular distintos escenarios productivos y su comportamiento económico en el tiempo.

Etapla 4: Análisis de sensibilidad

Con el fin de evaluar los resultados financieros y determinar los factores más críticos en la viabilidad del proyecto, se realizó un análisis de sensibilidad en dos niveles: unidimensional y bidimensional.

En el análisis unidimensional se modificó una variable a la vez, manteniendo constantes las demás, con el propósito de identificar su impacto directo sobre el valor actual neto. Se estudiaron variaciones en la producción anual y en el precio de venta por unidad, lo que permitió estimar la magnitud de los cambios en la rentabilidad del proyecto frente a posibles desviaciones en cada uno de estos factores.

En el análisis bidimensional se consideró la variación simultánea de dos variables críticas (producción anual y precio de venta), construyendo una matriz que reflejó la variación sobre los resultados. Esta herramienta permitió identificar los intervalos que garantizan un VAN positivo y negativo.

La aplicación de estos análisis permitió conocer los intervalos críticos de operación, estableciendo de manera explícita los umbrales mínimos de producción y los precios de venta requeridos para asegurar la sostenibilidad económica del proyecto.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la ejecución del diseño experimental (tabla 1), se consideraron como variables de respuesta el pH y el color del precipitado. Los resultados evidenciaron que, en ausencia de agitación, se generó un precipitado de color verde oscuro. Este comportamiento podría explicarse por una oxidación incompleta de Fe^{2+} a Fe^{3+} , lo que favorece la formación de oxihidróxido ferroso, en algunos casos llamado green rust, caracterizado por tonalidades verdosas, tal como lo describe Shaw (2011).

En los ensayos realizados con agitación, se obtuvo un precipitado de color marrón-rojizo, compuesto principalmente por oxihidróxido férrico, producto de la oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} y su posterior precipitación. La agitación constante favorece una oxidación más completa

del Fe^{2+} , debido al aumento de oxígeno en la solución, facilitando la formación de este oxihidróxido.

Doksa (2015) y Hariani, Salni & Riyanti (2017), obtuvieron precipitados de oxihidróxido de hierro con tonalidades que varían de rojizo a marrón mediante la combinación de hidróxido de calcio, carbonato de calcio, aireación y agitación constante. Esta coloración coincide con los resultados observados en el presente estudio.

Ejecución de un diseño experimental 2^3 con punto central, puntos estrella y 1 réplica.

En la figura 2 se presenta el diagrama de superficie de respuesta, construido a partir de los datos obtenidos de la ejecución del diseño experimental, con el fin de identificar las mejores condiciones para la producción del pigmento.

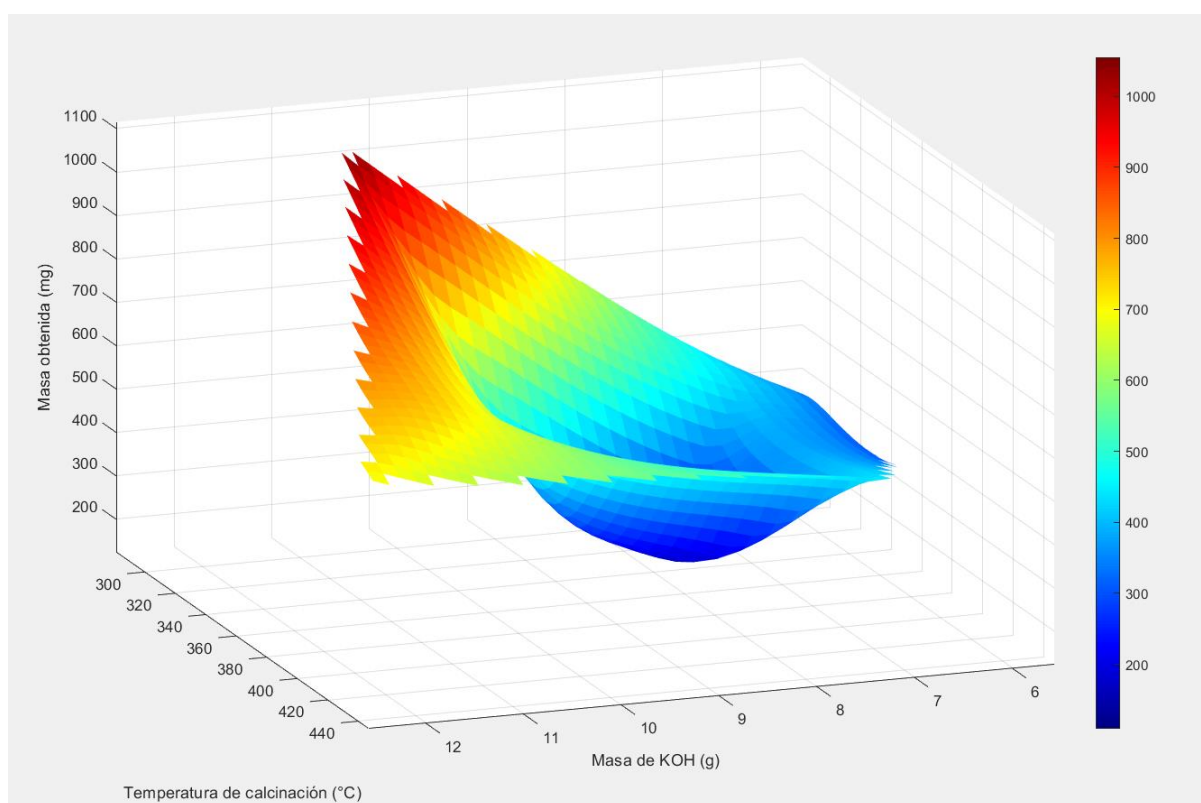


Figura 2. Superficie de respuesta de los resultados obtenidos al ejecutar el diseño experimental 2^3 con punto central y puntos estrellas.

Los resultados obtenidos muestran que el incremento en la masa de KOH utilizada durante la elaboración del pigmento se tradujo en una mayor masa del producto final. Este comportamiento puede explicarse considerando que un medio con mayor basicidad contribuye a la formación de los compuestos intermedios necesarios para la generación del

pigmento, ya que una mayor disponibilidad de iones OH^- favorece la precipitación de oxihidróxidos.

De acuerdo con De Almeida Silva et al. (2019), la formación del pigmento se ve favorecida en entornos alcalinos, lo que coincide con la tendencia observada en este estudio. De esta manera, las condiciones con mayor cantidad de KOH generan un entorno más propicio para la formación del pigmento, aumentando así el rendimiento másico.

Asimismo, la calcinación del precipitado obtenido a temperaturas entre 300 °C y 450 °C permitió evaluar la influencia del tratamiento térmico en la obtención del pigmento. Como señala De Almeida Silva et al. (2019), la calcinación a 350 °C durante dos horas favorece la formación del pigmento. Los resultados de este trabajo de grado confirman que, dentro del intervalo de temperaturas evaluado, el tratamiento térmico cumple un papel fundamental en el desarrollo del pigmento, consolidando su estructura y color característico.

Capacidad de producción

Para efectos de escalar una planta de producción se estimó una capacidad productiva de 28.500 kilogramos anuales de pigmento a base de DAMC para la planta propuesta. Este valor corresponde al resultado de operar dos reactores discontinuos de 2.2 m³ cada uno, realizando cinco ciclos por jornada laboral de 8 horas, durante 50 semanas operativas al año. Con una producción promedio de 11.4 kilogramos por ciclo, esta configuración permite alcanzar el volumen anual proyectado.

La elección de esta escala de producción se fundamentó en un equilibrio entre tres aspectos clave:

- Capacidad técnica validada en pruebas piloto.
- Optimización operativa del recurso humano, ya que todo el sistema puede ser gestionado por una sola persona, lo que reduce costos laborales y simplifica la logística.
- Demanda proyectada, cuya estrategia comercial contempla una introducción gradual al mercado que tiene una demanda mayor.

Ahora bien, esta escala garantiza:

- La maximización del uso del recurso humano, evitando la contratación de personal adicional.
- El cumplimiento del punto de equilibrio económico, sin recurrir a automatización ni infraestructura compleja.
- Una estructura operativa sencilla.

Discusión técnica sobre los equipos seleccionados

Los equipos principales del sistema fueron seleccionados con criterios de funcionalidad, simplicidad operativa y eficiencia energética:

- **Reactores discontinuos de 2.2 m³:** permiten manejar cargas compatibles con los tiempos de operación definidos y el número de ciclos por jornada. Su diseño se basó en heurísticas de proporciones geométricas (altura/diámetro, espacio libre, fondo cónico) y criterios de seguridad operativa.
- **Horno rotatorio para calcinación:** se seleccionó este tipo de horno por su capacidad para manejar polvos finos de forma continua, reduciendo pérdidas de material por arrastre o acumulación. El horno puede alcanzar y mantener temperaturas de 350 °C, necesarias para la pigmentación. A diferencia de los hornos estáticos, el modelo rotatorio mejora la transferencia térmica, homogeniza el producto calcinado y permite una operación más estable. Su elección, aunque representa una mayor inversión y requerimientos de instalación, está plenamente justificada por su eficiencia térmica, capacidad operativa y menor tasa de desperdicio.
- **Equipos auxiliares:** como bombas neumáticas, sopladores, tanques de neutralización y almacenamiento, fueron seleccionados por su confiabilidad, bajo mantenimiento y compatibilidad con operación manual.
- **Suministro eléctrico trifásico a 220V:** todos los equipos fueron cotizados para operar en esta configuración, optimizando la eficiencia energética, reduciendo el consumo eléctrico por fase, y permitiendo el uso de calibres de cable más delgados.

Tabla 4. Características de los equipos

Equipo	Cantidad	Diámetro (m)	Altura / Longitud (m)	Potencia requerida (kW)
Batch	2	1.38	2.49	4
Horno	1	0.5	2.23	0.071
Soplador	2	-	-	0.37
Tanque de Almacenamiento	1	0.49	0.6	-

Justificación del montaje y área requerida

Se seleccionó un montaje en patín (skid) para la integración de los equipos principales del proceso productivo, teniendo en cuenta las características físicas del sistema y la escala de producción. Este tipo de montaje se utiliza en plantas piloto e instalaciones industriales compactas, consiste en ensamblar todos los equipos y componentes funcionales sobre una estructura metálica unificada, lista para su conexión con servicios externos. Esta elección no solo se fundamenta en criterios de espacio, sino también en ventajas técnicas y logísticas como:

A. Compatibilidad con el tamaño de los equipos

Los equipos que componen la planta (reactores batch de 2.2 m³, un horno rotatorio, un tanque neutralizador y sopladores) poseen dimensiones reducidas y peso mínimo, lo que permite su instalación conjunta sobre una base metálica sin necesitar instalaciones individuales. La mayor altura corresponde a los reactores (2.49 m), mientras que la longitud máxima del conjunto no supera los 8 metros lineales.

B. Simplicidad en montaje, operación y mantenimiento

El diseño en skid permite ensamblar todos los equipos en taller, realizar pruebas funcionales antes del traslado al sitio definitivo, y reducir de forma significativa los tiempos de instalación en campo. Además, al concentrar todo el proceso en un solo módulo, se facilita el mantenimiento.

C. Flexibilidad y posibilidad de relocalización

Dado que el sistema de producción está contenido en una estructura única y transportable, su ubicación puede modificarse en caso de cambios operativos, crecimiento de demanda o necesidad de reubicar la planta.

Área total requerida

Teniendo en cuenta el montaje en skid que concentra todos los equipos principales sobre una estructura metálica unificada de 20 m², se consideraron áreas externas para:

- Almacenamiento de reactivos y producto final, con una superficie estimada de 14–16 m².
- Circulación operativa y seguridad perimetral, con un margen de 1 metro alrededor del skid y áreas de paso, con una superficie estimada de 10–12 m².
- Módulo de servicios básicos, incluyendo sanitario y lavamanos para un operario, con una superficie estimada de 8–10 m².
- Zona libre, con una superficie estimada de 10–12 m².

La planta no contempla almacenamiento de principal materia prima, ya que esta se extrae directamente de la fuente en cada jornada de trabajo, eliminando la necesidad de bodegas o silos de insumos. Como resultado, el área total requerida para la instalación se redujo a 70 m², garantizando condiciones adecuadas de accesibilidad.

Análisis económico

El análisis económico del proyecto se desarrolló con base en los siguientes puntos:

1. Parámetros técnicos utilizados

Los parámetros técnicos considerados fueron resultado del escalado de producción y diseño del esquema operativo:

- Inversión inicial estimada: USD \$210795.

Tabla 5. Costos de los equipos

Equipo	Cantidad	Diámetro (m)	Altura / Longitud (m)	Potencia requerida (kW)	Material	Costo por unidad (USD)
Batch	2	1.38	2.49	4	Acero Inoxidable 304	42960
Horno	1	0.5	2.23	0.71	Acero al carbono	27120
Bomba	2	-	-	0.37	-	6000
Soplador	1	-	-	0.37	Acero Inoxidable 304	1200
Tanque Neutralizador	1	0.49	0.6	-	Acero Inoxidable	3480

El costo total del skid se estimó considerando un 30% adicional al costo de los equipos instalados. También se consideró un 30% sobre el costo instalado del skid para gastos de personal durante el montaje y puesta a punto, mano de obra externa e imprevistos.

- Producción anual: 28500 kg por año, obtenida de 10 lotes diarios (5 por reactor) durante 50 semanas de operación continua.
- Proyección: 10 años de operación productiva y un año para el diseño, construcción, montaje y puesta en marcha
- Costos variables por unidad: USD \$1, que incluye reactivos y empaques. Se consideró un aumento del 10 % anual por inflación y fluctuaciones del mercado.

Tabla 6. Consideraciones para los costos variables.

Razón	Costo (USD)
Ácido Nítrico	470/tonelada
NaOH	800/tonelada
Empaques	0.5/unidad

El incremento del 10 % anual en costos variables se fundamenta en una combinación de factores económicos como:

Inflación internacional y por sector: En la industria química, los insumos tienden a fluctuar con la inflación global de materias primas, que ha oscilado entre el 7 % y el 12 % anual en la última década.

Devaluación y riesgos cambiarios: Al tratarse de compras en USD, cualquier depreciación de moneda local puede impactar directamente en los precios.

- Costos fijos anuales (Año 1): USD \$36989, incluyendo arriendo, servicios domésticos, nómina operativa y mantenimiento (tabla 7). También se incrementan al 10 % anual.

Tabla 7. Costos fijos anuales

Razón	Costo (USD)
Salario Operador	5600
Energía base mínima	5800
Mantenimiento	6490
Depreciación	14740
Arriendo	4400

- Depreciación: USD \$12972 por año, correspondiente al 100 % de la inversión de los equipos instalados depreciada linealmente a 10 años.

- Impuestos: Se aplica un impuesto del 35 % sobre la utilidad antes de impuestos.

2. Variables de mercado consideradas

El modelo integra estimaciones realistas basadas en el comportamiento de mercado para pigmentos técnicos:

- Precio de venta por unidad: USD \$7.20 kg en el primer año operativo completo.
- Crecimiento anual del precio de venta: 7 %, que contempla el comportamiento del IPC en los últimos cinco años y los promedia, se contempla en la tabla 8.

Tabla 8. Comportamiento IPC en los últimos 5 años.

Año	IPC (%)
2020	1.61
2021	5.62
2022	13.12
2023	9.28
2024	5.20

- Demanda proyectada: Se estimó la venta completa de la producción anual, sin inventarios acumulados.

3. Criterios de evaluación financiera

El proyecto se evaluó con un enfoque de flujo de caja descontado (FCD), aplicando las siguientes herramientas:

- Valor actual neto (VAN): USD \$83497, lo cual indica una generación positiva de valor.
- Tasa interna de retorno (TIR): 27 %
- Tasa de descuento (Ke): 15 %
- Valor de salvamento: cero

- Flujo neto de caja.

Escenario alternativo (financiamiento mixto 50/50)

- Costo promedio ponderado de capital (WACC): 17.25 %,

4. Proyección: 11 años

Se hizo una proyección de 11 años, estimada en:

- Año 1 (dividido en dos semestres):
 - Primer semestre: Construcción, instalación y montaje completo de la planta.
 - Segundo semestre: Montaje y puesta a punto, con validación técnica, ajustes de operación y adaptaciones (de ser necesarias). No se contemplan ingresos por venta en este periodo, ya que el producto no es comercializado aún.
- Años 2 al 11: Operación a régimen estable, incluyendo todas las entradas y salidas de efectivo, con sus respectivas actualizaciones anuales de costos, precios y depreciación.

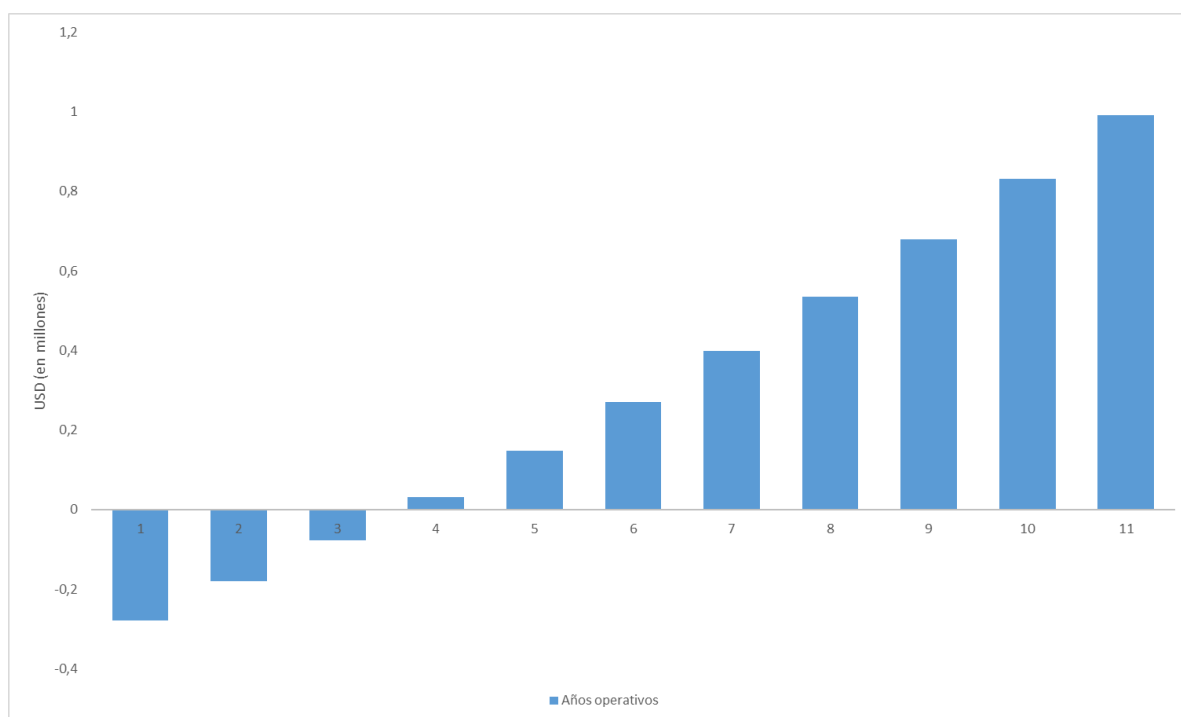


Figura 3. Flujo de caja

Análisis de sensibilidad

Se desarrollaron análisis de sensibilidad para establecer la viabilidad económica del proyecto ante cambios en variables críticas: producción anual y precio unitario de venta.

a) Análisis unidimensional (producción vs. VAN)

El análisis de sensibilidad unidimensional permite identificar cómo varía el valor actual neto (VAN) del proyecto frente a distintos niveles de producción anual. A partir de esto, se concluye que:

- El punto de equilibrio financiero se encuentra por encima de las 24000 unidades/año, ya que es el primer valor con VAN positivo.
- Producciones por debajo de este umbral (por ejemplo, 18000 unidades o menos) generan VAN negativo, lo que indica inviabilidad financiera bajo los supuestos actuales del modelo.

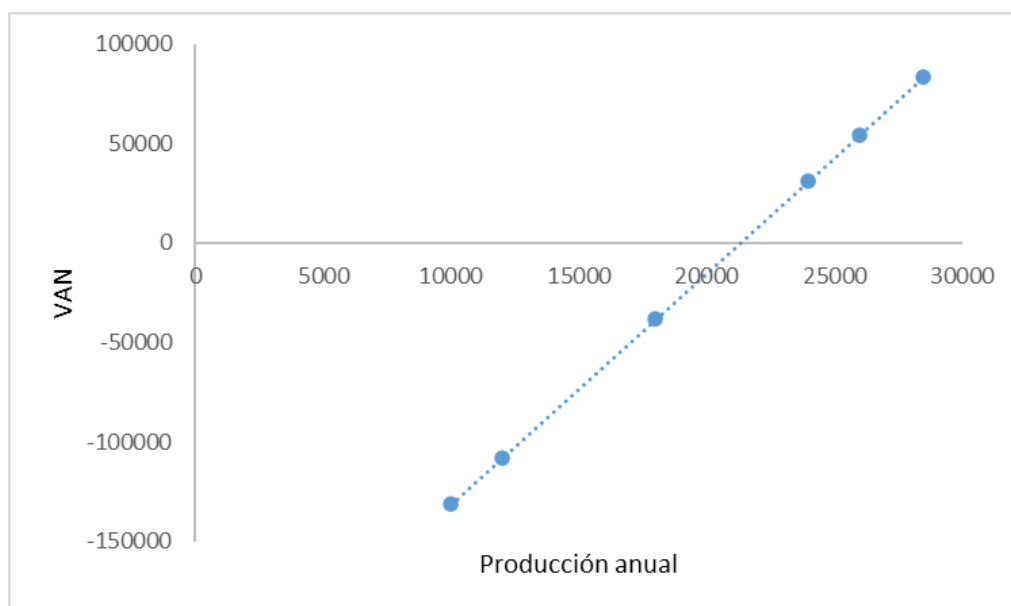


Figura 4. VAN proyectado ante variaciones en la producción anual.

b) Análisis unidimensional (precio vs. VAN)

Se analizaron las variaciones en el precio de venta por unidad del producto. El objetivo fue identificar el intervalo mínimo de precio que hace viable financieramente el proyecto. El proyecto requeriría un precio mínimo de venta de USD \$6 por kg para alcanzar un VAN

positivo. Precios de venta inferiores generarían pérdidas económicas, comprometiendo la recuperación de la inversión y afectando la sostenibilidad del negocio.

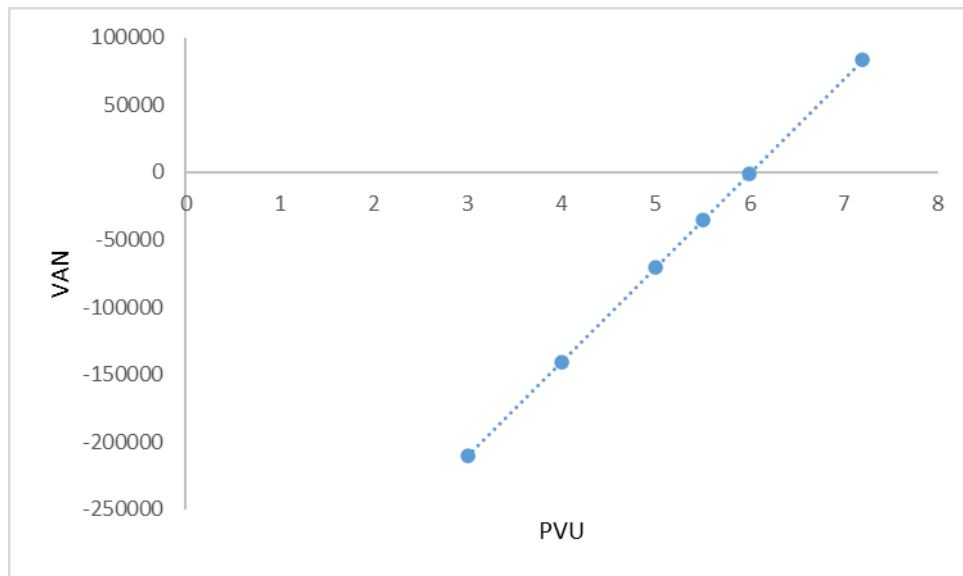


Figura 5. Comportamiento del VAN ante variaciones en el precio de venta por unidad.

c) Análisis bidimensional (precio vs. producción)

Se analizó el comportamiento del valor actual neto (VAN) en función de dos parámetros: la producción anual (en unidades) y el precio de venta por unidad (PVU). A través de esta matriz de sensibilidad se identificaron combinaciones favorables para lograr la viabilidad económica del proyecto y se establecieron intervalos mínimos necesarios (figura 8).

Los resultados indican que el proyecto solo genera un VAN positivo cuando se combinan niveles altos de producción con precios de venta superiores a USD \$6.00 por unidad. El punto de equilibrio técnico-financiero se alcanza con una producción mínima cercana a las 24000 unidades si el precio de venta es de USD \$7.20. A medida que disminuye el precio de venta, se requiere una producción aún mayor para compensar la pérdida de ingresos por unidad, lo cual no es conveniente debido a la capacidad instalada.

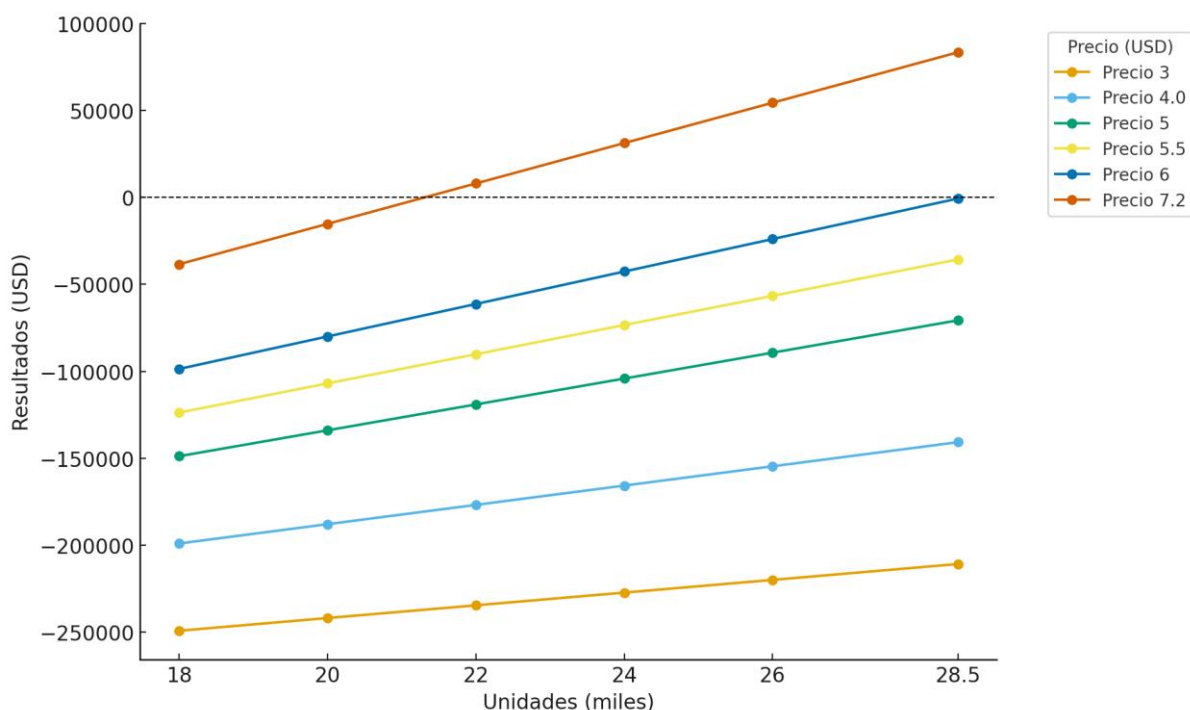


Figura 6. Análisis bidimensional de VAN ante variaciones simultáneas de precio y producción

CONCLUSIONES

Los drenajes ácidos de minas de carbón constituyen una problemática ambiental que impacta de manera significativa los cuerpos de agua. En este trabajo se empleó parte de dichos drenajes, los cuales fueron neutralizados en presencia de aireación, agitación, CaCO_3 y Ca(OH)_2 . Como resultado de este proceso se generaron lodos, que posteriormente se aprovecharon como materia prima para la obtención de un pigmento con valor agregado.

Se encontró que el proyecto de producción de pigmentos a partir de la neutralización de drenajes ácidos de minas de carbón es viable técnico económicamente para precios de venta superiores a USD \$6.5. Bajo este escenario, el análisis económico mostró magnitudes de: valor actual neto de \$34434 USD, una tasa interna de retorno del 20% y un periodo de recuperación de 4 años.

Mediante la ejecución de un diseño experimental estadístico 2^3 con punto central y puntos estrella, variando la temperatura entre 250 y 450 °C y la cantidad de masa de KOH entre

4.24 y 12.7 g, se obtuvo un pigmento de color marrón-rojizo, compuesto principalmente por oxihidróxidos férricos, cuyo contenido predominante podría corresponder a hematita.

Se dimensionó preliminarmente los equipos principales requeridos para el proceso, entre ellos reactores, un horno rotatorio y almacenamiento aplicando heurísticas de diseño y criterios de ingeniería reconocidos. Con esta aproximación fue posible establecer una configuración mecánica inicial a escala comercial, coherente con las condiciones de operación determinadas en el laboratorio, lo que permitió proyectar la factibilidad técnica del escalado industrial.

El principal aporte de este trabajo es demostrar que es posible fabricar un producto de valor agregado a partir de los lodos generados en la neutralización de drenajes ácidos de minas de carbón, los cuales constituyen el residuo de dicho proceso y fueron aprovechados como materia prima. Los resultados obtenidos evidencian que dicho aprovechamiento no solo es técnica y económicamente viable, sino que también abre la posibilidad de utilizar el pigmento resultante en diversas aplicaciones industriales, como la elaboración de pinturas, recubrimientos, cerámicas y resinas. De esta manera, se contribuye a la generación de alternativas sostenibles que, además de ofrecer un insumo útil para distintos sectores productivos, promueven la mitigación del impacto ambiental asociado a los lixiviados contaminantes.

REFERENCIAS

Buxbaum, G. (2008). *Industrial inorganic pigments* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Business Insider. (2022, 23 de marzo). How to make paint from pollution | World Wide Waste [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=21InDm4iUXc>

Color Palette. Técnicas de armonía fotográfica. <https://colorpalette.imageonline.co/es/>. Recuperado el 13 de mayo del 2025.

Coulson, J. M., & Richardson, J. F. (2002). *Chemical engineering design* (Vol. 6, 4th ed.). Butterworth-Heinemann.

De Almeida Silva, R., Menezes, J. C. S. D. S., Lopes, F. A., Kirchheim, A. P., & Schneider, I. A. H. (2017). Synthesis of a goethite pigment by selective precipitation of iron from acidic

coal mine drainage. *Mine Water and the Environment*, 36(3), 386-392. <https://doi.org/10.1007/s10230-017-0448-2>

De Almeida Silva, R., Secco, M. P., Lermen, R. T., Schneider, I. A. H., Hidalgo, G. E. N., & Sampaio, C. H. (2019). Optimizing the selective precipitation of iron to produce yellow pigment from acid mine drainage. *Minerals Engineering*, 135, 111-117. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.040>

Doksa, A. P. (2015). *Synthesis of iron oxide pigment from the treatment of Truetown acid mine drainage utilizing aeration* [Tesis de maestría, Ohio University]. OhioLINK Electronic Theses and Dissertations Center. http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=ohiou1420801380

Geankoplis, C. J. (2003). *Transport processes and separation process principles* (4th ed.). Prentice Hall.

Hariani, P. L., Salni, S., & Riyanti, F. (2017). Combination of CaCO_3 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ as agents for treatment acid mine drainage. *MATEC Web of Conferences*, 101, 02004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710102004>

iColorpalette. Color Palettes Generator. <https://icolorpalette.com>. Recuperado el 13 de mayo del 2025.

Juanra.art. (2021). Técnicas de armonía cromática en fotografía. <https://juanra.art/tecnicas-de-armonia-cromatica-en-fotografia/>. Recuperado el 20 de mayo del 2025.

Lermen, R. T., De Oliveira Orlando, G., & De Almeida Silva, R. (2023). Development of decorative mortars with pigments from acid mine drainage: Analysis of physical and mechanical properties. *Mining*, 3(4), 696-711. <https://doi.org/10.3390/mining3040038>

Livia, W. P., Uribe, B. S. S., & Martínez, C. H. C. (2022). Tratamiento de drenajes ácidos de mina (DAM) mediante filtros elaborados con relave minero. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 42(2), 1-14. <https://www.redalyc.org/journal/6078/607872732009/html/>

Marcello, R., Galato, S., Peterson, M., Riella, H., & Bernardin, A. (2008). Inorganic pigments made from the recycling of coal mine drainage treatment sludge. *Journal of Environmental Management*, 88(4), 1280-1284. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.005>

Marriaga Cabrales, N. (2020). ¿Cómo redactar el análisis de los resultados? [Material de apoyo]. Universidad del Valle.

Marriaga Cabrales, N. (2020). Consejos rápidos para redactar [Material de apoyo]. Universidad del Valle.

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2005). *Unit operations of chemical engineering* (7th ed.). McGraw-Hill.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Resolución 631 de 2015, por la cual se establecen los parámetros y estándares de vertimiento a cuerpos de agua y al sistema de alcantarillado público. <https://www.minambiente.gov.co>

Nienow, A. W., & Edwards, M. F. (1997). *Mixing in the process industries* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (Eds.). (2004). *Handbook of industrial mixing: Science and practice*. Wiley-Interscience.

Perry, R. H., & Green, D. W. (Eds.). (2008). *Perry's chemical engineers' handbook* (8th ed.). McGraw-Hill.

Pfaff, G. (2017). *Inorganic pigments* (2nd ed.). Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

The Sugar Bush Foundation. (2022, 7 de junio). True Pigments turning pollution into paint [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Gvn4BhbCajc>

Turton, R., Bailie, R. C., Whiting, W. B., & Shaeiwitz, J. A. (2018). *Analysis, synthesis, and design of chemical processes* (5th ed.). Pearson.

Wei, X. (2011). Characterization, dewatering, disposal and beneficial use of acid mine drainage sludge. En B. C. Robinson (Ed.), *Mine drainage and related problems* (pp. 189–210).

Zhao, P., Zhang, R., & Hu, M. (2024). Alkaline chemical neutralization to treat acid mine drainage with high concentrations of iron and manganese. *Water*, 16, 821. <https://doi.org/10.3390/w16060821>