

Diseño de un sistema de tratamiento integral para el aprovechamiento de aguas residuales de la Minería Winkita S.A.S, y reducción de carga contaminante en la Microcuenca de la Quebrada Baracuta en el Municipio de Sativasur, Boyacá

Trabajo final presentado por:	Sandra Esperanza Higuera Gómez Danny Andrea Ortiz Delgadillo Jenniffer Rodríguez Gamboa
Programa:	Especialización en Gestión Ambiental
Docente:	Eliana Alejandra Páez Lugo
Fecha:	28 de marzo de 2026

INDICE DE CONTENIDO

Resumen	4
Abstract	5
1. Introducción	6
1.1. Objetivo General.....	8
1.2. Objetivos Específicos	8
1.3. Metodología.....	9
Tabla comparativa de la metodología.....	11
1.3.1. Identificación y Análisis del Problema.....	12
1.3.2. Planificación de la Solución	13
2. Descripción de la empresa a intervenir	14
2.1.1. Misión	15
2.1.2. Visión	15
2.1.3. Mapa de procesos	15
2.1.4. Descripción del proceso a intervenir.....	16
2.1.5. Descripción del problema que presenta el proceso.....	16
3. Establecimiento de planes de acción para la solución del problema	18
3.1. Establecimiento de objetivos.....	18
3.2. Descripción de la solución	19
3.3. Secuencia de actividades para ejecución de la solución	19
3.4. Descripción de recursos necesarios para la ejecución de la solución	21
4. Definición del alcance de la solución, partes interesadas, cronograma y presupuestos. 22	
4.1. Alcance final de la solución.....	22
4.2. Identificación de responsables de las actividades para ejecución	23
4.3. Cronograma de Ejecución.....	25

4.4.	Presupuesto	27
5.	Propuesta de Innovación.	31
5.1.	Incorporación de Tecnologías Digitales (Smart Monitoring).....	31
5.2.	Uso de Biochar como Material Innovador.....	31
5.3.	Energía Renovable para el Sistema.....	31
5.4.	Modelo de Gobernanza Comunitaria	32
5.5.	Escalabilidad y Replicabilidad	32
5.6.	Síntesis con SIG	32
5.7.	Impacto esperado	32
5.8.	Matriz Comparativa: Sistema Base vs. Propuesta de Innovación.	33
6.	Referencias bibliográficas	35

RESUMEN

Los sistemas de tratamiento integral de aguas residuales se fundamentan a través de un conjunto de procesos y operaciones ubicados de modo secuencial, que permitan adecuar el agua a fin de cumplir con la normativa colombiana vigente aplicable, para su disposición final por parte de la población. Mediante la metodología investigación- acción, se propone un enfoque de acción efectiva orientada a resultados de soluciones prácticas que impacten de manera positiva directamente en la quebrada del Municipio de Sativasur.

El desarrollo del documento, tiene como objetivo diseñar un sistema de tratamiento integral para el aprovechamiento de aguas residuales generadas en actividades de extracción de carbón coque, cuyas descargas afectan directamente la quebrada Baracuta ubicada en el Municipio de Sativasur. Posteriormente el desarrollo se fundamenta en la conceptualización de estudios de pretratamiento físico, neutralización y precipitación de metales, seguido de un tratamiento pasivo mediante drenes anóxicos de caliza (ALD/SAPS) y humedales construidos de flujo vertical, finalizando con una etapa de pulimiento. Asimismo, se contempla la caracterización de la línea base, piloto a escala, plan de monitoreo y riesgo, definición de alcance, partes interesadas, un cronograma de nueve meses y un presupuesto marco.

Palabras clave: agua residual, carbón coque, neutralización, ALD/SAPS, humedales construidos.

ABSTRACT

Integrated wastewater treatment systems are based on a series of sequential processes and operations that prepare the water to meet current Colombian regulations for final disposal by the population. Using action research methodology, this document proposes an effective, results-oriented approach to practical solutions that will have a direct and positive impact on the stream in the Municipality of Sativasur.

The purpose of this document is to design a comprehensive treatment system for wastewater generated from coke mining activities, whose discharges directly affect the Baracuta stream located in the Municipality of Sativasur. The development is based on the conceptualization of physical pretreatment studies, neutralization and precipitation of metals, followed by passive treatment using anoxic limestone drains (ALD/SAPS) and vertical flow constructed wetlands, concluding with a polishing stage. The document also includes baseline characterization, a pilot-scale project, a monitoring and risk plan, scope definition, stakeholder identification, a nine-month timeline, and a framework budget.

Keywords: wastewater, coke coal, neutralization, ALD/SAPS, constructed wetlands.

1. INTRODUCCIÓN

El mayor recurso tradicional de agua fresca como aguas subterráneas, lagos, humedales, ríos entre otros, representan el 1% del total del agua del planeta. La sobreexplotación de estos recursos hídricos en zonas de pastizales para la ganadería, como el caso de Sativasur, ha generado una situación de alta carga contaminante del recurso, obligando a buscar un sistema de tratamiento de agua y a mejorar la eficiencia de su uso. El uso del agua residual provenientes de la extracción minera no es de novedad, y, su disposición final extraída deja a su paso carga contaminante y desequilibrio ambiental en la Quebrada Baracuta. Por tanto, existen estudios de sistemas de tratamientos que incluyen tecnologías pasivas como ALD/SAPS y humedales contruidos, pasivo-activas que demuestran eficiencia para neutralizar acidez, remover hierro, aluminio y Manganeseo, y, mejorar pH con costos operativos menores en relación a tratamientos activos.

Los drenes anóxicos de caliza (ALD, por sus siglas en inglés) y los sistemas de drenaje pasivo sucesivo (SAPS) son tecnologías pasivas utilizadas en el tratamiento de aguas ácidas de mina. Los ALD consisten en zanjas subterráneas rellenas de caliza que permiten aumentar la alcalinidad del agua al contacto con el carbonato de calcio, favoreciendo la neutralización de la acidez y la precipitación de metales. Por su parte, los SAPS combinan capas de caliza y material orgánico en celdas de tratamiento, lo que potencia la remoción de hierro, aluminio y manganeso, además de mejorar el pH del agua. Estas tecnologías se caracterizan por su bajo costo operativo y su eficacia comprobada en contextos mineros, lo que las convierte en una alternativa sostenible frente a tratamientos activos más costosos. (Kadlec & Wallace, 2009; Skousen, Ziemkiewicz, & McDonald, 2019; Younger, Banwart, & Hedin, 2002).

En el marco de un enfoque de investigación- acción, cualquier descarga requiere un permiso de vertimientos otorgado por la Autoridad Ambiental Competente (Corpoboyacá). Po tanto, este permiso esta regulado al cumplimiento de los limites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015, la cual se enmarca en el Decreto Único Reglamento 1076 de 2015.

La Resolución 0631 de 2015, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece los parámetros y valores límites máximos permisibles para los vertimientos

puntuales de aguas residuales a cuerpos de agua superficiales y a sistemas de alcantarillado público en Colombia. Esta normativa busca proteger la calidad del recurso hídrico y garantizar que las descargas de origen doméstico, industrial o minero cumplan con estándares mínimos de control de contaminantes como pH, sólidos suspendidos, demanda química y bioquímica de oxígeno, metales pesados y otros compuestos. Para el sector minero, el acatamiento de esta resolución es un requisito obligatorio para la obtención y renovación del permiso de vertimientos ante la autoridad ambiental competente. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015)

Posteriormente, a partir del enfoque de investigación-acción, se investiga el pretratamiento físico como, desarenado, neutralización y precipitación de metales, seguidamente de un tratamiento pasivo mediante drenes anóxicos de caliza, el cual consiste en pasar agua ácida, a través de zanjas subterráneas rellenas de caliza, la construcción de humedales de flujo vertical y recirculación para la supresión de polvo reduciendo descargas. Todo lo anterior a fin de cumplir con la Resolución 0631 de 2015 sobre límites de vertimientos, así como el trámite y obligaciones del permiso de vertimientos en efecto de la Corporación Autónoma Regional, Corpoboyacá.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema integral de tratamiento integral para el aprovechamiento de aguas residuales de la Minería Winkita S.A.S y reducir la carga contaminante en la Microcuenca de la Quebrada Baracuta en el Municipio de Sativasur, Boyacá.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar diagnóstico de las condiciones de la microcuenca de la Quebrada Baracuta en el punto crítico de influencia.
- Caracterizar los parámetros fisicoquímicos y biológicos de las aguas residuales generadas en la Mina.
- Seleccionar el sistema de tratamiento integral del agua adecuado para el aprovechamiento.
- Establecer las especificaciones técnicas del sistema para su aplicación en el tratamiento de la mina.
- Estructurar el plan de implementación: alcance, responsables, cronograma, presupuesto y gestión.

1.3. METODOLOGÍA

El diseño del sistema integral de tratamiento de aguas residuales para la Minería Winkita S.A.S se desarrollará bajo el enfoque de investigación-acción, el cual permite combinar el análisis técnico con la implementación práctica en campo, garantizando resultados aplicables y verificables. La metodología se estructura en cinco fases secuenciales, cada una con actividades específicas, responsables y productos esperados:

Fase 1. Diagnóstico

✓ **Actividades:**

- Revisión bibliográfica de experiencias nacionales e internacionales en tratamiento de aguas ácidas de mina (DAM).
- Levantamiento de información secundaria sobre la microcuenca de la Quebrada Baracuta y antecedentes de la empresa.
- Identificación de puntos críticos de vertimiento y zonas de mayor impacto ambiental.

✓ **Producto esperado:** *Informe diagnóstico con mapa de influencia y descripción de la situación base.*

Fase 2. Parámetros Fisicoquímicos y biológicos

✓ **Actividades:**

- Medición de parámetros en campo: pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto, turbidez.
- Análisis de laboratorio: concentración de metales pesados (Fe, Al, Mn), sulfatos, sólidos suspendidos totales (SST), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO).
- Evaluación biológica: bioindicadores acuáticos y análisis de macroinvertebrados para determinar el estado ecológico de la quebrada.

✓ **Producto esperado:** *Línea base de calidad del agua con resultados comparados frente a la normativa (Resolución 0631 de 2015).*

Fase 3. Diseño del sistema de tratamiento:

✓ **Actividades:**

- Selección de tecnologías apropiadas (pretratamiento físico, neutralización, precipitación de metales, ALD/SAPS, humedales construidos).
- Elaboración de diagramas de flujo y balances de masa.
- Predimensionamiento de unidades de tratamiento considerando caudales, cargas contaminantes y eficiencia esperada.

✓ **Producto esperado:** *Documento técnico con especificaciones preliminares y justificación de la alternativa seleccionada.*

Fase 4. Especificaciones técnicas e implementación piloto:

✓ **Actividades:**

- Definición de materiales, dimensiones, criterios de diseño hidráulico y estructural.
- Construcción de un piloto a escala reducida en campo.
- Monitoreo de desempeño del piloto: variación de pH, remoción de metales, reducción de sólidos y mejora de parámetros biológicos.

✓ **Producto esperado:** *Documento técnico con especificaciones preliminares y justificación de la alternativa seleccionada.*

Fase 5. Plan de operación, mantenimiento y gestión.

✓ **Actividades:**

- Elaboración del plan de operación y mantenimiento (O&M).
- Definición de roles y responsabilidades institucionales.
- Establecimiento de cronograma de nueve meses con hitos de seguimiento.
- Estimación de presupuesto marco y análisis de riesgos asociados.

✓ **Producto esperado:** *Plan integral de implementación con trazabilidad normativa y soporte para trámite de permiso de vertimientos ante Corpoboyacá.*

Tabla comparativa de la metodología

Fase	Actividades principales	Productos esperados
Fase 1. Diagnóstico inicial	- Revisión bibliográfica de experiencias en tratamiento de aguas ácidas de mina (DAM). - Levantamiento de información secundaria sobre la microcuenca Baracuta y antecedentes de la empresa. - Identificación de puntos críticos de vertimiento e impactos ambientales.	Informe diagnóstico con mapa de influencia y descripción de la situación base.
Fase 2. Caracterización fisicoquímica y biológica	- Medición en campo: pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto, turbidez. - Análisis de laboratorio: metales pesados (Fe, Al, Mn), sulfatos, SST, comparada frente a la normativa DQO, DBO. (Resolución 0631 de 2015). - Evaluación biológica: bioindicadores acuáticos y macroinvertebrados.	Línea base de calidad del agua
Fase 3. Diseño del sistema de tratamiento	- Selección de tecnologías apropiadas (pretratamiento físico, neutralización, ALD/SAPS, humedales construidos). - Elaboración de diagramas de flujo y balances de masa. - Predimensionamiento de unidades de tratamiento considerando caudales y cargas contaminantes.	Documento técnico con especificaciones preliminares y justificación de la alternativa seleccionada.
Fase 4. Especificaciones técnicas implementación piloto	- Definición de materiales, dimensiones y criterios de diseño hidráulico y estructural. - Construcción de un piloto a escala reducida. - Monitoreo de desempeño del piloto: variación de pH, remoción de metales, reducción de sólidos.	Informe de validación del piloto con ajustes para escalamiento.

Fase	Actividades principales	Productos esperados
Fase 5. Plan de operación, mantenimiento y gestión	- Elaboración del plan de operación y mantenimiento (O&M).	
	- Definición de roles y responsabilidades institucionales. con trazabilidad normativa y - Establecimiento de cronograma soporte para trámite de permiso de nueve meses con hitos de de vertimientos ante seguimiento. Corpoboyacá. - Estimación de presupuesto marco y análisis de riesgos.	Plan integral de implementación

(Kadlec & Wallace, 2009; Skousen, Ziemkiewicz, & McDonald, 2019; Younger, Banwart, & Hedin, 2002).

1.3.1. Identificación y Análisis del Problema

La empresa MINERIA WINKITA S.A.S, actualmente carece de una regular gestión ambiental la cual no permite dar cumplimiento normativo, ya que, el vertimiento de las aguas extraídas de la mina no cuenta con previo tratamiento, representando así, un riesgo legal y ambiental en la operación minera que allí se adelanta.

El problema central radica en la descarga directamente a la Microcuenca de la Quebrada Baracuta e infiltración en el suelo. Algunos parámetros críticos suelen ser:

- ✓ Acidez extrema, presencia de metales pesados, solidos suspendidos totales, sulfatos y conductividad.

En cuanto al análisis del problema del porque no se realiza el tratamiento de las aguas vertidas de la operación Minería Winkita S.A.S, se puede determinar, a partir de tres fallas fundamentales, como:

1. **Fallas en la planificación y diseño:** Por la inexistencia de infraestructura como una planta de tratamiento o piscina de sedimentación, asimismo, la ausencia de la subestimación del caudal.
2. **Fallas operativas y de mantenimiento:** Debido a la falta de reactivos como, la cal, agentes neutralizantes del PH, temperatura, oxígeno disuelto, turbidez.

3. **Fallas de gestión y cumplimiento:** Dado que no existe priorización sobre el tratamiento adecuado del recurso, por ende, no cumple con los límites permisibles normativos.

Posteriormente, esta problemática conlleva impactos y consecuencias que afectan directamente la Microcuenca de la Quebrada Baracuta, por ende, la degradación de la fauna acuática, acumulación de metales y pérdida de biodiversidad local. En el componente social genera conflictos en la comunidad, debido a la exposición a multas onerosas, procesos sancionatorios y hasta el cierre definitivo de la operación. Seguidamente, a nivel económico los costos de remediación a largo plazo pueden ser más altos en relación a un tratamiento preventivo actual.

1.3.2. Planificación de la Solución

De acuerdo al análisis del problema identificado en MINERIA WINKITA S.A.S, la planificación debe ser sistémica, iniciando desde el diagnóstico técnico, hasta el diseño de un sistema integral de tratamiento para el aprovechamiento de aguas residuales que permita reducir la carga contaminante en la Microcuenca de la quebrada Baracuta, basados en una ruta estructurada en 4 fases:

1. Diagnóstico y caracterización: Realizando balance de masas de agua que identifiquen todas las fuentes de generación, caracterización fisicoquímica a partir de muestreos en puntos de vertimiento y por último la evaluación del caudal.
2. Seleccionar la tecnología de tratamiento: dependiendo la química del agua y el presupuesto se elige si es un tratamiento activo para alta carga contaminante como neutralización, precipitación y/o clarificación, o un tratamiento pasivo para caudales menores o post-cierre como humedales artificiales.
3. Diseño de ingeniería de detalle: En esta etapa se elabora diagramas de flujo y balances de masa
4. Implementación y control operativo: requiriendo la gestión continua.

2. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA A INTERVENIR

Minería Winkita S.A.S., es una empresa ubicada en el Municipio de Sativasur, Departamento de Boyacá. El Municipio de Sativasur, se encuentra ubicado entre las coordenadas geográficas 6°05'36"N y 72°42'42"O.

La empresa Winkita S.A.S realiza extracción de carbón metalúrgico en Sativasur. En efecto, de permisos y seguimiento la autoridad competente es la Corporación Autónoma, Corpoboyacá. Si la producción alcanzara umbrales de competencia nacional, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales-ANLA sería competente (≥ 800.000 t/año en carbón), por tanto, los tramites ambientales se ejecutan de acuerdo a los lineamientos de la Corporación.

2.1.1. Misión

En **MINERIA WINKITA S.A.S** nuestra misión es explotar, producir y comercializar carbón metalúrgico de alta calidad de manera responsable y sostenible en su operación, generando impacto social positivo que se enfoque en el compromiso y beneficio de nuestros proveedores, nuestra comunidad, nuestros empleados y nuestros accionistas. (Minería Winita SAS, 2024)

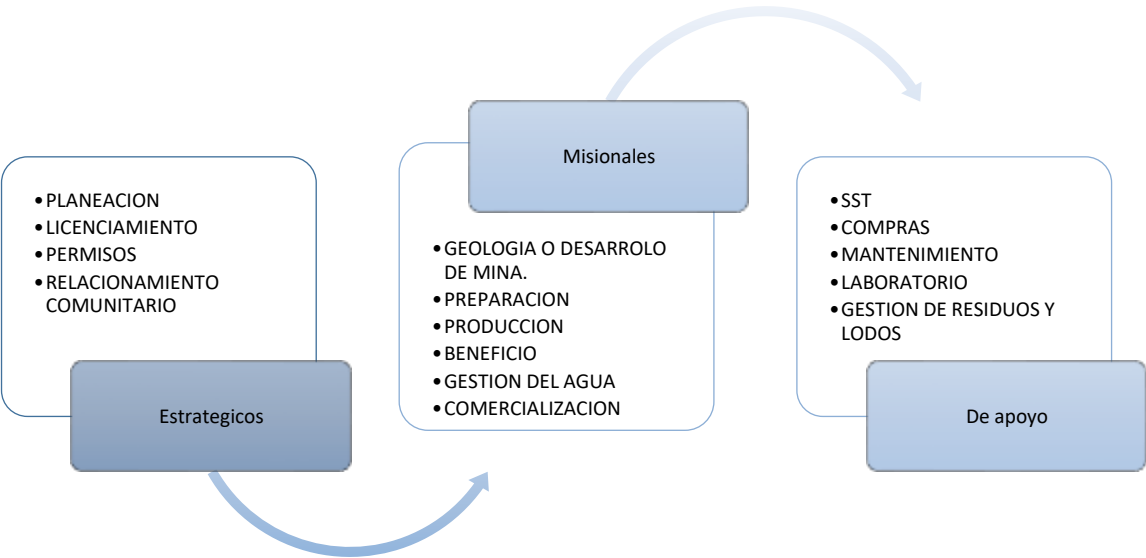
2.1.2. Visión

Nuestro compromiso es ser una empresa con mayor capacidad y efectividad en el proceso producción y comercialización del carbón metalúrgico a nivel local, departamental y nacional, enfocada en el cumplimiento normativo, que nos permita ampliar nuestro compromiso en la comunidad y el medioambiente. (Minería Winkita SAS, 2024)

2.1.3. Mapa de procesos

A continuación, se presenta el mapa de procesos propio de la empresa MINERIA WINKITA S.A.S

Figura 1. Mapa de procesos Minería Winkita SAS



2.1.4. Descripción del proceso a intervenir

Inicialmente la intervención se centra en la Gestión del agua residual y vertimientos (captación, consumo, generación de DAM, tratamiento, reúso y descarga), apoyando esencialmente este proceso misional en el mapa de la empresa MINERIA WINKITA S.A.S, influyendo transversalmente en todos los demás procesos de la empresa.

Partiendo que inicialmente el agua recolectada al interior de la mina es producto de la filtración por la fractura del macizo rocoso y en otros casos por las aguas lluvias que no son debidamente canalizadas, estas son almacenadas en un reservorio el interior de la mina y posteriormente se extraen a través de un sistema de bombeo por tubería hasta desembocar en superficie para ser vertidas sin ningún tipo de tratamiento, desembocando finalmente a la quebrada denominada Baracuta , generando así cambios fisicoquímicos del suelo, contaminación en la vegetación y otros tipos de impactos ambientales.

2.1.5. Descripción del problema que presenta el proceso

La transición de MINERIA WINKITA S.A.S, de una explotación artesanal a ser titular minero ante la ANM, conlleva un pasivo de infraestructura crítico, por falta de una planificación técnica a largo plazo enfrentándose a una problemática derivada por la disposición final del agua residual extraída de la mina y verterla sin tratamiento alguno hasta desembocar en la quebrada baracuta dejando a su paso gran contaminación y desequilibrio ambiental viendo de cara obstáculos derivados de este proceso que constituyen el núcleo del problema:

-Ajuste en la Línea Base Hídrica: Generalmente, el vertimiento presenta propiedades físico-químicas significativamente diferentes al río, quebrada o suelo, siendo estos el organismo

receptor. El ingreso de aguas con alteración fisicoquímicas como un pH ácido, una conductividad elevada y metales pesados disueltos perturba el balance químico del ecosistema local, y modificando la capacidad de abastecimiento del recurso.

-Acumulación de Sedimentos y Colmataciones: Las aguas provenientes de la minería subterránea transportan grandes volúmenes de lodo y fragmentos pequeños de roca. Al ser vertidos en una decantación eficaz se acumulan en el lecho de los ríos, alterando el cauce natural, aniquilando los hábitats acuáticos y perjudicando los sistemas de riego de las comunidades agrícolas aledañas.

-Conservación de Factores Históricos: Puesto que la zona ha experimentado actividad artesanal anteriormente, el vertimiento podría albergar residuos de reactivos antiguos (como mercurio o cianuro) o derivados de la oxidación de sulfuros que han permanecido confinados. Cuando estos contaminantes llegan a la superficie, se transforman en móviles y bioacumulables en la cadena alimentaria.

3. ESTABLECIMIENTO DE PLANES DE ACCIÓN PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

El plan de acción se fundamenta en la implementación de un sistema integral de tratamiento de aguas residuales mineras, que combine tecnologías intermedia y pasiva para garantizar el cumplimiento de la Resolución 0631 de 2015; Se priorizan medidas de neutralización, remoción de metales pesados y mejora de parámetros fisicoquímicos, con el fin de reducir la carga contaminante en la Quebrada Baracuta.

Las acciones se estructuran en tres niveles:

- ✓ Prevención en la fuente: canalización adecuada de aguas lluvias y reducción de escorrentías contaminadas.
- ✓ Tratamiento intermedio: aplicación de pretratamiento físico (desarenado y sedimentación) y neutralización química.
- ✓ Tratamiento pasivo: implementación de drenes anóxicos de caliza (ALD/SAPS) y humedales construidos de flujo vertical para la estabilización final

3.1. ESTABLECIMIENTO DE OBJETIVOS

- ✓ **Objetivo técnico:** garantizar que los vertimientos cumplan con los límites máximos permisibles de la Resolución 0631 de 2015.
- ✓ **Objetivo ambiental:** reducir la carga contaminante (metales pesados, acidez y sólidos suspendidos) en la Quebrada Baracuta.
- ✓ **Objetivo social:** mejorar la calidad del recurso hídrico para las comunidades agrícolas y ganaderas aledañas.
- ✓ **Objetivo institucional:** fortalecer la trazabilidad normativa y asegurar la obtención del permiso de vertimientos ante Corpoboyacá.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN

La solución consiste en diseñar un sistema integral de tratamiento, para reducir la carga contaminante de la Quebrada Baracuta, la cual consiste en:

- ✓ **Pretratamiento físico:** sedimentadores y desarenadores para remover sólidos gruesos y lodos.
- ✓ **Neutralización y precipitación de metales:** aplicación de caliza y agentes alcalinos para ajustar el pH y favorecer la precipitación de Fe, Al y Mn.
- ✓ **Drenes anóxicos de caliza (ALD):** zanjas subterráneas rellenas de caliza que aumentan la alcalinidad y reducen la acidez del agua.
- ✓ **Sistemas pasivos sucesivos (SAPS):** celdas con capas de caliza y material orgánico que potencian la remoción de metales y mejoran el pH.
- ✓ **Humedales construidos de flujo vertical:** unidades de tratamiento biológico que permiten la depuración final y la mejora de parámetros ecológicos

3.3. SECUENCIA DE ACTIVIDADES PARA EJECUCIÓN DE LA SOLUCIÓN

1. **Caracterización inicial:** medición de parámetros fisicoquímicos y biológicos en la Quebrada Baracuta.
2. **Diseño técnico:** elaboración de diagramas de flujo, balances de masa y predimensionamiento de unidades.
3. **Construcción piloto:** instalación de un sistema a escala reducida para validar la eficiencia.
4. **Monitoreo y ajuste:** seguimiento de parámetros (pH, metales, DBO, DQO) y ajustes de diseño.
5. **Escalamiento:** construcción del sistema integral definitivo.
6. **Operación y mantenimiento:** capacitación de personal, definición de roles y cronograma de seguimiento.

Fases y actividades:

Fase	Actividades	Responsable principal
Fase 1. Diagnóstico inicial		Equipo técnico ambiental
	- Revisión bibliográfica	Ingeniero ambiental
	- Levantamiento de información secundaria	Ingeniero ambiental+ topógrafo
	- Identificación de puntos críticos	Equipo técnico ambiental
Fase 2. Caracterización fisicoquímica y biológica		técnico ambiental
	- Medición en campo (pH, turbidez, etc.)	Equipo técnico ambiental
	- Análisis de laboratorio	Laboratorio especializado
	- Evaluación biológica (bioindicadores)	Biólogos
Fase 3. Diseño del sistema de tratamiento		Ingeniero ambiental+ ingeniero civil
	- Selección de tecnologías	Comité técnico
	- Diagramas de flujo y balances de masa	Ingenieros de procesos
	- Pre-dimensionamiento de unidades	Ingeniero Civil
Fase 4. Implementación piloto		Ingeniero civil+ técnico ambiental
	- Definición de materiales y criterios de diseño	Ingenieros civiles
	- Construcción piloto	Operario de campo
	- Monitoreo de desempeño	Laboratorio + técnicos ambientales
Fase 5. Plan de operación y gestión		Dirección ambiental + Corpoboyacá
	- Elaboración plan O&M	Equipo técnico
	- Definición de roles y responsabilidades	Dirección de la empresa
	- Cronograma de seguimiento	Comité de gestión
	- Estimación de presupuesto y análisis de riesgos	Dirección financiera + ambiental

3.4. DESCRIPCIÓN DE RECURSOS NECESARIOS PARA LA EJECUCIÓN DE LA SOLUCIÓN

1. Recursos tecnológicos:

- ✓ Materiales de construcción: caliza, geomembranas, tuberías, bombas.
- ✓ Equipos de laboratorio para análisis de agua.
- ✓ Software de modelación: Simulador hidráulico y balances de masa

2. Recursos humanos:

- ✓ Ingenieros ambientales.
- ✓ Ingeniero civil.
- ✓ Técnico ambiental.
- ✓ Topógrafo.
- ✓ Técnicos de laboratorio.
- ✓ Comité técnico.
- ✓ Ingeniero de procesos.
- ✓ Equipo técnico.
- ✓ Dirección ambiental de Corpoboyacá.
- ✓ Comité de gestión.
- ✓ Dirección financiera.

3. Recursos financieros

- ✓ Presupuesto marco estimado para nueve meses.
- ✓ Incluye construcción piloto, monitoreo y escalamiento.

4. Recursos institucionales

- ✓ Permisos de vertimientos.
- ✓ Licencias ambientales.
- ✓ Seguimiento y visita por parte de Corpoboyacá.

4. DEFINICIÓN DEL ALCANCE DE LA SOLUCIÓN, PARTES INTERESADAS, CRONOGRAMA Y PRESUPUESTOS.

El diseño e implementación del sistema integral de tratamiento de aguas residuales para la Minería Winkita S.A.S permite obtener resultados verificables en la reducción de la carga contaminante de la Quebrada Baracuta. Los hallazgos se derivan de la caracterización inicial, el diseño técnico y la validación piloto, evidenciando mejoras significativas en parámetros fisicoquímicos, biológicos y de cumplimiento normativo.

Los resultados revelaran la combinación de tecnologías pasivas como, ALD/SAPS y humedales construidos, con procesos intermedios de neutralización y sedimentación constituyéndose en alternativas eficientes, sostenibles y replicables en contextos mineros similares. La discusión se centrará en la comparación de los valores obtenidos frente a los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015, confirmando si el sistema propuesto cumple con la normativa vigente y aporta beneficios ambientales, sociales e institucionales

4.1. ALCANCE FINAL DE LA SOLUCIÓN

El sistema integral de tratamiento de aguas residuales para la Minería Winkita S.A.S se orienta a:

- Realizar diagnostico previo a las condiciones iniciales de la Quebrada Baracuta
- Reducir la carga contaminante (metales pesados, acidez y sólidos suspendidos) en la Quebrada Baracuta.

- Implementar tecnologías de pretratamiento físico, neutralización química, drenes anóxicos de caliza (ALD/SAPS) y humedales contruidos de flujo vertical.
- Cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015 y el Decreto 1076 de 2015.
- Validar la eficiencia del sistema mediante un piloto a escala, con monitoreo continuo y trazabilidad normativa.
- Garantizar sostenibilidad técnica, ambiental, social e institucional, fortaleciendo la relación con la comunidad y la autoridad ambiental.

El alcance incluye desde la caracterización inicial hasta la operación y mantenimiento del sistema definitivo, con un horizonte de ejecución de nueve meses. (Project Management Institute, 2021; García & Rojas, 2020).

4.2. IDENTIFICACIÓN DE RESPONSABLES DE LAS ACTIVIDADES PARA EJECUCIÓN

Las partes involucradas en el diseño, implementación y seguimiento del sistema son:

Parte interesada	Actividad	Rol / Responsabilidad
Minería Winkita S.A.S	- Definición de roles y responsabilidades	Responsable de la financiación, operación y mantenimiento del sistema.
Corpoboyacá	- Plan de operación y gestión	Autoridad ambiental competente. Otorga permisos de vertimientos y supervisa cumplimiento normativo.
Equipo ambiental	técnico - Revisión bibliográfica - Levantamiento de información secundaria. - Identificación de puntos críticos - Evaluación biológica (bioindicadores)	Diagnóstico, caracterización y diseño del sistema.

Parte interesada	Actividad	Rol / Responsabilidad
	-Medición en campo (pH, turbidez -Selección de tecnologías -Diagramas de flujo y balances de masa. -Pre-dimensionamiento de unidades.	
Ingenieros civiles y de procesos	- Definición de materiales y criterios de diseño. -Construcción piloto. -Monitoreo de desempeño.	Diseño hidráulico, estructural y construcción del piloto.
Laboratorio especializado	-Análisis de laboratorio.	Análisis fisicoquímico y biológico de las aguas.
Comité de gestión ambiental de la empresa	- Cronograma de seguimiento.	Seguimiento interno, trazabilidad y reporte a la autoridad.
Comunidad local (agricultores y ganaderos)		Beneficiarios directos de la mejora en la calidad del recurso hídrico.
Dirección financiera de la empresa	-Estimación de presupuesto y análisis de riesgos.	Administración del presupuesto marco.

4.3. CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN

Fase	Tarea	Duración	Dependencia	Recursos asignados
Fase 1 Diagnóstico inicial	-Revisión bibliográfica	Mes 1	Inicio	-Equipo técnico ambiental
	-Levantamiento de información secundaria			-Ingeniero ambiental
	-Identificación de puntos críticos			-Topógrafo
Fase 2. Caracterización fisicoquímica y biológica	- Medición de campo (pH, turbidez)	Mes 2-3	Después de la Fase 1	-Técnico ambiental
	-Análisis de laboratorios	Mes 2		-Equipo técnico ambiental
	-Evaluación biológica	Mes 2-3		-Laboratorio especializado
	(bioindicadores)	Mes 3-4		-Biólogos
Fase 3. Diseño del sistema de tratamiento	- Selección de tecnologías	Mes 4	Después de la Fase 2	-Comité técnico
	- Diagrama de flujo y balance de masas.	Mes 4-5		-Ingeniero de procesos
	- Pre-dimensionamiento de unidades	Mes 5		-Ingeniero civil
				-Ingeniero civil + técnico ambiental

Fase	Tarea	Duración	Dependencia	Recursos asignados
Fase 4. Implementación de piloto	-Definición de materiales y criterios de diseño	Mes 6	Después del diseño	-Ingeniero civil + técnico ambiental -Ingenieros civiles
	-Construcción piloto	Mes 6-7		-Operario de campo -
	-Monitoreo de desempeño	Mes 7		Laboratorio+técnicos ambientales
Fase 5. Plan de operación y gestión	- Elaboración plan O&M	Mes 8	Después de la Implementación piloto	-Dirección ambiental+ Corpoboyacá
	-Definición de roles y responsabilidades	Mes 8-9		-Equipo técnico -Dirección de la empresa
	-Cronograma de seguimiento	Mes 9		-Comité de gestión -Dirección ambiental + Financiera

4.4. PRESUPUESTO

El presupuesto se proyecta para cubrir las fases de diagnóstico, diseño, construcción piloto, monitoreo y escalamiento:

- Costos directos

1. Materiales de construcción:

Ítem	Cantidad	Unidad	Costo unitario (COP)	Subtotal (COP)	Justificación
Caliza triturada (para ALD/SAPS)	80	Toneladas	\$450.000	\$36.000.000	Material base para neutralización y alcalinización.
Geomembrana HDPE 1 mm	2.500	m ²	\$22.000	\$55.000.000	Impermeabilización de celdas y humedales.
Tubería PVC 6"	120	m	\$85.000	\$10.200.000	Conducción entre unidades de tratamiento.
Tubería PVC 4"	150	m	\$45.000	\$6.750.000	Distribución y drenajes secundarios.
Bombas sumergibles 3 HP	2	unidad	\$6.500.000	\$13.000.000	Bombeo desde reservorio minero a sistema piloto.
Material orgánico (compost)	25	m ³	\$95.000	\$2.375.000	Capa orgánica para SAPS y humedal de flujo vertical.
Gravas y arenas	30	m ³	\$65.000	\$1.950.000	Medios filtrantes.

Subtotal materiales: \$125.275.000 COP

2. Laboratorio y ensayos

Ensayo	Frecuencia	Cantidad	Costo unitario	Subtotal
Metales pesados (Fe, Al, Mn)	6 campañas	18 análisis	\$650.000	\$11.700.000
DQO / DBO	6 campañas	12 ensayos	\$320.000	\$3.840.000
Sulfatos	6 campañas	6 análisis	\$200.000	\$1.200.000
SST	6 campañas	6 análisis	\$150.000	\$900.000
Bioindicadores	3 campañas	3 muestreos	\$3.200.000	\$9.600.000

Subtotal laboratorio: \$27.240.000 COP

3. Mano de obra especializada

Cargo	Tiempo	Costo mensual	Subtotal
Ingeniero ambiental	9 meses	\$6.500.000	\$58.500.000
Ingeniero civil	4 meses	\$7.200.000	\$28.800.000
Técnico ambiental	9 meses	\$2.800.000	\$25.200.000
Operarios de campo (2)	3 meses	\$1.600.000	\$9.600.000

Subtotal mano de obra: \$122.100.000 COP

4. Software, modelación y herramientas digitales

Ítem	Costo
------	-------

Licencia anual software hidráulico (EPA-SWMM/ equivalencia privada) \$3.500.000

Ítem	Costo
Modelación geoespacial SIG (ArcGIS/QGIS + procesamiento)	\$4.000.000
Dashboard para monitoreo (desarrollo básico)	\$8.500.000
Sensores IoT de pH, turbidez y conductividad (3)	\$12.000.000
Subtotal digital: \$28.000.000 COP	

- Costos indirectos

1. Capacitación y O&M

Actividad	Costo
Capacitación de operarios (20 horas)	\$5.500.000
Manual O&M	\$4.000.000
Herramientas menores y EPP	\$3.500.000
Subtotal: \$13.000.000 COP	

2. Gestión institucional

Actividad	Costo
Trámite permiso de vertimientos	\$4.800.000
Revisión documental con Corpoboyacá	\$3.400.000
Asesoría jurídica ambiental	\$5.500.000
Subtotal: \$13.700.000 COP	

3. Contingencias (10%)

10% sobre costos directos e indirectos = **\$34.331.500 COP**

TOTAL DETALLADO ESTIMADO: \$363.646.500 COP

(Project Management Institute, 2021; García & Rojas, 2020).

5. PROPUESTA DE INNOVACIÓN.

5.1. 1. INCORPORACIÓN DE TECNOLOGÍAS DIGITALES (SMART MONITORING)

- Implementar sensores IoT en puntos críticos del sistema (entrada, salida de cada unidad de tratamiento, humedales construidos).
- Monitoreo en tiempo real de parámetros como pH, turbidez, metales pesados y oxígeno disuelto.
- Integración con un dashboard interactivo que permita a la empresa y a Corpoboyacá visualizar el desempeño del sistema y generar alertas tempranas.

Valor agregado: aumenta la trazabilidad normativa, facilita auditorías y permite tomar decisiones rápidas ante desviaciones.

5.2. USO DE BIOCHAR COMO MATERIAL INNOVADOR

- Incorporar biochar (carbón vegetal obtenido de residuos agrícolas locales) en los humedales construidos como medio filtrante.
- El biochar mejora la retención de metales pesados y nutrientes, además de favorecer la actividad microbiana.
- Se convierte en una alternativa sostenible y de bajo costo frente a materiales convencionales. (Lehmann & Joseph, 2015).

Valor agregado: promueve economía circular al aprovechar residuos agrícolas de la región.

5.3. ENERGÍA RENOVABLE PARA EL SISTEMA

- Instalar paneles solares para alimentar bombas y equipos de monitoreo.
- Reducir la dependencia de energía convencional y los costos operativos.
- Posicionar el proyecto como un modelo de minería sostenible con baja huella de carbono. (UNEP, 2021).

5.4. MODELO DE GOBERNANZA COMUNITARIA

- Crear un comité comunitario de seguimiento ambiental con participación de agricultores y ganaderos locales.
- Capacitación en operación básica de humedales y monitoreo participativo.
- Generar confianza y legitimidad social en torno al proyecto.

Valor agregado: fortalece la relación institucional y social, disminuye conflictos y aumenta la aceptación del sistema.

5.5. ESCALABILIDAD Y REPLICABILIDAD

- Documentar el proceso piloto en un manual técnico digital con protocolos de diseño, operación y mantenimiento.
- Publicar resultados en repositorios académicos y técnicos para que otras minas de Boyacá puedan replicar el modelo.
- Posicionar a Winkita S.A.S como referente en innovación ambiental minera.

5.6. SÍNTESIS CON SIG

- Integra la información técnica y comunitaria en mapas dinámicos.
- Facilita la gestión territorial del proyecto, mostrando cómo las descargas afectan la quebrada Baracuta y qué zonas requieren mayor atención.
- Apoya la toma de decisiones estratégicas, tanto para la empresa como para la autoridad ambiental.
- Genera un insumo visual poderoso para la comunicación con la comunidad y para auditorías ambientales. (Esri, 2020; Li & Heap, 2014).

5.7. IMPACTO ESPERADO

- **Ambiental:** reducción más eficiente de metales pesados y mejora de la calidad del agua en la Quebrada Baracuta.
- **Social:** mayor confianza de la comunidad y disminución de conflictos.
- **Institucional:** cumplimiento normativo con trazabilidad digital y fortalecimiento de la relación con Corpoboyacá.

- **Económico:** disminución de costos operativos a largo plazo gracias a energías renovables y materiales locales.

La propuesta innovadora no reemplaza el sistema base, sino que lo potencia con herramientas digitales, materiales sostenibles, energías renovables y participación comunitaria. Esto asegura un impacto ambiental más robusto, legitimidad social y eficiencia económica, alineando el proyecto con tendencias de minería verde y trazabilidad inteligente.

5.8. MATRIZ COMPARATIVA: SISTEMA BASE VS. PROPUESTA DE INNOVACIÓN.

Componente	Sistema Base (Documento)	Propuesta de Innovación	Valor Agregado
Monitoreo y trazabilidad	Medición periódica y en campo y laboratorio, con informes técnicos.	Sensores IoT + dashboard interactivo para monitoreo en tiempo real.	Mayor trazabilidad normativa, alertas tempranas y reducción de riesgos de incumplimiento.
Materiales de tratamiento	Caliza, material orgánico y humedales construidos de flujo vertical.	Inclusión de biochar como medio filtrante en humedales.	Mejora la retención de metales pesados, promueve economía circular con residuos agrícolas locales.
Energía para operación	Dependencia de energía convencional para bombeo y equipos.	Incorporación de paneles solares para alimentar bombas y sensores.	Reducción de costos operativos y huella de carbono, posicionando el proyecto como minería sostenible.
Gestión comunitaria	Relación institucional con Corpoboyacá y cumplimiento normativo.	Creación de un comité comunitario de seguimiento ambiental con agricultores y ganaderos.	Fortalece confianza social, disminuye conflictos y legitima el proyecto en la comunidad.
Escalabilidad y replicabilidad	Documento técnico con especificaciones preliminares y piloto a escala.	Elaboración de manual técnico digital con protocolos replicables y publicación de resultados.	Facilita replicar el modelo en otras minas de Boyacá, posicionando a Winkita S.A.S como referente.
Cumplimiento normativo	Resolución 0631 de 2015 y Decreto 1076 de 2015 como marco regulatorio.	Integración digital que permite evidenciar cumplimiento en tiempo real y compartir datos con autoridades.	Simplifica auditorías y fortalece la relación institucional con Corpoboyacá.

Componente	Sistema Base (Documento)	Propuesta de Innovación	Valor Agregado
SIG aplicado al proyecto	No se contempla uso de herramientas geoespaciales.	Implementación de SIG para cartografía ambiental, mapeo de puntos críticos de vertimiento, modelación de flujos hídricos y análisis de riesgo espacial.	Permite visualizar impactos en la microcuenca, priorizar zonas de intervención, optimizar ubicación de humedales y fortalecer la trazabilidad espacial del proyecto.

La incorporación de biochar como medio filtrante en los humedales construidos representa una innovación clave en el sistema integral de tratamiento. Este material, obtenido de residuos agrícolas locales, ha demostrado mejorar la retención de metales pesados y favorecer la actividad microbiana, lo que potencia la eficiencia del tratamiento pasivo (Lehmann & Joseph, 2015). Además, su uso promueve la economía circular en la región, integrando prácticas sostenibles con beneficios ambientales y sociales.

Por otro lado, la implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite visualizar espacialmente los puntos críticos de vertimiento y modelar los flujos hídricos en la microcuenca de la Quebrada Baracuta. Esta herramienta facilita la priorización de zonas de intervención y fortalece la trazabilidad espacial del proyecto, generando insumos visuales para la toma de decisiones y la comunicación con la comunidad (Esri, 2020; Li & Heap, 2014). En este sentido, el SIG se convierte en un eje transversal de innovación, al integrar datos técnicos, normativos y sociales en mapas dinámicos que respaldan la gestión ambiental.

La combinación de estas dos innovaciones biochar y SIG, no solo mejora la eficiencia técnica del sistema, sino que también amplía su impacto institucional y comunitario. Mientras el biochar optimiza la depuración del agua, el SIG asegura que los resultados puedan ser monitoreados, auditados y replicados en otros contextos mineros de Boyacá, alineando el proyecto con tendencias de minería verde y trazabilidad inteligente (UNEP, 2021).

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Congreso de la República de Colombia. (2015). *Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible – Decreto 1076 de 2015*. Diario Oficial de la República de Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2024). *Análisis sectorial: Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. Informe de ejecución abril–junio 2024*. Dirección de Programación de Inversiones Públicas.
- Esri. (2020). *GIS for environmental management. Environmental Systems Research Institute*.
- García, J. C., & Rojas, M. A. (2020). Planificación y gestión de proyectos ambientales en Colombia: Retos y oportunidades. *Revista de Gestión Ambiental*, 22(1), 45–62.
- Herrera, L. F., & Martínez, P. (2018). Evaluación de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales mineras en Latinoamérica. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 20(2), 89–102.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781420012514> (doi.org in Bing).
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Li, R., & Heap, A. D. (2014). *Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. Environmental Modelling & Software*, 53, 173–189.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008> (doi.org in Bing)
- Minería Winita SAS. (2024). *Mision*. Sativanorte.
- Minería Winkita SAS. (2024). *Vision Minería winkita SAS*. Sativasur.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631 de 2015: Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público*. Diario Oficial de la República de Colombia.

Project Management Institute. (2021). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos* (7ª ed.). Project Management Institute.

Skousen, J., Ziemkiewicz, P. F., & McDonald, L. M. (2019). *Acid Mine Drainage Treatment with Anoxic Limestone Drains and Successive Alkalinity-Producing Systems*. *Mine Water and the Environment*, 38(2), 234–245. <https://doi.org/10.1007/s10230-018-00568-7> (doi.org in Bing)

UNEP. (2019). *Global resources outlook 2019: Natural resources for the future we want*. United Nations Environment Programme.

United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). *Renewable energy and sustainability in mining*. Nairobi, Kenya.

Vargas Osorio, L. M. (2019). *Análisis de las fuentes de financiación para la gestión ambiental en Colombia* [Tesis de maestría, Universidad de La Sabana]. Repositorio Institucional. <https://repository.upb.edu.co/server/api/core/bitstreams/ab2a4a47-fe90-4539-ba75-83dbbbc3c350/content>

Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0414-1> (doi.org in Bing)