UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

DISEÑO DE UN SISTEMA ECONÓMICAMENTE VIABLE DE CAPTACIÓN DE ESCORRENTÍAS PARA MITIGAR EL IMPACTO AMBIENTAL DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA EN UNA MINA SUPERFICIAL

Presentado por:

Bach. DANIEL EDSON COLQUE CALIZAYA

Para optar el título profesional de:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA - PERÚ

2025

UNAM
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

Folio N° 066

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : [X]

Trabajo de Suficiencia Profesional : [ ]

Otro: ..... : [ ]

II. Documento de aprobación para la sustentación:
RESOLUCION DE CONSEJO DE FACULTAD N° 199-2025-CF-FAIN-UNAM
Fecha: 17.10.25

III. El Jurado ha dictaminado la (el) TESIS, TITULADO:
DISEÑO DE UN SISTEMA ECONÓMICAMENTE VIABLE DE CAPTACION DE ESCORRENTÍAS PARA MITIGAR EL IMPACTO AMBIENTAL DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA EN UNA MINA SUPERFICIAL.

Bachiller: DANIEL EDSON COLQUE CALIZAYA

Asesor Principal: DR. ARQUÍMEDES LEON VARGAS LUQUE

Co-Asesor : .....

IV. Se dictamina:

Como: APROBADO por UNANIMIDAD la sustentación de manera:

Presencial [X] Virtual [ ]

Con nota: DIECISIETE (17) por lo que; Sí [X] No [ ]

Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las 12:10 horas, del 29 de OCTUBRE del año 2025 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
DR. JORGE LUIS FLOREZ SOLIS
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
Msc AGAPITO FLORES JUSTO
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
Dr. Christ Jesus Barriga Paria
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
Daniel Edson Colque Calizaya
(Nombres y Apellidos)

DEDICATORIA

A Dios,

Por permitir que llegue hasta este punto de mi vida, haberme dado salud y bendecir siempre mi camino.

A mis padres,

Por su cariño inagotable y por cada esfuerzo realizado para darme las oportunidades que no tuvieron ellos. Les agradezco profundamente las lecciones de esfuerzo y constancia. Este logro académico es también fruto de su apoyo, sin el cual hubiera sido muy difícil culminar esta etapa.

A mi esposa,

Nicole, mi compañera de vida, por su apoyo y ánimo que me brinda día a día para alcanzar mis metas, tanto profesionales como personales.

A mis docentes,

Por haberme acompañado en este desafiante recorrido académico, compartiendo sus conocimientos, los cuales fueron fundamentales en mi formación profesional.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi asesor de tesis, el Dr. Arquímedes Vargas, por su acompañamiento durante todo el proceso de investigación. Su experiencia, orientación y constante apoyo fueron determinantes para el desarrollo de este trabajo, así como su paciencia y motivación en los momentos de mayor dificultad.

A mi familia, en especial a mis padres, cuyo cariño y respaldo incondicional han sido la base de cada uno de mis logros. A mis hermanos, por sus palabras de ánimo, y a mi esposa, por su afecto y apoyo permanente, quienes con su compañía me dieron la fortaleza necesaria para culminar con éxito esta meta académica. Este logro les pertenece tanto como a mí.

A la Universidad Nacional de Moquegua, gracias por brindarme la oportunidad de crecer académica y profesionalmente. Mi gratitud también va a todo el personal docente y administrativo, cuyo compromiso y apoyo constante fueron determinantes para alcanzar la culminación de este trabajo de investigación.

A mis amigos y compañeros, quienes estuvieron presentes en los momentos de mayor exigencia y también en aquellos de satisfacción. Su amistad y respaldo me dieron la fortaleza necesaria para continuar y culminar esta etapa con éxito.

Finalmente, quiero manifestar mi gratitud al Ing. Raúl Veramendi, así como a los colegas y colaboradores que contribuyeron en diferentes etapas de la investigación. Su orientación, aportes técnicos y acompañamiento en la recopilación y análisis de la información enriquecieron significativamente este estudio. El presente trabajo refleja no solo un esfuerzo personal, sino también la valiosa colaboración de todos ellos.

A todos los mencionados, gracias por ser parte de esta importante etapa en mi vida.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación titulado “Diseño de un sistema económicamente viable de captación de escorrentías para mitigar el impacto ambiental de una cuenca hidrográfica en una mina superficial” aborda el problema de una empresa minera superficial con un depósito de desmonte antiguo, donde en su base afloran rocas con contenido de sulfuros que, al contacto con el agua y el oxígeno, generan aguas ácidas. Como objetivo principal se planteó diseñar un sistema de captación de escorrentías que permita prevenir y mitigar el impacto ambiental en la cuenca hidrográfica ubicada aguas abajo. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y nivel experimental observacional. El sistema propuesto incluye la construcción de cunetas, canales, pozas de captación con revestimiento de geosintéticos y la instalación de tuberías de HDPE. Asimismo, se realizó un análisis de costo-beneficio con la finalidad de determinar la viabilidad económica del proyecto. Los resultados muestran que el caudal de escorrentías contaminadas que ingresa a la cuenca disminuye significativamente tras la implementación del sistema, contribuyendo a la preservación de la calidad del agua y al equilibrio del ecosistema. En términos económicos, la inversión total del proyecto asciende a S/ 2’600,000, mientras que los costos por concepto de multas y remediación alcanzarían S/ 1’050,000 y S/ 6’200,000 respectivamente. Esto confirma que la implementación del sistema resulta más viable y sostenible que afrontar los costos derivados de la inacción. En conclusión, el sistema diseñado constituye una medida técnica, económica y ambientalmente viable para la mitigación del impacto de escorrentías en cuencas hidrográficas de minas superficiales, ofreciendo una metodología replicable en otros contextos de la minería peruana.

Palabras Clave: Escorrentías, mitigación, cuenca hidrográfica, mina superficial, geosintéticos.

ABSTRACT

This research work, titled “Design of an economically viable runoff collection system to mitigate the environmental impact of a watershed in a surface mine”, addresses the problem of a surface mining company with an old waste rock dump, where sulfide-bearing rocks at its base generate acid water when in contact with water and oxygen. The main objective was to design a runoff collection system to prevent and mitigate the environmental impact on the watershed located downstream. The study was carried out under a quantitative approach, applied research type, and experimental observational level. The proposed system includes the construction of ditches, channels, collection ponds lined with geosynthetics, and the installation of HDPE pipes. In addition, a cost-benefit analysis was conducted to determine the economic feasibility of the project. The results show that the volume of contaminated runoff entering the watershed decreases significantly after the implementation of the system, contributing to water quality preservation and ecosystem balance. From an economic perspective, the total investment of the project amounts to S/ 2’600,000, while the potential costs for fines and remediation would reach S/ 1’050,000 and S/ 6’200,000, respectively. This confirms that the implementation of the system is more viable and sustainable than assuming the expenses derived from inaction. In conclusion, the designed system constitutes a technically, economically, and environmentally viable measure for mitigating runoff impacts in watersheds affected by surface mining, providing a replicable methodology for other mining contexts in Peru.

Keywords: Runoff, mitigation, watershed, surface mine, geosynthetics.

ÍNDICE

Pág.

INTRODUCCIÓN 1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3
1.1. Descripción y formulación del problema 3
1.1.1. Interrogante general 3
1.1.2. Interrogantes específicas 3
1.2. Objetivos 3
1.2.1. Objetivo general 3
1.2.2. Objetivos específicos 4
1.3. Justificación e importancia 4
1.3.1. Justificación Teórica 4
1.3.2. Justificación Práctica 4
1.3.3. Justificación Metodológica 5
1.4. Hipótesis 5
1.4.1. Hipótesis general 5
1.4.2. Hipótesis específicas 5
1.5. Variables 6
1.5.1. Variable Independiente 6
1.5.2. Variables Dependientes 6
II. MARCO TEÓRICO 7
2.1. Antecedentes del problema 7
2.1.1. Antecedentes Internacionales 7
2.1.2. Antecedentes Nacionales 12
2.1.3. Antecedentes Locales 17
2.2. Bases teóricas 18
2.2.1. Geología Regional 18
2.2.2. Geología Local 19
2.2.3. Geología Económica 20
2.2.4. El agua en la Atmósfera 21
2.2.5. Escorrentía 21
2.2.6. Aguas de contacto y aguas ácidas 21
2.2.7. Administración del recurso hídrico 22
2.2.8. Cálculo de Caudal (Metodología Racional) 22
2.2.9. Drenaje Superficial 23
2.2.10. Obras de Drenaje Superficial 24

2.3. Definición de términos 27
III. METODOLOGÍA 29
3.1. Tipo y nivel de investigación 29
3.1.1. Diseño de investigación 29
3.2. Ámbito temporal y espacial 30
3.2.1. Ámbito temporal 30
3.2.2. Ámbito espacial 30
3.3. Población y muestra 31
3.4. Instrumentos 31
3.4.1. Validación y confiabilidad de los instrumentos 31
3.5. Procedimientos 32
3.5.1. Diseño y planeamiento 32
3.5.2. Construcción e Instalación 42
3.5.3. Costos 50
3.6. Análisis de datos 52
3.6.1. Diagrama de Ishikawa 52
3.6.2. Análisis de Pareto 54
3.6.3. Descripción de datos 56
3.6.4. Procesamiento de datos 56
3.6.5. Análisis estadístico 57
3.6.6. Interpretación 59
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 61
4.1. Escenario actual de la cuenca hidrográfica 61
4.2. Diseño y funcionamiento del sistema de captación de escorrentías 62
4.3. Escenario proyectado con implementación del sistema 65
4.4. Análisis costo-beneficio del proyecto 66
4.4.1. Comparación de Costos y Beneficios 68
4.5. Discusión de resultados 69
V. CONCLUSIONES 72
VI. RECOMENDACIONES 74
VII. REFERENCIAS 76
VIII. ANEXOS 81

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1: *Dimensiones mínimas de una cuneta* 25
Tabla 2: *Valor del Talud (z) según el tipo de material del canal* 26
Tabla 3: *Resultados del cálculo de caudal del sistema* 36
Tabla 4: *Requerimiento de personal y equipos* 40
Tabla 5: *Requerimiento de materiales* 41
Tabla 6: *Horas máquina por zonas de trabajo* 51
Tabla 7: *Horas hombre por zonas de trabajo* 51
Tabla 8: *Categorías para el análisis de Pareto* 54
Tabla 9: *Precipitación total anual* 57
Tabla 10: *Estadísticas generales* 58
Tabla 11: *Escenarios de eficiencia de captura y caudal residual proyectado* 65
Tabla 12: *Costos de remediación por tecnología empleada* 67
Tabla 13: *Comparación de costos y beneficios* 68

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1: *Sección Típica de Cuneta triangular* 25
Figura 2: *Talud (z) de un canal de sección trapezoidal* 26
Figura 3: *Sección 1-1', dirección de flujo y ubicación de poza 1* 33
Figura 4: *Sección 2-2', dirección de flujo y ubicación de poza 2* 34
Figura 5: *Sección 3-3', dirección de flujo y ubicación de poza 3* 34
Figura 6: *Área de la cuenca y zonas de trabajo* 35
Figura 7: *Equipos pesados requeridos* 40
Figura 8: *Materiales requeridos* 42
Figura 9: *Construcción de accesos con tractor de orugas* 43
Figura 10: *Construcción de pozas con excavadora* 43
Figura 11: *Construcción de cunetas con excavadora* 44
Figura 12: *Construcción de canal con excavadora* 45
Figura 13: *Máquina de termofusión, pistola de calor y máquina extrusora* 45
Figura 14: *Instalación de geosintéticos con excavadora* 46
Figura 15: *Soldado de geomembrana con máquina de termofusión* 46
Figura 16: *Soldado de tuberías de HDPE con máquina de termofusión* 47
Figura 17: *Antes y después, trabajos en la zona 1* 48
Figura 18: *Antes y después, trabajos en la zona 2* 49
Figura 19: *Antes y después, trabajos en la zona 3* 50
Figura 20: *Análisis de Valor Ganado del proyecto* 52
Figura 21: *Diagrama de Ishikawa del proyecto* 53
Figura 22: *Diagrama de Pareto* 55
Figura 23: *Gráfico de serie temporal de precipitación anual* 58
Figura 24: *Diagrama de caja de precipitación anual (Año 1 - Año 10)* 59
Figura 25: *Diagrama de flujo del sistema de captación de escorrentías* 64

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

HDPE : Polietileno de Alta Densidad.

INGEMMET : Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

MTC : Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

OEFA : Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental.

PH : Es el potencial de hidrógeno e indica la acidez o la alcalinidad del agua. Se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua. La escala es logarítmica con valores de 0 a 14.

SENAMHI : Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

INTRODUCCIÓN

La minería a cielo abierto se basa en la explotación de recursos no renovables encontrados bajo la corteza terrestre a poca profundidad y que implica excavar un tajo en la superficie para acceder a estos recursos. En esta industria, como consecuencia de muchas de sus actividades, se originan impactos ambientales en el agua, suelo y aire. El impacto en una cuenca hidrográfica afecta la calidad del agua, el ecosistema, la disponibilidad hídrica y la biodiversidad. Este impacto puede ser negativo, causando contaminación, erosión, pérdida de hábitats y escasez de agua.

Para la extracción de los recursos minerales se extrae también material estéril o con contenido mineral menor al de la ley de corte, el cual se almacena en depósitos de desmonte estratégicamente ubicados. La incorrecta ubicación de estos depósitos podría generar futuros impactos ambientales en alguna cuenca hidrográfica, por infiltración de escorrentías. Si la ubicación no fue correctamente planificada y existe riesgo de impacto ambiental a una cuenca hidrográfica cercana, se procede con la planificación y construcción de un sistema de captación de escorrentías.

Un sistema de captación de escorrentías tiene como objetivo captar las escorrentías producto de precipitaciones que tuvieron contacto con material estéril o con contenido mineral menor al de la ley de corte, que puedan llegar al cauce de un río, lago o acuífero; y de esta manera evitar la contaminación del agua. El diseño de un sistema de captación de escorrentías puede incluir la construcción de cunetas, canales, pozas de captación con revestimiento de geomembranas e instalación de tuberías de HDPE.

Los costos de una multa por contaminación ambiental varían según la gravedad de la infracción y el tipo de contaminante. En general, estas multas además de los costos por remediación pueden ser significativamente altos. Bajo esta premisa, se justifica la inversión para el diseño y construcción de un sistema de captación de escorrentías, y de esta manera, prevenir el impacto ambiental en una cuenca hidrográfica. Para sustentar el gasto por la implementación de este proyecto, se requiere un análisis de viabilidad económica.

En la mina superficial del presente estudio, se tiene un depósito de desmonte antiguo, donde en su base aflora parte del pórfido Quellaveco, el cual contiene pirita y calcopirita, minerales del grupo de sulfuros que al contacto con el

oxígeno y el agua se generan aguas ácidas que pueden contaminar una cuenca hidrográfica cercana. Las precipitaciones de la zona generan escorrentías con aguas de contacto, las cuales desembocan en una cuenca hidrográfica ubicada aguas abajo del desarrollo de las actividades de esta mina superficial. Como medida preventiva se busca diseñar un sistema económicamente viable para la captación de estas escorrentías; y de esta manera, mitigar el impacto ambiental producido en la cuenca hidrográfica.

Para el marco teórico se tomaron como referencia antecedentes internacionales, nacionales y locales. Se obtuvo información sobre la geología regional, local y económica de la zona. Se tomaron en cuenta conceptos relevantes sobre el recurso hídrico, escorrentías, aguas de contacto, aguas ácidas y drenajes naturales. Además, se muestra el diseño de distintas obras de drenaje superficial, como cunetas, canales y pozas de captación con revestimiento de geosintéticos.

El presente estudio es de enfoque cuantitativo, el diseño es experimental y el tipo de investigación es aplicada. El nivel de investigación es observacional experimental, pues se describe el problema observado y se busca dar solución a este problema con el diseño de un sistema de captación de escorrentías, a través de la construcción de cunetas, canales y pozas con revestimiento y tendido de tuberías, y de esta manera mitigar el impacto ambiental producido en una cuenca hidrográfica.

El procedimiento para la construcción del proyecto implica primero la visita a la zona de interés para una inspección visual del terreno e identificación de zonas críticas donde se evidencie mayor generación de escorrentías en temporada de lluvia; luego, se procede con el trabajo preliminar de campo que es el levantamiento topográfico de la zona de interés. Una vez realizada la inspección visual en campo y el levantamiento topográfico se elabora el plan de trabajo y el cronograma de actividades a realizar, esto implica, el equipo y herramientas, personal necesario, materiales necesarios. Finalmente, se procede con la ejecución del proyecto, que consiste en trabajos de movimiento de tierras, instalación de geosintéticos e instalación de tuberías.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción y formulación del problema

En una empresa minera superficial, se tiene un depósito de desmonte antiguo, donde en su base aflora parte del pórfido Quellaveco correspondiente a la unidad estratigráfica del Volcánico Quellaveco del Grupo Toquepala, el cual contiene pirita y calcopirita, minerales del grupo de sulfuros que al contacto con el oxígeno y el agua se generan aguas ácidas que pueden contaminar las aguas superficiales y subterráneas. Ante la presencia de lluvias, se generan escorrentías con aguas de contacto, las cuales desembocan en una cuenca hidrográfica ubicada aguas abajo del desarrollo de las actividades de esta empresa minera superficial. Como medida preventiva se busca diseñar un sistema económicamente viable para la captación de estas escorrentías; y de esta manera, mitigar el impacto ambiental producido en la cuenca hidrográfica.

1.1.1. Interrogante general

- ¿Cómo diseñar un sistema de captación de escorrentías que mitigue el impacto ambiental de una cuenca hidrográfica en una mina superficial?

1.1.2. Interrogantes específicas

- ¿Qué beneficios ambientales y económicos podrían registrarse al diseñar un sistema de captación de escorrentías en una mina superficial?

- ¿Cuál es la metodología que se debe aplicar para del diseño de un sistema de captación de escorrentías en una mina superficial?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Diseñar un sistema de captación de escorrentías que mitigue el impacto ambiental de una cuenca hidrográfica en una mina superficial.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar los beneficios ambientales y económicos asociados al diseño de un sistema de captación de escorrentías en una mina superficial.

- Proponer una metodología viable para el diseño de un sistema de captación de escorrentías en una mina superficial.

1.3. Justificación e importancia

1.3.1. Justificación Teórica

En la actividad minera superficial, como parte de la misma operación y desarrollo del tajo se exponen rocas con minerales que contienen sulfuros que según su contenido de mineral de mena se destinan al procesamiento para su posterior aprovechamiento y venta o se destinan a depósitos de desmonte si su contenido de mineral de mena es menor a la ley de corte de esa unidad minera. Los depósitos de desmonte permanecen durante toda la vida de la mina, por lo que a través de los años aun contienen, aunque en un valor mínimo, un porcentaje de mineral de mena. El material con contenido de sulfuros al contacto con el agua y el oxígeno genera aguas ácidas, las cuales requieren ser captadas para evitar su contacto con cualquier cuenca hidrográfica cercana. A nivel nacional se cuenta con información limitada con respecto al diseño de sistemas de captación de escorrentías con contenido de aguas ácidas en una mina superficial, la mayor parte de estudios están enfocados en el campo civil para agua de uso doméstico o tratamiento de aguas ácidas en minas subterráneas. Se cuentan con antecedentes con variables de investigación similares al presente estudio; sin embargo, dichos estudios no fueron realizados en la región Moquegua, por lo que es necesario realizar el presente estudio.

1.3.2. Justificación Práctica

Las aguas ácidas que se generan por el contacto de minerales sulfuros con el oxígeno y el agua son nocivas para el medio ambiente, ya que la acidificación de las aguas superficiales disminuye la población de animales acuáticos, así como la diversidad de la fauna; también afecta a las plantas acuáticas impactando negativamente a todo el ecosistema. En el presente

estudio se busca diseñar un sistema de captación de escorrentías que contengan aguas ácidas, compuesto de pozas y canales con revestimiento, cunetas y tuberías de HDPE para direccionar estas aguas a pozas gigantes de colección, de las cuales posteriormente aprovecharlas para mitigar la polución en la actividad operativa de la mina superficial; y de esta manera, con la implementación de este sistema, mitigar el impacto que se puede producir en las aguas superficiales de la cuenca hidrográfica en cuestión.

1.3.3. Justificación Metodológica

Para la actividad minera no existe una metodología, como tal, para el diseño de un sistema de colección de escorrentías como medida de prevención, por lo que para el presente proyecto se utilizó como referencia estudios enfocados en el ámbito civil que fueron modificados para el ámbito minero, bajo las normas vigentes de seguridad y medio ambiente. La mayor parte de antecedentes tienen un enfoque civil y muy pocos un enfoque minero, por lo que el presente estudio busca proponer metodologías para el diseño de un sistema de captación de escorrentías enfocadas en un ambiente minero, empezando con la elaboración de un plan de trabajo, levantamiento topográfico, movimiento de tierras, instalación de geosintéticos y tuberías de HDPE; y finalmente la puesta en marcha del sistema.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

- Un sistema de captación de escorrentías puede mitigar el impacto ambiental de una cuenca hidrográfica en una mina superficial.

1.4.2. Hipótesis específicas

- Un sistema económicamente viable de captación de escorrentías permite reducir el caudal de aguas de contacto que ingresan a una cuenca hidrográfica.

- Una metodología que consiste en la construcción de pozas y canales con revestimiento, además de la instalación de tuberías para la captación de escorrentías es el adecuado para mitigar el impacto ambiental de una cuenca hidrográfica.

1.5. Variables

1.5.1. Variable Independiente

Para el presente estudio, la variable independiente es el diseño de un sistema de captación de escorrentías, ya que es la variable causal que influye en las demás variables. Sus dimensiones están definidas por el diseño, planeamiento y ejecución del proyecto. El diseño y planeamiento tiene como indicadores los planos topográficos, planos de diseño y el plan de trabajo, cuyo instrumento de medición son los drones, software AutoCAD, MinePlan y cronograma de actividades. La construcción del sistema de captación de escorrentías tiene como indicadores el movimiento de tierras, instalación de geosintéticos e instalación de tuberías, cuyo instrumento de medición son los equipos auxiliares, horas máquina y equipos de termofusión.

1.5.2. Variables Dependientes

La primera variable dependiente es el impacto ambiental en una cuenca hidrográfica, ya que depende de la efectividad y correcto funcionamiento del sistema de captación de escorrentías. Sus dimensiones están definidas por las escorrentías que ingresan al cauce del río antes y después de la construcción del sistema de colección de escorrentías. Los indicadores están definidos por el caudal de escorrentías cuyo instrumento de medición es el cálculo de caudal (fórmula racional) de la Ecuación 1 y la fórmula de caudal residual (Chow, 1988) de la Ecuación 3.

La segunda variable dependiente es la viabilidad económica del proyecto, ya que depende del costo que genere el desarrollo del proyecto. Sus dimensiones están definidas por el costo total del proyecto, las multas que se pueden generar por contaminación de las aguas de la cuenca hidrográfica emitida por el OEFA y los costos de remediación. Los indicadores e instrumentos están definidos por el costo de equipos, materiales y horas hombre, además del costo de las multas y remediación cuyo instrumento de medición es el análisis costo-beneficio del proyecto.

La matriz de operacionalización de variables, describiendo las variables, sus dimensiones, indicadores e instrumentos, se muestra en el Anexo 2.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Antecedentes Internacionales

Luna (2023) Diseño de Investigación para la propuesta de un sistema de captación, tratamiento, y reutilización de aguas especiales en una industria de producción de concreto, Guatemala. El estudio referido desarrolla la propuesta de un sistema destinado a la captación, tratamiento y reutilización de las aguas residuales generadas en la industria del concreto premezclado. Para ello se establece una base teórica que define las aguas residuales como aquellas que han experimentado alteraciones en sus características físicas y químicas a consecuencia de los procesos industriales. En el caso específico de la producción de concreto, el agua constituye una de las materias primas esenciales y, tras ser empleada en las distintas etapas de elaboración, sufre cambios que requieren tratamiento posterior. El objetivo principal de la investigación fue diseñar un sistema que capte las aguas residuales producidas, tratarlas de manera que cumplan parámetros mínimos de calidad y reincorporarlas nuevamente en el proceso productivo. Asimismo, se identificaron los parámetros técnicos necesarios para garantizar que el agua tratada pueda ser reutilizada en la fabricación de concreto, contribuyendo de este modo a la sostenibilidad del recurso hídrico en la industria.

Torres (2019) La captación del agua de lluvia como solución en el pasado y el presente, Cuba. El estudio citado tuvo como propósito principal recopilar y analizar la bibliografía disponible sobre las tecnologías de captación de agua de lluvia implementadas en distintos periodos históricos y regiones del mundo. La motivación radica en la creciente necesidad de aplicar estas técnicas en un contexto de uso más eficiente de los recursos hídricos. La investigación se estructuró en dos fases: una que abarca los avances previos al siglo XX y otra correspondiente al periodo posterior, considerando además un análisis específico de las experiencias desarrolladas en Cuba de manera independiente al resto de los casos internacionales. Los resultados evidencian que la evolución tecnológica no solo se refleja en la diversidad de métodos aplicados, sino también en la creciente frecuencia con que el agua de lluvia ha sido aprovechada como recurso alternativo.

Avelar et al. (2019) Validación de un prototipo de sistema captación de agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano, México. La investigación tuvo como finalidad evaluar un prototipo de sistema de captación de agua de lluvia desarrollado en el Laboratorio de Tecnologías Hídricas Innovadoras de la Universidad Autónoma Chapingo. La validación se centró en tres aspectos principales: el diseño del sistema, el empleo de ferrocemento como material de construcción de la cisterna y el modelo de trabajo conjunto entre la universidad y los usuarios. Los resultados confirmaron que el diseño fue apropiado para abastecer agua destinada tanto al uso doméstico como al consumo humano. Asimismo, se comprobó que el ferrocemento cumplió satisfactoriamente en términos de resistencia y desempeño, mientras que la participación directa de los beneficiarios en la construcción favoreció la rápida aceptación de la tecnología.

Pérez (2019) Diseño de sistemas de recolección de agua lluvia, una apuesta por la conservación, Colombia. El estudio tuvo como propósito diseñar sistemas de recolección de agua de lluvia aplicables a municipios de Cundinamarca, con el fin de evaluar su funcionamiento y capacidad hidráulica. Se trató de una investigación de enfoque cuantitativo orientada a analizar variables climatológicas, caudales y el desempeño operativo del sistema. Los resultados mostraron que los sistemas prefabricados disponibles en el mercado nacional tienen la capacidad de manejar los volúmenes de agua captados en las zonas evaluadas. Además, se presentó una propuesta de diseño que incorpora materiales reciclados en la construcción de los sistemas de captación, iniciativa surgida en el semillero de investigación, que abre la posibilidad de implementar proyectos orientados a mejorar la calidad del agua obtenida.

Mongui y Sánchez (2018) Determinación de alternativas para el manejo de aguas residuales de la mina didáctica ubicada en el centro minero - Sena Regional Boyacá, Colombia. Los drenajes de mina (DAM) se producen por la interacción entre los minerales presentes en los yacimientos y las aguas superficiales, siendo su composición, resultado de las características fisicoquímicas tanto del agua como de los minerales involucrados. En la explotación de carbón, este proceso suele dar lugar a drenajes ácidos con valores bajos de pH y altas concentraciones de iones metálicos inorgánicos y sulfatos, compuestos nocivos para la actividad biológica y que, además,

generan olores desagradables. Esta problemática ha motivado que las autoridades ambientales fortalezcan la regulación de las cargas contaminantes en el agua mediante un marco normativo más estricto, lo que, junto con el análisis de opciones de tratamiento, constituyó la base del estudio referido. Dentro de las alternativas disponibles para el tratamiento de DAM, los sistemas de tratamiento pasivo (STP) fueron el objeto central de investigación. Estos sistemas reproducen procesos fisicoquímicos y biológicos similares a los que ocurren en humedales naturales, donde el metabolismo de las plantas facilita la remoción de contaminantes presentes en el drenaje. La elección de especies vegetales se basó en criterios geográficos que favorecieran su adaptación y crecimiento, considerando además su disponibilidad y facilidad de aclimatación. En la experiencia reportada, se emplearon especies como Juncus y Myriophyllum aquaticum, reconocidas por su capacidad de biorremediación. Sin embargo, debido a la falta de adaptación de Juncus a las condiciones de la mina, esta especie no se utilizó finalmente, siendo reemplazada por un humedal con grava, utilizado como sistema de control.

Zamora y Trujillo (2016) Viabilidad del tratamiento de las aguas ácidas de la mina San José - Oruro, Bolivia. La mina San José se localiza en Oruro, Bolivia, y genera aguas ácidas con valores de pH extremadamente bajos, entre 1.2 y 2.5. Dichos efluentes son bombeados a un caudal de 8 l/s y, sin recibir tratamiento, son descargados directamente al ambiente, desembocando finalmente en el lago Urú-Urú. Estas aguas presentan una carga anual considerable de metales disueltos, que incluye aproximadamente 1 tonelada de Cd, 11 de Cu, 761 de Fe, 14 de Pb, 13 de As, 0.3 de Sb y 22 de Zn. El objetivo de la investigación fue evaluar, desde una perspectiva técnica, económica, ambiental y social, diferentes alternativas de tratamiento mediante pruebas a escala de laboratorio y planta piloto. Entre las opciones analizadas se incluyeron: evaporación-cristalización, neutralización-precipitación con cal en superficie, drenes de caliza anóxicos y neutralización-precipitación con cal en interior de mina. Los resultados de la evaluación integral determinaron que la última alternativa representaba la solución más adecuada. Los lodos generados en el proceso fueron finalmente dispuestos en rajos abandonados ubicados a unos 150 metros del estanque de descarga del sistema de tratamiento. El proyecto contempló una inversión inicial de

USD 282,686.01 y costos operativos anuales de alrededor de USD 383,918.32.

Nieto, Macías y Ayora (2015) Tratamiento Ecológico de Drenajes Ácidos de Mina: Proyecto LIFE-ETAD, España. La cuenca del río Odiel, situada en la provincia de Huelva, constituye uno de los casos más representativos a nivel mundial de contaminación fluvial por drenaje ácido de mina (AMD). Esta problemática se relaciona con la deficiente gestión histórica de las explotaciones mineras localizadas en la zona media y alta de la cuenca, actualmente en condición de abandono. Con el inicio de la construcción del embalse de Alcolea, diseñado para almacenar aguas ácidas, y en cumplimiento de la normativa europea de calidad del agua, surge la necesidad de implementar soluciones técnicas que contribuyan a mejorar la calidad del río Odiel. Dada la gran cantidad de focos de AMD distribuidos en la cuenca, dichas soluciones deben responder a criterios de sostenibilidad económica y ambiental. En este marco, las tecnologías de tratamiento pasivo se presentan como alternativas viables para abordar la contaminación existente.

Sgier et al. (2015) Diseño de una planta piloto para el tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina, España. La contaminación del agua, el suelo y el aire derivada de las actividades humanas constituye uno de los principales desafíos ambientales de la sociedad contemporánea. Entre estas problemáticas, el drenaje ácido de mina se considera una de las formas más severas de afectación a los recursos hídricos superficiales y subterráneos, debido a su magnitud, características y la dificultad de encontrar soluciones efectivas. Un ejemplo representativo de este fenómeno se encuentra en la Faja Pirítica Ibérica, ubicada en el suroeste de la Península Ibérica, reconocida como una de las provincias metalogénicas de sulfuros masivos más importantes del mundo. Frente a esta situación, la investigación referida planteó como objetivo desarrollar un conjunto de criterios para el diseño de una planta de tratamiento pasivo de aguas ácidas de mina a escala real, utilizando la tecnología DAS en un vertido asociado a la mina Monte Romero (Almonaster la Real, Huelva). La propuesta busca contribuir a la recuperación ambiental del arroyo Monte Romero, el cual desemboca en el embalse de Olivargas, en la parte alta de la cuenca del río Odiel.

Vega, Villaseca y Contreras (2015) Evaluación de la calidad y propuesta de tratamiento del agua proveniente de la mina “Dos Carlos” en

Pachuca, Hidalgo, México. La gestión adecuada de los recursos hídricos es un componente esencial en las operaciones mineras, debido al riesgo de contaminación del agua y sus posibles repercusiones en la salud humana y en el medio ambiente. Dado que el agua constituye un recurso vital y al mismo tiempo una herramienta indispensable para las actividades extractivas, se vuelve prioritario garantizar el suministro de agua limpia y potable, así como establecer procesos de tratamiento que permitan su reutilización en beneficio de las poblaciones cercanas. En este contexto, la investigación referida se enfocó en el diseño de una planta potabilizadora que incorpora diversas etapas de tratamiento orientadas a alcanzar la calidad requerida del efluente. Entre los equipos contemplados en el diseño se incluyen filtros, desarenadores y sistemas de ósmosis inversa, entre otros. El propósito central del estudio fue plantear una solución tecnológica para el aprovechamiento del agua generada en la actividad minera, mediante la implementación de un tren de tratamiento que garantice condiciones adecuadas para su reutilización.

Oregón y Mora (2013) Propuesta de un sistema de captación de aguas ácidas de drenaje mina, asociadas a las faenas mineras de CODELCO Chile, División El Teniente, Sexta Región Chile. Las actividades mineras, a lo largo del tiempo, han generado impactos significativos sobre el medio ambiente y la salud de las comunidades cercanas. En sus inicios, las empresas solían limitarse a pagar multas y asumir ciertos costos de remediación por los efectos negativos de sus operaciones. Sin embargo, con el desarrollo tecnológico y la incorporación de nuevas prácticas de gestión, la industria ha logrado reducir progresivamente dichos impactos. Pese a estos avances, la mayoría de las faenas mineras siguen enfrentando la generación de drenajes ácidos, producto tanto del deshielo superficial como de las filtraciones de aguas subterráneas a través de la roca fracturada. Si estas aguas no son captadas, conducidas y tratadas adecuadamente, se convierten en una fuente de contaminación de napas freáticas y cuerpos de agua superficial. No obstante, es importante reconocer que también representan un recurso hídrico potencial que puede aprovecharse dentro de los mismos procesos productivos. En este marco, la investigación citada evaluó la factibilidad económica y ambiental de implementar una propuesta de mejora en el tratamiento de aguas ácidas en la División El Teniente de Codelco Chile, destacando la posibilidad de reutilizar dicho recurso como insumo para diversas etapas de la actividad minera.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

Llecllish y Diaz (2022) Técnicas de tratamiento de aguas ácidas generadas por la actividad minera, Trujillo. La generación de aguas ácidas en cuerpos hídricos se ha convertido en una problemática ambiental de gran relevancia, lo que ha impulsado el desarrollo de diversas tecnologías de tratamiento. En este contexto, la investigación revisada tuvo como propósito analizar y evaluar las técnicas existentes para el manejo de efluentes ácidos provenientes de la actividad minera. Se trató de un estudio básico, de tipo descriptivo, con diseño no experimental, enmarcado en una revisión sistemática de la literatura. Para ello se seleccionaron 38 artículos de bases de datos como Scielo, ResearchGate, Dialnet, ScienceDirect y Redalyc, aplicando criterios de inclusión previamente definidos. Los resultados evidenciaron que tanto las barreras aislantes como los sistemas de biorreactores pueden alcanzar hasta un 90 % de remoción de acidez en aguas ácidas de mina. Asimismo, se concluyó que los métodos biológicos presentan mayor eficiencia frente a los tratamientos químicos, debido a que generan menores volúmenes de lodos y subproductos indeseables. Entre las alternativas biológicas más efectivas se identificaron el uso de biorreactores y el compost de champiñón.

Ampuero y Barboza (2020) Propuesta de tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM) de la bocamina prosperidad con el método óxico calizo para cumplir con los límites máximos permisibles de descarga de efluentes, Cajamarca. La generación de aguas ácidas de mina es un problema comúnmente asociado a la actividad minera y, de no ser tratadas adecuadamente, pueden ocasionar impactos ambientales significativos. La investigación revisada abordó tanto los procesos que dan origen a este tipo de efluentes como las alternativas disponibles para su tratamiento, con especial énfasis en los sistemas pasivos, considerados adecuados por su bajo costo de implementación y mantenimiento. Estos sistemas integran mecanismos naturales de tipo físico, químico y biológico que permiten la remoción de contaminantes de manera eficiente. En la fase experimental inicial se realizaron ensayos en laboratorio para reproducir las condiciones de diferentes configuraciones de sistemas pasivos, de manera independiente y combinada, con el objetivo de comprender mejor los procesos involucrados e identificar las variables más apropiadas para el tratamiento de distintos tipos

de aguas de mina. A partir de estos resultados, se diseñó y construyó un sistema mixto de tratamiento pasivo a escala piloto, en el cual se ajustaron de forma progresiva los parámetros operativos durante su construcción y monitoreo para optimizar su desempeño. La propuesta se orientó específicamente a la neutralización fisicoquímica de las aguas ácidas generadas en la bocamina Prosperidad, ubicada en Hualgayoc, tras un proceso previo de caracterización química.

Quispe (2020) Diseño y conformación del revestimiento con geosintéticos de una poza para almacenamiento de aguas en exceso en una empresa a tajo abierto en Cajamarca. El estudio analizado tuvo como finalidad establecer el diseño y la estructura del revestimiento con geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) para una poza destinada al almacenamiento de aguas excedentes. La metodología se enmarcó en un enfoque aplicado de tipo cuasiexperimental. La unidad de análisis fue la conformación general de la poza, considerando de manera independiente cada una de las capas de revestimiento: acondicionamiento, secundaria, de resistencia, primaria y el extruido de detalle. El procedimiento inició con la evaluación del terreno, tomando en cuenta la cantidad estimada de agua a almacenar. Posteriormente se abordaron aspectos técnicos relacionados con la instalación, soldadura, refuerzo, extruido, fusión y control de calidad. Como resultado, se concluyó que el diseño óptimo de la poza contempla una conformación de cuatro capas de geomembrana, además de incluir zonas específicas como zanjas de anclaje, revestimiento compacto hacia la tubería de alimentación, zona de succión (ZAN) y poza de bombas.

Sánchez y Ulloque (2020) Impacto del diseño de botadero en el almacenamiento de material de baja ley en una mina a tajo abierto, Cajamarca. La investigación tuvo como propósito diseñar un botadero destinado al almacenamiento de material de baja ley en una operación minera a tajo abierto. Para este fin, se consideraron los criterios de calidad de los relaves, entre los que destacan un pH cercano a 7.0, bajos niveles de sulfatos (<50 mg/l), concentraciones de arsénico entre 0.01 y 0.02 mg/l, y concentraciones de cobre en el rango de 0.01 a 0.02 mg/l, valores comparables con los observados en sistemas de aguas subterráneas naturales. El análisis de las muestras de relaves mostró mayores valores de ANP y menores de AGP en comparación con los de Perol. Asimismo, se

registró un contenido de carbono total entre 0.27 y 0.57%, un ANP entre 0.84 y 1.7 % CO_2, y concentraciones de azufre total que varían entre 0.02 y 0.58%. En cuanto al diseño de la poza de sedimentación, se proyectó una altura total aproximada de 220 m, desde la base hasta la cresta, con una cota final de 4,050 msnm en su parte superior. Los taludes del depósito fueron diseñados con una pendiente de 2.5:1 (H:V) equivalente a 24.4°, conforme a los requisitos de rehabilitación. Finalmente, la superficie superior se diseñó con una inclinación mínima de 1% para facilitar el drenaje de aguas superficiales.

Terán (2020) Tratamiento de drenaje ácido de mina, por electrólisis para la remoción de plomo, Hualgayoc, Cajamarca. La investigación realizada en la mina Cerro Corona (Hualgayoc, Cajamarca) evaluó la influencia de la densidad de corriente y el tiempo de retención en la remoción de plomo presente en drenajes ácidos de mina. Para el estudio se recolectaron 20 litros de solución muestreada en distintos puntos del establecimiento minero, de los cuales se trabajó con volúmenes de 300 ml sometidos a diferentes condiciones: densidades de corriente de 10, 20 y 40 mA/cm² y tiempos de retención de 15, 30 y 60 minutos. Tras la ejecución de 30 ensayos experimentales, se alcanzó una remoción de hasta 97.55 % del plomo, reduciendo significativamente la toxicidad del efluente. Los resultados indicaron que, a 30 minutos y con una densidad de 40 mA/cm², la reducción alcanzó un 48.45 %, incrementándose conforme se prolongó el tiempo y la intensidad de la corriente, hasta llegar a una remoción máxima de 98.96 % con parámetros de 60 minutos y 40 mA/cm². El análisis ANVA confirmó que tanto el tiempo de retención como la densidad de corriente, de forma independiente y combinada, influyen significativamente en el proceso de electrólisis aplicado. Estos hallazgos respaldan la hipótesis planteada y evidencian que la técnica de electrólisis constituye una alternativa efectiva para disminuir la toxicidad del drenaje ácido de la mina Cerro Corona.

Mendoza (2019) Diseño Hidráulico del Sistema de Drenaje Pluvial de la Localidad de Sauce, Distrito de Sauce, Provincia de San Martín, Región San Martín. El estudio tuvo como finalidad plantear una solución integral a los problemas de inundaciones que afectan a la localidad de Sauce como consecuencia de precipitaciones pluviales extraordinarias. Para el desarrollo de la investigación se utilizó información topográfica proporcionada por la Municipalidad Distrital de Sauce y registros pluviométricos correspondientes

a un periodo de 25 años. Con base en los datos de caudal de diseño, pendiente y rugosidad, se calcularon las secciones geométricas de los colectores, considerando el flujo en función de los planos de curvas de nivel y los perfiles longitudinales de las calles. Finalmente, se proyectó que las aguas pluviales sean evacuadas a través de colectores principales hacia las quebradas existentes, evitando así su descarga directa en el lago Sauce.

Hernández (2018) Diseño del drenaje pluvial y evaluación de impacto ambiental en Urb. El Chilcal de la ciudad de Piura. La investigación tuvo como propósito diseñar un sistema de drenaje pluvial para la urbanización El Chilcal, en Piura, área seleccionada debido a su topografía en depresión que la hace altamente vulnerable a inundaciones durante eventos de lluvias intensas. El sistema propuesto busca recolectar, conducir y evacuar las aguas pluviales, para luego ser bombeadas mediante bombas de tornillo de Arquímedes. En el diseño se consideraron parámetros como la intensidad de precipitación en función del tiempo de concentración de cada tramo, los caudales de escorrentía calculados a través del método racional y los lineamientos establecidos en la Norma de Drenaje Pluvial Urbano (OS. 060), con el fin de garantizar una adecuada secuencia en las etapas de recolección, transporte y descarga de las aguas hacia el cuerpo receptor. El proyecto incluyó además la incorporación de rejillas transversales en la vía y tuberías para canalizar el flujo pluvial dentro de la urbanización. Finalmente, se evaluaron los beneficios ambientales y sociales de la propuesta, resaltando su contribución a la mitigación de riesgos de inundación en la comunidad.

Rodríguez (2018) Diseño de planta de tratamiento de aguas ácidas de mina con alto contenido de manganeso y zinc, Lima. En el Perú, la minería moderna incorpora la evaluación de impactos ambientales y la aplicación de medidas de prevención, mitigación y contingencia en las etapas de construcción, operación y cierre de mina. No obstante, la generación de aguas ácidas continúa siendo uno de los problemas ambientales más relevantes. Este fenómeno se origina por factores asociados a la complejidad geológica y mineralógica de los yacimientos, la presencia de pirita como mineral de ganga predominante, la coexistencia de sulfuros y la antigüedad de las operaciones metalúrgicas, entre otros. La identificación temprana de materiales potencialmente generadores de acidez y el diseño de planes adecuados de manejo de desechos resultan claves para disminuir los

impactos ambientales a largo plazo y reducir los costos de remediación. Asimismo, un diagnóstico oportuno y la aplicación de medidas de control contribuyen a la sostenibilidad de la actividad minera, tanto en el aspecto ambiental como financiero. En ese marco, la investigación se centró en el análisis de una muestra de agua ácida con altas concentraciones de manganeso y zinc. Se llevó a cabo una caracterización inicial de la misma y se evaluaron diversas alternativas de tratamiento orientadas a disminuir la presencia de dichos metales, con el propósito de mitigar sus efectos en el ambiente. Finalmente, se planteó el diseño de una planta de tratamiento de aguas ácidas que cumpla criterios de sostenibilidad técnica, económica y ambiental, destacando la importancia de priorizar medidas preventivas.

Ramírez (2013) Estudio técnico del tratamiento de aguas ácidas, Lima. En los procesos de tratamiento activo de aguas de mina resulta fundamental realizar un análisis químico previo, ya que este permite definir la estrategia más adecuada de acuerdo con el uso que se dará al agua tratada. En el caso referido, el procedimiento consistió en una serie de etapas sucesivas de neutralización y precipitación de metales. Inicialmente, el pH del agua, con un valor de 2.5, se elevó hasta 4 mediante la adición de hidróxido de calcio, lo que facilitó la precipitación del hierro en forma de hidróxido, posteriormente retirado por filtración. En una segunda etapa, el pH se incrementó hasta 7 para provocar la precipitación del cromo; luego se ajustó a 8.1 para separar el cobre (Cu^{2+}) y, finalmente, se llevó hasta 10.5 con el fin de remover iones como Zn^{2+}, Ni^{2+}, Pb^{2+} y Cd^{2+}. Tras la eliminación de la mayoría de los cationes en medio alcalino, fue necesario restablecer el pH a valores cercanos a la neutralidad.

Álvaro (2006) Tratamiento de drenaje ácido de mina en la Cía Minera Santa Luisa, Áncash. El drenaje ácido de mina constituye uno de los impactos más críticos que deben gestionar las empresas mineras y metalúrgicas, debido a la contaminación que puede generar en ríos, lagunas y otros ecosistemas acuáticos, tanto en el presente como a futuro. Este tipo de aguas se origina en las labores mineras y en los botaderos de desechos, producto de reacciones de óxido-reducción (REDOX) entre los sulfuros y el medio ambiente (oxígeno y agua). La exposición de minerales sulfurados al aire y a la lluvia provoca su oxidación, generando ácido sulfúrico y, en consecuencia, efluentes ácidos. Frente a esta problemática se identifican dos enfoques

principales de manejo ambiental. Los métodos activos corresponden al tratamiento inmediato de las aguas ácidas en plantas químicas mediante la adición de sustancias alcalinas, aunque su aplicación implica elevados costos operativos. Por otro lado, los métodos pasivos son considerados más relevantes, ya que se orientan a la prevención del drenaje ácido. Esto incluye la caracterización de materiales para determinar su potencial generador o neutralizador de acidez, así como el uso de técnicas de encapsulamiento para aislar los cuerpos minerales y evitar su contacto con oxígeno, agua y bacterias.

2.1.3. Antecedentes Locales

Cereceda et al. (2016) Fuentes naturales de drenaje ácido: cuenca del río Tambo (Puno-Moquegua). La zona de estudio está ubicada entre los departamentos de Puno y Moquegua. El estudio tuvo como propósito establecer la relación entre el pH de las aguas superficiales y el contenido de hierro total en las rocas, con el fin de identificar las litologías con mayor tendencia a generar aguas ácidas. Para ello se analizó el comportamiento del Fe_2O_3 tanto en las muestras de roca como en el agua, complementado con una caracterización hidroquímica de los principales componentes presentes en las aguas superficiales. Los resultados evidenciaron que las zonas con presencia de sulfuros están asociadas a mineralizaciones de alta y baja sulfuración, restringidas al este de la subcuenca de Ichuña y al sur del poblado homónimo. Se observó que las vetas y brechas hidrotermales con sulfuros, así como las areniscas atravesadas por venillas de goethita y hematita, presentan concentraciones elevadas de hierro. En el primer caso, la oxidación de los sulfuros en contacto con oxígeno y agua genera aguas ácidas; mientras que, en el segundo, la disolución de óxidos, hidróxidos, silicatos y carbonatos tiende a producir aguas alcalinas. En conclusión, la investigación determinó que la mineralogía es el factor determinante en la formación de aguas ácidas de origen geogénico. Las brechas hidrotermales con sulfuros, óxidos y cuarzo, las zonas de gossan y las areniscas con venillas de hematita y goethita presentan contenidos de Fe_2O_3 entre 15 y 90 %, confirmando que las reacciones de oxidación de sulfuros son las que controlan el pH del agua.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Geología Regional

Bellido (1979) en el Boletín N° 15: Geología del Cuadrángulo de Moquegua describe lo siguiente:

> Las unidades geomorfológicas que se diferencian en el área son: Llanura Costanera, Flanco Andino y Cadena de Conos Volcánicos. Estos rasgos se desarrollan a manera de fajas longitudinales con sus características propias relativas a altitud, relieve, clima, geología, etc. Las rocas más antiguas que afloran en el cuadrángulo son los volcánicos del Grupo Toquepala de edad Cretácea superior a Terciario inferior. Se divide en las siguientes formaciones: Quellaveco, Paralaque, Inogoya y Toquepala. A los volcánicos Toquepala sobreyace con fuerte discordancia los clásticos continentales de la formación Moquegua cuyo espesor varía de 550 a 600 m. La formación cubre la mayor extensión de la parte meridional del cuadrángulo y, se le ha dividido en dos miembros: Moquegua inferior de composición arcillo-arenosa y Moquegua superior areno-conglomerádica. En la columna geológica del área aparece la formación Huaylillas, compuesta principalmente de tufos riolíticos que sobreyacen con discordancia al Grupo Toquepala y la formación Moquegua. La formación Capillune, compuesta de conglomerados con intercalaciones de areniscas-tufáceas, sobreyace con discordancia a los tufos Huaylillas. La formación se considera del Plioceno superior y aflora en localidades muy restringidas dentro del cuadrángulo. A los clásticos Capillune se sobrepone el volcánico Barroso, compuesto principalmente de derrames andesíticos. El rasgo estructural más importante es el sistema de fallas Incapuquio, de orientación NO-SE. Estas fallas en cierta forma han controlado el emplazamiento de los cuerpos monzoníticos y dacíticos, así como la formación de las chimeneas de brecha, con las cuales se asocian los yacimientos de cobre de Toquepala, Quellaveco y Cuajone. En el cuadrángulo de Moquegua se encuentra la mina de Toquepala que es la mayor productora de cobre del país. Además, en el área quedan los yacimientos de cobre de Quellaveco y Cuajone. Los tres depósitos son

del tipo diseminado y sus reservas acumuladas superan los 1,200 millones de T.M. (pp 1-2)

2.2.2. Geología Local

Bellido (1979) en el Boletín N° 15: Geología del Cuadrángulo de Moquegua describe lo siguiente:

Grupo Toquepala

Consta de un conjunto de rocas volcánicas, con algunas intercalaciones de clásticos gruesos, que afloran a lo largo del Flanco Andino, desde los cerros La Caldera, en Arequipa, hasta la frontera con Chile. Las unidades superiores de este grupo están presentes en el área de la mina de Toquepala, Quellaveco y Cuajone. El grupo Toquepala se ha dividido, en las siguientes formaciones: Volcánico Quellaveco, Volcánico Paralaque, Formación Inogoya y Formación Toquepala.

Volcánico Quellaveco

En la parte central de este afloramiento se encuentra el depósito cuprífero de Quellaveco, de donde deriva el nombre de la formación. Los yacimentos de Cuajone y Toquepala se hallan dentro de la misma formación al NO y SE de Quellaveco, respectivamente. El Pórfido Quellaveco aflora en forma muy restringida en los alrededores de las minas Cuajone, Quellaveco y Toquepala: la Serie Toquepala es completamente local, incluye derrames de pórfido cuarcífero, andesitas y riolitas, y sólo aflora en una pequeña colina que se yergue al lado NO del tajo abierto de la mina de Toquepala; la Serie Alta comprende derrames y piroclásticos de andesita, riolitas, dacitas, etc. que afloran ampliamente en la faja arriba citada.

Pórfido Quellaveco

Es el miembro más bajo de la formación y aflora en la ladera sur, de la quebrada Asana, en el lugar del yacimiento de Quellaveco, de donde viene su nombre. La roca está compuesta por granos de cuarzo de forma redondeada hasta de 2 mm de sección y de ortosa blanca, englobados en una matriz fina, silícea de aspecto lechoso. El Pórfido

> Quellaveco también aflora en ambas laderas de la quebrada Chuntacala, (depósito de cobre de Cuajone). En este sector, la roca es de color blanco amarillento a gris blanquecino, macroscópicamente se reconoce granos redondeados de cuarzo de 2 a 4 mm de sección y feldespatos bastante alterados, englobados en una pasta silicosa muy fina. La roca parcialmente tiene aspecto brechoide por la presencia de manchas irregulares de color blanco verdoso o algo amarillento originadas por los feldespatos descompuestos, además superficialmente muestra fuerte pigmentación rojiza por manchas y puntos de limonita. Se han reconocido pequeños afloramientos de pórfidos riolíticos en la quebrada Cocotea, (ladera que da a Torata). Otras ocurrencias se han constatado en el valle del río Torata; el paraje de Chujulay, (entre 3,000 y 3,200 m.s.n.m.). Yacen sobre los volcánicos Paralaque e infrayacen a andesitas y andesitas brechoides de la Serie Alta. (pp 23-31)

2.2.3. Geología Económica

Bellido (1979) en el Boletín N° 15: Geología del Cuadrángulo de Moquegua describe lo siguiente:

> Los yacimientos de Toquepala, Quellaveco y Cuajone quedan en el lado oriental de los cuerpos diorítico-granodioríticos del Cretáceo-Terciario inferior, que afloran en la porción central norte de la hoja de Moquegua. Los macizos intrusivos que se suponen como pertenecientes al Batolito Andino están intruídos por stocks más jóvenes, de composición intermedia (dacitas, pórfido monzonítico, etc.), que probablemente derivaron por diferenciaciones de mismo magma. La mineralización consiste en una diseminación fina de sulfuros en toda la roca alterada, en forma de cristales de grano pequeño o como pequeños agregados de cristales y vetillas. Los minerales primarios son principalmente pirita, calcopirita y en proporciones más pequeñas bornita, esfalerita y molibdenita. Cerca de la superficie los sulfuros han sido oxidados y lixiviados. Las soluciones con cobre precipitaron su contenido de cobre formando una zona enriquecida con calcocita. (pp 69-70)

Lo antes descrito se muestra en el plano geológico del Anexo 3.

2.2.4. El agua en la Atmósfera

El Perú se encuentra entre el Ecuador y el trópico de Capricornio; por tanto, la presencia de lluvias en este sector se da en los meses de enero a marzo de cada año generalmente. Henry (1999) afirmó lo siguiente:

> El agua tiene la propiedad especial de existir en la atmósfera en las tres fases: líquida, gaseosa y sólida. El vapor tiende a condensarse en formas líquidas o sólidas. En la atmósfera, la condensación por lo general forma agua líquida a temperaturas muy inferiores al punto de fusión del hielo puro. Las partículas de agua y de hielo son muy pequeñas (por lo común menores de 2 μm de diámetro) y permanecen suspendidas en forma de nubes o niebla. Toda la precipitación significativa (lluvia, nieve y granizo) cae de nubes formadas por elevación. A medida que la nieve cae, se derrite y forma lluvia. El tipo de nube llamado cúmulo produce chubascos cortos y violentos, y son las nubes de lluvia predominantes en los trópicos. (pp 235-237)

2.2.5. Escorrentía

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones en su Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje se define escorrentía como:

> Es la precipitación que no se retiene en la superficie terrestre y tampoco se infiltra en el suelo. Después de fluir a través de la superficie de la cuenca, el exceso de precipitación se convierte en escorrentía directa. Las pérdidas son primordialmente agua absorbida por filtración con algo de intercepción y almacenamiento superficial. (MTC, 2014, p. 42)

2.2.6. Aguas de contacto y aguas ácidas

Las aguas de contacto son aquellas escorrentías procedentes de aguas de lluvia que caen sobre distintas zonas o que afloran en ciertos puntos, y que, al entrar en contacto con cualquier elemento natural (suelos, cauces) pueden alterar sus características y representar un riesgo ambiental si no se gestiona con responsabilidad.

Con respecto a las aguas ácidas Baquero (2008) afirmó lo siguiente:

> Un agua es ácida cuando su pH es menor a 7. No obstante, deja de ser potable para un pH menor a 5.5. La solubilidad de rocas y minerales se ve fuertemente afectada por el pH del medio. Las aguas ácidas se pueden formar tanto en el interior como en la superficie, por oxidación de la pirita (FeS_2 u otros sulfuros) en presencia de humedad, expuesta a las condiciones atmosféricas, pudiendo contaminar acuíferos, o surgir como efluentes que vierten en cursos de agua superficial.
>
> La producción de aguas ácidas está controlada por los siguientes factores: disponibilidad de pirita, presencia de oxígeno, disponibilidad de agua para transportar los productos de oxidación y características de la mina o de los depósitos estériles.
>
> La acidez del agua tiene las siguientes consecuencias principales: el agua se hace fuertemente corrosiva, la solubilidad de muchos metales pesados aumenta, con lo que las aguas llegan a ser tóxicas, y el ecosistema es incapaz de mantener muchas formas de vida, además que los sistemas acuíferos se contaminan. (pp 1-2)

2.2.7. Administración del recurso hídrico

Para poder administrar de la mejor manera el recurso hídrico es necesario estimar el caudal máximo promedio anual de agua que ingresa a una zona determinada.

Se utilizan los datos de precipitación promedio anual en la zona de interés. Una parte de esta precipitación se infiltra en el subsuelo y luego de un tiempo, el flujo se convierte en flujo superficial.

2.2.8. Cálculo de Caudal (Metodología Racional)

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones en su Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje la metodología racional para el cálculo del caudal Q indica lo siguiente:

> Estima el caudal máximo a partir de la precipitación, abarcando todas las abstracciones en un solo coeficiente c (coeficiente de escorrentía)

estimado sobre la base de las características de la cuenca. Muy usado para cuencas con áreas menores a 10 km^2. Hay que considerar que la duración de la precipitación es igual al tiempo de concentración.

La descarga máxima de diseño, según esta metodología, se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$Q = 0.278 \times C \times I \times A \quad (1)$$

Donde:

Q : Descarga máxima de diseño (m^3/s)
C : Coeficiente de escorrentía (Anexo 4)
I : Intensidad de precipitación máxima horaria (mm/h)
A : Área de la cuenca (km^2).

El valor del coeficiente de escorrentía se establecerá de acuerdo con las características hidrológicas y geomorfológicas de la zona de interés. (MTC, 2014, p. 50)

Para el presente proyecto se considerará una cobertura vegetal con pastos y vegetación ligera, con un suelo semipermeable y una pendiente del terreno alta, cuyo coeficiente de escorrentía resulta en 0.50. Estos datos se obtienen de la tabla del Anexo 4.

2.2.9. Drenaje Superficial

Según el Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje se indica lo siguiente:

El drenaje superficial tiene como objetivo evacuar adecuadamente el agua que intercepta la zona de interés, la cual puede discurrir por cauces naturales o artificiales, en forma permanente o transitoria, a fin de garantizar su estabilidad y permanencia.

El objetivo principal en el diseño hidráulico de una obra de drenaje superficial es determinar la sección hidráulica más adecuada que permita el paso libre del flujo líquido y flujo sólido que eventualmente transportan los cursos naturales y conducirlos adecuadamente, sin causar daño.

Para el estudio previo al diseño del sistema es necesario conocer premisas tales como las características topográficas que permitan definir el perfil longitudinal; estudio de cuencas hidrográficas que permita identificar la superficie, pendiente y tipo de cobertura vegetal; características del cauce que permitan identificar la forma, tipo de suelo, tipo de cobertura vegetal y tipo de material de arrastre; datos de marcas de crecidas que se analizarán y evaluarán por eventos anteriores, y evaluación de obras de drenaje existentes. (MTC, 2014, pp 68-69)

La pendiente longitudinal debe estar comprendida entre 0.5 % como mínimo y 2% como máximo. La corriente no debe producir daños importantes por erosión en la superficie del cauce. Si la corriente pudiera conducir material en suspensión (limo, arena, etc.) se dispondrán depósitos de sedimentación para recogerlas, los cuales deberán ser de fácil limpieza y conservarse de forma eficaz. (MTC, 2014, p. 172)

2.2.10. Obras de Drenaje Superficial

Según el Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje se mencionan las siguientes obras:

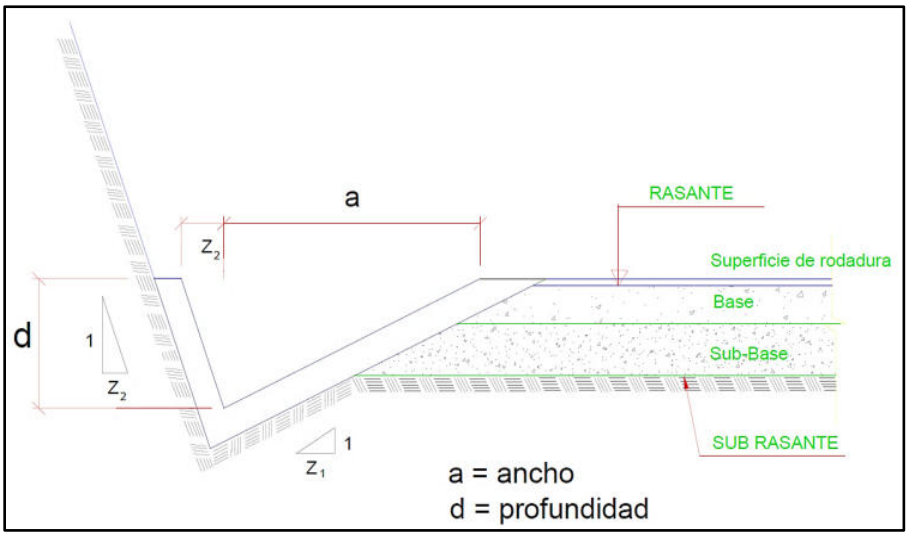
Cunetas

Las cunetas son zanjas longitudinales revestidas o sin revestir abiertas en el terreno, ubicadas a ambos lados o a un solo lado de un acceso, con el objeto de captar, conducir y evacuar adecuadamente los flujos del agua superficial.

Serán del tipo triangular, trapezoidal o rectangular, siendo preferentemente de sección triangular, donde el ancho es medido desde el borde de la rasante hasta la vertical que pasa por el vértice inferior. La profundidad es medida verticalmente desde el nivel del borde de la rasante al fondo o vértice de la cuneta tal como se muestra en la Figura 1. (MTC, 2014, pp 172-173)

Figura 1

Sección Típica de Cuneta triangular.



Nota. Tomado del *Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje* (p. 174), por el MTC, 2014, República del Perú.

Dimensiones mínimas

Según el Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje se fijan las dimensiones según las condiciones pluviales de la zona de interés. Para una sección triangular, las dimensiones mínimas están indicadas en la Tabla 1.

Tabla 1

Dimensiones mínimas de una cuneta.

REGION	PROFUNDIDAD (d) (m)	ANCHO (a) (m)
Seca *(<400 mm/año)*	0.20	0.50
Lluviosa *(de 400 a <1600 mm/año)*	0.30	0.75
Muy lluviosa *(de 1600 a <3000 mm/año)*	0.40	1.20

Nota. Tomado del *Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje* (p. 178), por el MTC, 2014, República del Perú.

Canales de drenaje con revestimiento

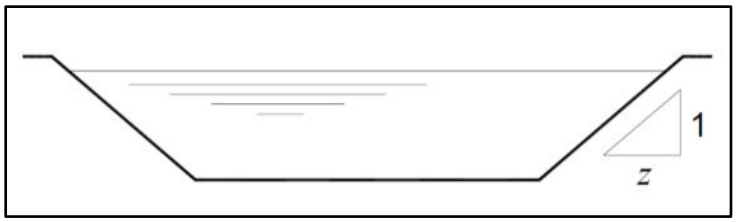
Los canales interceptan, desvían y transportan el agua de escorrentía proveniente de zonas altas y que llevan el caudal hacia un sistema de drenaje mayor. La mayoría de ellos se impermeabiliza.

Según Rocha (2007) el talud de la sección depende de la naturaleza del terreno. Desde el punto de vista puramente hidráulico se puede lograr los mismos resultados con un canal de cualquier forma. (p. 275)

Para el presente proyecto se utilizará el diseño de un canal trapezoidal como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Talud (z) de un canal de sección trapezoidal.



Nota. Tomado de *Hidráulica de tuberías y canales* (p. 275), por A. Rocha, 2007, Universidad Nacional de Ingeniería.

Para el presente proyecto se utilizará el diseño de un talud (z) para suelos cementados y firmes como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

Valor del Talud (z) según el tipo de material del canal.

MATERIAL	TALUD (z)
Roca dura y sana	0
Roca fisurada	0.5
Suelos cementados, firmes	1
Tierra arcillosa	1.25
Tierra arenosa	1.5
Arena	2 o más

Nota. Tomado de *Hidráulica de tuberías y canales* (p. 275), por A. Rocha, 2007, Universidad Nacional de Ingeniería.

Pozas de captación con revestimiento

Una poza es una obra hidráulica que consiste en una estructura artificial destinada al almacenamiento de agua ubicada fuera de un cauce. Su alimentación es controlada con agua procedente de bombeo o derivación de un cauce o canal. Las pozas se construyen donde se requiere captación de agua, con independencia de las condiciones geotécnicas y tratando de utilizar el material excavado para su construcción. La mayoría de ellas se impermeabiliza con geomembranas.

Tuberías de drenaje

En el libro Hidráulica de tuberías y canales se menciona lo siguiente:

> Es frecuente tener un conducto cerrado llevando un fluido que no ocupa totalmente la sección transversal. Podría ser, por ejemplo, un túnel, una tubería de desagüe o una alcantarilla. Mediante simples consideraciones geométricas se puede determinar el área, perímetro y demás elementos de la sección transversal ocupada por el fluido. La tubería que trabaja parcialmente llena se caracteriza por la posibilidad de tener una velocidad media y un gasto mayores a los que corresponderían a tubo lleno, por lo que se requerirá una tubería HDPE por su resistencia. (Rocha, 2007, pp 296-297)

2.3. Definición de términos

Acuífero: Formación geológica saturada constituida por rocas o sedimentos permeables que pueden almacenar y transmitir agua subterránea en el espacio saturado, permitiendo su explotación mediante pozos u obras de captación (ANA, 2025).

Contaminación ambiental: Es un impacto negativo que implica la presencia de sustancias nocivas de diferente origen en el agua, aire o suelo, causando daño en distintas concentraciones (ONU, 2023).

Costo-beneficio: Es un razonamiento basado en obtener los mayores resultados al menor esfuerzo o costo posible, con el fin de evaluar la eficiencia de un proyecto o acción (Boardman et al., 2018).

Cuenca hidrográfica: Es toda el área de terreno que contribuye al flujo de agua en un río o quebrada; también se denomina área de captación, ya que recoge las aguas que alimentan un sistema fluvial (CONAGUA, 2021).

Geomembrana: Es una lámina geosintética impermeable utilizada para la contención de líquidos en procesos mineros, agrícolas y ambientales (Koerner, 2012).

Geosintéticos: Son materiales elaborados con polímeros sintéticos que se emplean para mejorar las propiedades del suelo, siendo resistentes a la degradación biológica (Koerner, 2012).

Impacto ambiental: Alteración, ya sea positiva o negativa, de uno o más componentes del ambiente (agua, aire, suelo, flora, fauna, paisaje, recursos naturales) causada por actividades, obras o proyectos, que afecta la calidad, funcionamiento, estructura o relaciones ecológicas de dichos componentes. (SENACE, 2016).

Mitigación ambiental: Conjunto de medidas orientadas a reducir los impactos negativos sobre el ambiente derivados de actividades humanas, promoviendo la sostenibilidad (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2022).

Pórfido: Depósito mineral formado a partir de sistemas hidrotermales asociados a rocas ígneas intrusivas, con minerales diseminados de cobre, oro, molibdeno o plata (Sillitoe, 2010).

Precipitación: Es el agua proveniente de la atmósfera que, en estado sólido o líquido, cae sobre la superficie terrestre (OMM, 2021).

Revestimiento: Capa o cubierta protectora que se aplica sobre una superficie para preservarla o mejorar su apariencia (RAE, 2024).

Sulfuros: Minerales formados por la combinación del azufre con uno o más metales (Mindat, 2023).

Unidad estratigráfica: Conjunto de estratos adyacentes con características litológicas particulares, formados bajo condiciones deposicionales similares (Boggs, 2012).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Tipo y nivel de investigación

El presente estudio es de enfoque cuantitativo según la clasificación propuesta por Hernández (2014). El tipo de investigación es aplicada porque tiene como propósito diseñar un sistema de captación de escorrentías para mitigar el impacto ambiental por aguas de contacto en una cuenca hidrográfica ubicada en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, región Moquegua, además de determinar la viabilidad del proyecto a través de un análisis de costo-beneficio.

El nivel de investigación es observacional experimental, pues en este estudio se describe el problema observado, que es el impacto ambiental por aguas de contacto procedente de escorrentías de precipitaciones pluviales que se dan generalmente en el periodo de avenida (enero, febrero y marzo), estas aguas de contacto podrían corresponder a aguas ácidas, ya que en la zona de estudio hay presencia de minerales sulfuros (pirita y calcopirita principalmente) debido a que la geología de la zona evidencia el afloramiento del pórfido Quellaveco correspondiente a la unidad estratigráfica del Volcánico Quellaveco del Grupo Toquepala. Además, se busca dar solución a este problema con el diseño de un sistema de captación de escorrentías, a través de la construcción de cunetas, canales y pozas con revestimiento y tendido de tuberías, y de esta manera mitigar el impacto ambiental producido en una cuenca hidrográfica, en la región Moquegua.

3.1.1. Diseño de investigación

El diseño de investigación es experimental porque se busca dar solución al problema de investigación que implica la observación en el periodo de avenida (enero, febrero y marzo) la generación de escorrentías con posible presencia de aguas ácidas a causa del contacto de aguas de lluvia con el afloramiento de rocas con minerales del grupo de sulfuros. Estas escorrentías desembocan en una cuenca hidrográfica y el objetivo principal como medida preventiva es realizar la construcción de un sistema de captación de estas escorrentías para mitigar el impacto ambiental en la cuenca hidrográfica; además de determinar la viabilidad del proyecto.

El tipo de investigación del proyecto es aplicada y el nivel es observacional experimental, como hipótesis se tiene que un sistema de captación de escorrentías mitigará el impacto ambiental producido por aguas de contacto que desembocan en una cuenca hidrográfica. Además, que el diseño por canales y pozas con geosintéticos es aplicable para el desarrollo de este proyecto. Finalmente, el diseño e implementación de este sistema es más económico que pagar elevadas multas al Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) y pagar elevados costos de remediación.

El procedimiento para la construcción del proyecto implica primero la visita a la zona de interés para una inspección visual del terreno e identificación de zonas críticas donde se evidencie mayor generación de escorrentías en temporada de lluvia; luego, se procede con el trabajo preliminar de campo que es el levantamiento topográfico de la zona de interés. Una vez realizada la inspección visual en campo y el levantamiento topográfico se elabora el plan de trabajo y el cronograma de actividades a realizar, esto implica, el equipo y herramientas, personal necesario, materiales necesarios. Finalmente, se procede con la ejecución del proyecto, que consiste en trabajos de movimiento de tierras, instalación de geosintéticos e instalación de tuberías. En el Anexo 1 se muestra la Matriz de consistencia de la investigación.

3.2. Ámbito temporal y espacial

3.2.1. Ámbito temporal

La ejecución del diseño de un sistema económicamente viable de captación de escorrentías en una mina superficial inició en marzo y concluyó en diciembre del 2021. Este periodo incluye la inspección de las zonas de trabajo, traslado de material y equipos, limpieza y habilitación de accesos, construcción de sistemas de drenaje, revestimiento con geosintéticos y tendido de tuberías HDPE.

3.2.2. Ámbito espacial

La ejecución del presente proyecto se realiza aguas abajo de un depósito de desmonte inactivo en una mina superficial que explota mineral de cobre y molibdeno, ubicada en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, región Moquegua, Perú.

3.3. Población y muestra

La población considerada para este proyecto es el cauce del río, ubicado en el distrito de Torata, provincia de Mariscal Nieto, departamento Moquegua y la muestra son los afluentes y el cauce del río en una zona de interés de aproximadamente 2 km^2, aguas arriba del pueblo de Torata, además de las escorrentías que pueden desembocar en los afluentes y el cauce del río.

3.4. Instrumentos

Con respecto a la recolección y análisis de datos, implica el cálculo del caudal (m^3/s) de las escorrentías que ingresan al cauce del río, así como los datos históricos de precipitación mensual (mm) en la zona de interés en los últimos 10 años. Se calculó el caudal de escorrentías que ingresa al río Torata antes de la construcción del proyecto y se hizo un contraste con el caudal de escorrentías que ingresa al río después de la construcción del proyecto. Para evaluar la viabilidad del proyecto, se tomaron los costos del proyecto que contemplan el uso de equipos pesados (horas), compra de materiales y costo de horas hombre, se realizó un análisis de costo-beneficio con una simulación de multa por contaminación de agua del río que impone el OEFA y costos de una posible remediación.

3.4.1. Validación y confiabilidad de los instrumentos

Para la validación y confiabilidad de los instrumentos se utilizó como referencia el Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje del Ministerio de Transportes y Comunicaciones, del cual se tomaron los cálculos de caudal de escorrentías según las características del terreno, así como el diseño de obras de drenaje superficial. Así mismo, los datos de precipitación se obtuvieron de pluviómetros de la empresa minera a cargo, los cuales se toman de forma mensual en los últimos 10 años.

Para la instalación de los geosintéticos y tuberías de HDPE, se utilizó como referencia la Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas del Ministerio de Energía y Minas.

Con respecto a los precios, se consideraron los precios de productos y servicios vigentes que maneja la empresa minera a cargo, así como la

simulación de las multas que rigen en la Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental.

3.5. Procedimientos

En una empresa minera superficial se tienen depósitos de desmonte para almacenar material estéril extraído del tajo, como parte del programa de inspecciones planeadas del área de servicios ambientales, se inspeccionan las condiciones ambientales de los depósitos de desmonte activos e inactivos. Dentro de las mencionadas inspecciones, se detectó que los depósitos de desmonte inactivos 3, 4 y 5, presentaban afloramientos de minerales del tipo sulfuros en la base. Con una inspección visual se determinó que, ante la presencia de precipitaciones, las escorrentías con posible contenido de aguas ácidas podrían desembocar en una cuenca hidrográfica cercana y con el tiempo impactar dicha cuenca negativamente.

Como medida preventiva, en coordinación con las áreas de operaciones mina (personal, materiales y equipos) y geotecnia (planeamiento, diseño y supervisión), se aprobó el diseño de un sistema de captación de escorrentías para mitigar el impacto ambiental en una cuenca hidrográfica.

Los representantes de las tres áreas involucradas (servicios ambientales, operaciones mina y geotecnia) en el mes de marzo realizan la inspección visual de las zonas de trabajo para coordinar las actividades a realizar.

En la inspección visual y reunión de coordinación se encargaron las responsabilidades de las distintas actividades a realizar, encargando al área de geotecnia, el diseño y planeamiento del trabajo, así como la supervisión del proyecto; el área de operaciones mina estará a cargo de proporcionar el personal, materiales y equipos a utilizar; finalmente el área de servicios ambientales estará a cargo de gestionar los permisos, documentación y recursos adicionales.

3.5.1. Diseño y planeamiento

Para el diseño del proyecto se realizó una campaña de levantamiento topográfico en campo con un dron abarcando un área aproximada de 3 km^2. Se realizaron seis vuelos con una duración total de tres horas, luego se

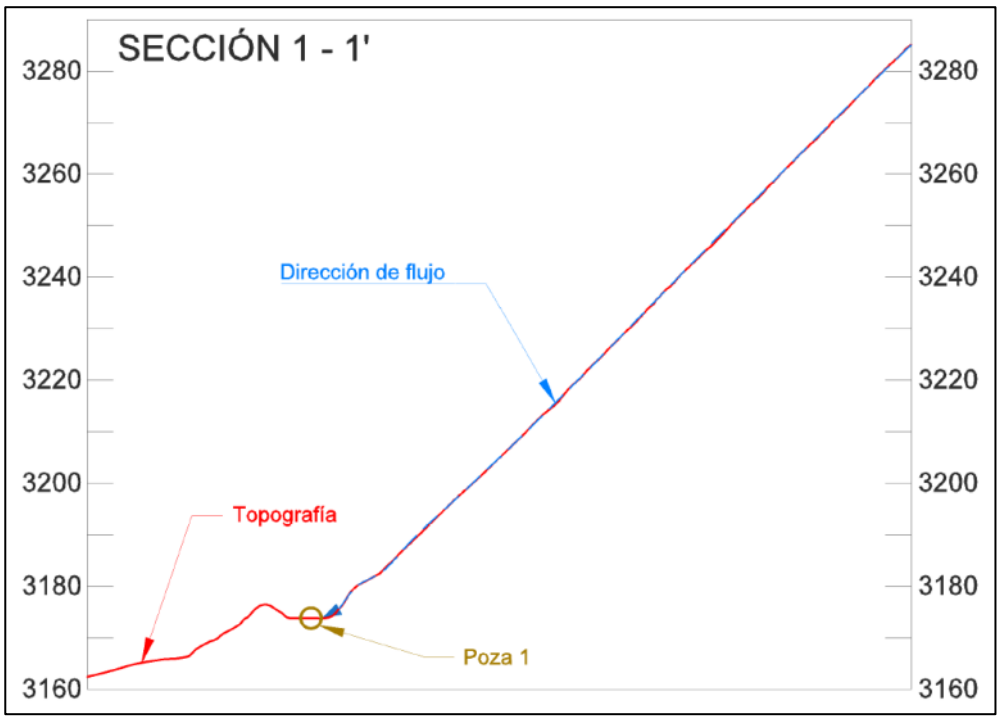
procesa la información en oficina de un día para otro obteniendo el plano topográfico final con una equidistancia de las curvas de nivel de un metro que se muestra en el Anexo 5. En dicho plano se muestra la ubicación de la cuenca hidrográfica a unos 800 metros aproximadamente del depósito de desmonte 3-5 que está inactivo.

Con el plano topográfico se construyeron tres secciones, una en cada zona de trabajo (Anexo 6), para determinar la dirección del flujo de escorrentías y determinar la ubicación de puntos de captación de escorrentías, a través de la construcción de pozas.

En la Figura 3 se muestra la sección de la zona 1 donde al determinar la dirección de flujo se definió la ubicación de la poza 1.

Figura 3

Sección 1-1', dirección de flujo y ubicación de poza 1.

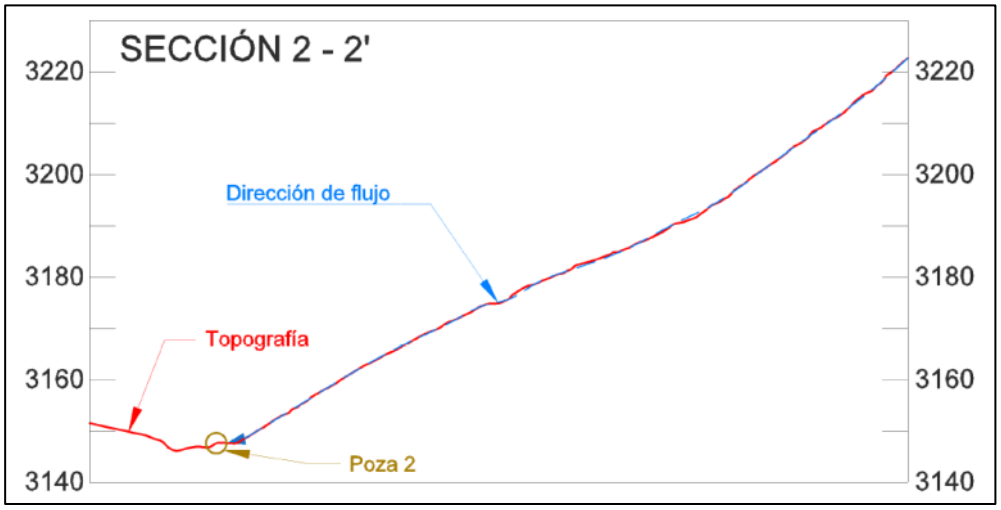


Nota. Elaboración propia a partir del plano topográfico del Anexo 5.

En la Figura 4 se muestra la sección de la zona 2 donde al determinar la dirección de flujo se definió la ubicación de la poza 2.

Figura 4

Sección 2-2', dirección de flujo y ubicación de poza 2.



Nota. Elaboración propia a partir del plano topográfico del Anexo 5.

En la Figura 5 se muestra la sección de la zona 3 donde al determinar la dirección de flujo se definió la ubicación de la poza 3.

Figura 5

Sección 3-3', dirección de flujo y ubicación de poza 3.



Nota. Elaboración propia a partir del plano topográfico del Anexo 5.

Con las direcciones de flujo de escorrentías identificadas, se procede a realizar el cálculo de caudal que ingresa a la cuenca hidrográfica cercana utilizando la Ecuación 1, para eso se requiere determinar el área de la cuenca de las escorrentías en kilómetros cuadrados, la intensidad de precipitación

máxima horaria en milímetros por hora y el coeficiente de escorrentía según la tabla que se muestra en el Anexo 4.

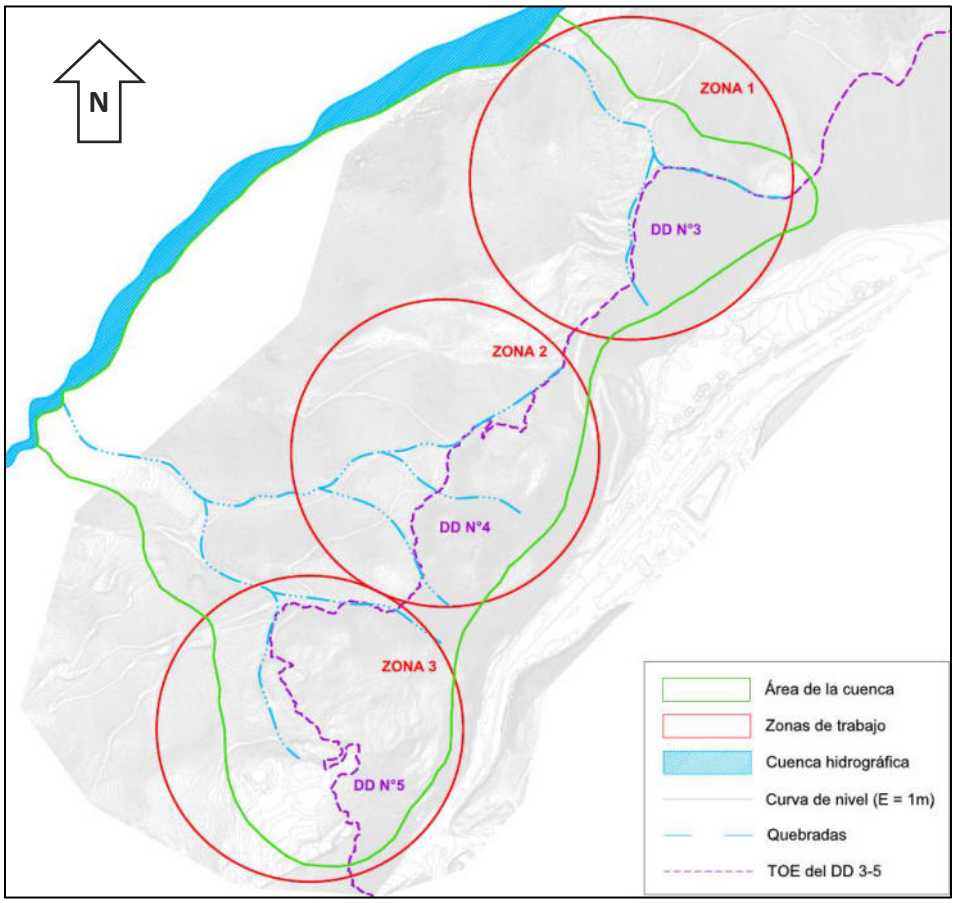
Para la zona de trabajo se consideró una cobertura vegetal con pastos y vegetación ligera, con un suelo semipermeable y una pendiente del terreno alta, cuyo coeficiente de escorrentía resulta en 0.50.

Para determinar la intensidad de precipitación máxima horaria, se tomaron en cuenta datos de la precipitación mensual histórica de los últimos 10 años de pluviómetros que están a cargo de la empresa minera, los datos se muestran en el cuadro del Anexo 7. Según el cuadro en el mes de febrero del año 9 se presentó la máxima precipitación de 156.4 mm resultando en una intensidad de precipitación máxima horaria de 0.233 mm/h.

El área de la cuenca por donde circulan las escorrentías está representada como se muestra en la Figura 6.

Figura 6

Área de la cuenca y zonas de trabajo.



Nota. Elaboración propia a partir del plano topográfico del Anexo 5.

El área de la cuenca es de aproximadamente 1’671,700 m^2, realizando la conversión nos da un total de 1.672 km^2.

Para el cálculo de caudal que circula en el sistema se usó la fórmula de la Ecuación 1 (MTC, 2014). Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Resultados del cálculo de caudal del sistema.

Descripción	Símbolo	Resultado
Coeficiente de escorrentía	C	0.50
Intensidad de precipitación máxima horaria	I	0.233 mm/h
Área de la cuenca	A	1.672 km^2
Descarga máxima de diseño	**Q**	**0.054 m^3/s**

Nota. Resultados obtenidos a partir de la Ecuación 1.

El caudal máximo es de 0.054 m^3/s, dicho de otra forma, es 54 l/s, que es el que ingresa a la cuenca hidrográfica previo a la construcción del sistema de captación de escorrentías y es el que se busca captar luego de su implementación.

Luego de determinar las zonas de trabajo y la ubicación de las pozas, se realizó el plan de trabajo que incluye: desarrollo y habilitación de accesos, construcción de pozas, canales y cunetas, impermeabilización de pozas e implementación de un sistema de descarga a través del tendido de tuberías HDPE. Los planos del plan de trabajo para las tres zonas se muestran en los Anexos 8, 9 y 10.

Se realizó el diseño de las pozas, cunetas y canales de captación, donde se muestra la capacidad de las pozas y su área. Estos planos se muestran en los Anexos 11, 12 y 13.

Diseño hidráulico de la cuneta

La cuneta se ha dispuesto paralela a la vía de acceso, y su geometría fue definida en función del caudal de diseño y las características del terreno. El caudal de diseño considerado corresponde al valor máximo estimado para la cuenca de aporte, equivalente a 0.054 m^3/s (54 l/s). La pendiente

longitudinal se estableció entre 0.5% y 2%, de acuerdo con las recomendaciones del Manual de Carreteras: Drenaje (MTC, 2014), que sugiere mantener pendientes moderadas para prevenir erosión en cunetas de terreno natural. El material del revestimiento corresponde a suelo natural compactado, con un coeficiente de rugosidad de n = 0.030 según la tabla de valores de Manning del Manual de Hidráulica de Canales (Chow, 1994).

Se adoptó una sección transversal triangular asimétrica, debido a su simplicidad constructiva y buen desempeño hidráulico en condiciones de mantenimiento rutinario. La sección presenta una profundidad (d) de 0.50 m y un ancho (a) de 1.00 m, con taludes desiguales definidos por la relación $z_2 = 3z_1$, donde z_1 y z_2 representan las proyecciones horizontales por unidad de altura a cada lado de la cuneta. Resolviendo la ecuación $(z_1 + z_2)d = a$ se obtiene $z_1 = 0.5$ y $z_2 = 1.5$.

La capacidad hidráulica se verificó mediante la ecuación de Manning (Ecuación 2), expresada como:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \tag{2}$$

Donde:

Q : Descarga máxima de diseño (m^3/s)
n : Coeficiente de rugosidad
A : Área de flujo (m^2)
R : Radio hidráulico (m)
S : Pendiente del sistema

Para la geometría definida se obtiene un área hidráulica A = 0.5 m^2, un perímetro mojado P = 1.46 m y un radio hidráulico R = 0.342 m.

Para una pendiente mínima de 0.5% nos da como resultado un caudal de 0.577 m^3/s y una velocidad de 1.15 m/s, para una pendiente máxima de 2% nos da como resultado un caudal de 1.154 m^3/s y una velocidad de 2.31 m/s. Los resultados muestran que la sección propuesta presenta una capacidad comprendida entre 0.577 m^3/s y 1.154 m^3/s, valores superiores al caudal de diseño (0.054 m^3/s). Por lo tanto, la cuneta tiene un factor de seguridad hidráulico mayor a 3, garantizando un flujo libre sin riesgo de desbordamiento.

Asimismo, las velocidades calculadas (1.15 - 2.31 m/s) se encuentran dentro del rango recomendado para canales de tierra o cunetas naturales, según el Manual de Carreteras - Drenaje (MTC, 2014), el cual establece velocidades admisibles entre 0.5 m/s y 2.0 m/s para evitar erosión superficial. De esta forma, el diseño cumple con las condiciones hidráulicas y constructivas adecuadas.

Diseño hidráulico del canal

El canal principal tiene como función conducir las escorrentías captadas hacia los puntos de almacenamiento o disipación, evitando la erosión del terreno natural y garantizando la estabilidad del sistema de drenaje. Su dimensionamiento se realizó aplicando la ecuación de Manning, considerando las características geométricas del canal, el tipo de revestimiento, el caudal de diseño y la pendiente longitudinal establecida.

Para el cálculo hidráulico del canal se consideró un caudal de 0.054 m^3/s, una pendiente entre 5% y 8%, una base superior de 3 m, una base inferior de 1 m, una altura de 1 m, un revestimiento de geomembrana y un coeficiente de rugosidad de 0.011 según la tabla de valores de Manning del Manual de Hidráulica de Canales (Chow, 1994). Estos valores fueron determinados en función del levantamiento topográfico del área de estudio, las características hidráulicas del sistema de captación y las condiciones de operación esperadas durante eventos de lluvia intensa.

Aplicando la ecuación de Manning (Ecuación 2) con los parámetros anteriores, se obtuvieron los resultados que muestran una profundidad de flujo reducida (entre 2.5 y 3.0 cm), debido a la combinación de alta pendiente y bajo caudal de diseño. Sin embargo, la velocidad del flujo se mantiene entre 1.84 y 2.12 m/s, lo cual es relativamente alto para canales revestidos con geomembrana lisa.

Según el Manual de Carreteras - Hidrología y Drenaje (MTC, 2014), las velocidades seguras para geomembranas no protegidas se encuentran entre 1.0 y 1.5 m/s. Por tanto, se requiere la instalación de geotextiles rugosos bajo geomembrana, implementación de disipadores de energía en la salida del canal, y un anclaje adecuado en los bordes para evitar levantamiento o desplazamiento por flujo concentrado.

Diseño hidráulico de la tubería HDPE

El diseño hidráulico de la tubería de descarga tiene como finalidad conducir el caudal proveniente del sistema de cunetas y canales hacia el punto de descarga final, garantizando un flujo eficiente, estable y seguro. Para este análisis se emplea la ecuación de Manning, ampliamente utilizada en el dimensionamiento de conductos a presión y canales parcialmente llenos, conforme a las recomendaciones del Manual de Carreteras: Drenaje del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2014).

El dimensionamiento de la tubería se realizó aplicando la ecuación de Manning (Ecuación 2) para conductos circulares, considerando un caudal de diseño de Q = 0.054 m^3/s, una pendiente hidráulica promedio de S = 0.35 (equivalente al 35%) y un coeficiente de rugosidad de n = 0.011, correspondiente al material HDPE liso según el Manual de Carreteras: Drenaje del MTC (2014)

El diámetro teórico obtenido varía entre 0.111 m y 0.120 m (equivalente a 4.4" - 4.7"). Sin embargo, dichos valores generan velocidades excesivas superiores a 4.8 m/s, que podrían comprometer la durabilidad del sistema, especialmente en zonas con energía hidráulica elevada.

Para garantizar un régimen de flujo seguro y minimizar la erosión o cavitación, se adopta un diámetro comercial de 8 pulgadas (DN200). Este valor permite mantener una velocidad de operación promedio de 1.7 m/s, compatible con las recomendaciones del MTC para sistemas de conducción cerrados.

El requerimiento de personal y equipos para la construcción y habilitación de accesos, pozas, canales y cunetas por el método corte y relleno, se realiza en base a la disponibilidad del área de Operaciones Mina.

En la Tabla 4 se muestra el requerimiento de personal y equipos para el presente proyecto.

Tabla 4

Requerimiento de personal y equipos.

Personal	Cantidad	Unidad
Supervisor de Campo	1	UND
Supervisor de Seguridad	1	UND
Operadores y Obreros	12	UND
Equipos	**Cantidad**	**Unidad**
Excavadoras	3	UND
Tractor de orugas	2	UND
Motoniveladora	1	UND
Martillo hidráulico	1	UND
Cargador frontal	1	UND

Nota. Elaboración propia.

En la Figura 7 se muestra el requerimiento de los equipos pesados para el presente proyecto.

Figura 7

Equipos pesados requeridos.



Nota. Imágenes tomadas de: https://www.cat.com/ y https://komatsu.pe/

El requerimiento de materiales está definido por la necesidad de geosintéticos (geotextil y geomembrana) en metros cuadrados, cordón de soldadura de HDPE en rollos y tuberías de HDPE en metros lineales.

El área de geosintéticos necesaria se muestra en los planos de diseño de pozas de los Anexos 11, 12 y 13, donde para las tres pozas y el canal de captación son necesarios 5,580 m^2 de material geosintético (geotextil y geomembrana), lo que para un rollo de geotextil de 4 m x 100 m y un rollo de geomembrana de 7 m x 130 m, equivalen a un total de 14 rollos de geotextil y 7 rollos de geomembrana.

Para el cordón de soldadura de HDPE, es necesario calcular que un rollo de 300 m cubre un área de 400 m^2 de geomembrana aproximadamente, por lo que se ha estimado un total de 14 rollos de soldadura de HDPE.

Los metros lineales de tubería de HDPE necesarios se muestran en los planos de plan de trabajo de los Anexos 8, 9 y 10, donde para las tres zonas de trabajo son necesarios 3,080 metros lineales, lo que para una tubería HDPE de 8'' de diámetro y 12 m de longitud, equivale a un total de 257 tuberías.

El requerimiento total de materiales para el presente proyecto se muestra en la Tabla 5 y en la Figura 8 se muestran los materiales requeridos.

Tabla 5

Requerimiento de materiales.

Materiales	Cantidad	Unidad
Geotextil (Rollo de 4 m x 100 m)	14	ROL
Geomembrana (Rollo de 7m x 130 m)	7	ROL
Tubería HDPE de 8" (Longitud 12 m)	257	ROL
Cordón de soldadura HDPE (Rollo de 300 m)	14	UND

Nota. Materiales utilizados en el proyecto (elaboración propia).

Figura 8

Materiales requeridos.



Nota. Imágenes tomadas de: https://www.cat.com/ y https://komatsu.pe/

Para finalizar la etapa de diseño y planeamiento se elaboró el cronograma de actividades que incluye la inspección visual de campo, levantamiento topográfico, movilización de equipos y materiales, construcción y habilitación de accesos, construcción de pozas, cunetas y canales, impermeabilización de pozas y canales con geosintéticos, e instalación de un sistema de descarga a través del tendido de tuberías HDPE. El cronograma de actividades se muestra en el Anexo 14.

3.5.2. Construcción e Instalación

Para la construcción y habilitación de accesos, se utilizó una excavadora, un tractor de orugas, una motoniveladora y un camión cisterna. El tractor de orugas se utilizó para mover grandes masas de tierra y definir el ancho del acceso como se muestra en la Figura 9, la motoniveladora se utilizó para el refinado de los accesos para el ingreso de vehículos livianos y el camión cisterna para regar los accesos y de esta manera compactar las vías y mitigar la generación de material particulado, el ancho de los accesos es de 6 m aproximadamente y la pendiente de un máximo de 10%. Para el presente proyecto se trabajaron un total de 2,460 metros lineales de accesos como se muestra en los planos de plan de trabajo en los Anexos 8, 9 y 10.

Figura 9

Construcción de accesos con tractor de orugas.



Nota. Fotografía tomada en la zona 3.

Para la construcción de pozas de captación, se utilizaron dos excavadoras, un martillo hidráulico, dos tractores de orugas y un cargador frontal. Las excavadoras se utilizaron para profundizar las pozas y clasificar rocas grandes para enrocado como se muestra en la Figura 10, el martillo hidráulico se utilizó para romper rocas grandes, los tractores de orugas se utilizaron para mover grandes masas de tierra y el cargador frontal se utilizó para trasladar material fino y cubrir la capa superficial de las pozas. Para el presente proyecto se construyeron tres pozas de 375 m^3, 265 m^3 y 815 m^3, como se muestra en los planos de plan de trabajo en los Anexos 8, 9 y 10 y los planos de diseño de pozas en los Anexos 11, 12 y 13.

Figura 10

Construcción de pozas con excavadora.



Nota. Fotografía tomada en la zona 3.

Para la construcción y habilitación de cunetas de captación se utilizó una excavadora, un martillo hidráulico y un tractor de orugas. La excavadora se utilizó para profundizar las cunetas y extraer rocas grandes como se muestra en la Figura 11, el martillo hidráulico se utilizó para romper rocas grandes y excavar en material extremadamente duro y el tractor de orugas se utilizó para mover grandes masas de tierra. Para el presente proyecto se trabajaron un total de 580 metros lineales de cunetas, con 1 m de ancho y 50 cm de profundidad, como se muestra en los planos de plan de trabajo en los Anexos 8 y 9, y los planos de diseño de pozas en los Anexos 11 y 12.

Figura 11

Construcción de cunetas con excavadora.



Nota. Fotografía tomada en la zona 2.

Para la construcción del canal de captación se utilizó una excavadora, un martillo hidráulico y un tractor de orugas. La excavadora se utilizó para profundizar el canal y extraer rocas grandes como se muestra en la Figura 12, el martillo hidráulico se utilizó para romper rocas grandes y excavar en material extremadamente duro y el tractor de orugas se utilizó para mover grandes masas de tierra. Para el presente proyecto se trabajó un canal de captación de un total de 480 metros lineales, con las siguientes especificaciones: 1 m de altura, 1 m de base menor y 3 m de base mayor, adicionalmente en la corona del canal se conformó un hombro de 50 cm de ancho y 30 cm de profundidad para la instalación de los geosintéticos, como se muestra en el plano de plan de trabajo en el Anexo 10 y el plano de diseño de pozas en el Anexo 13.

Figura 12

Construcción de canal con excavadora.



Nota. Fotografía tomada en la zona 3.

Para la instalación de geosintéticos se utilizaron equipos pesados como una excavadora y un cargador frontal, además de un camión grúa, adicionalmente se utilizaron una máquina de termofusión, una pistola de calor y una máquina extrusora como se muestran en la Figura 13. La excavadora se utilizó para cargar e instalar los rollos de geosintéticos, el cargador frontal se utilizó para transportarlos y cubrir los hombros de las pozas y el canal con material para sujetar la geomembrana, el camión grúa se utilizó para cargar e instalar los rollos de geosintéticos, la pistola de calor se utilizó para pegar tramos cortos de geomembranas, la máquina de termofusión se utilizó para pegar tramos largos, y la máquina extrusora se utilizó para fundir el cordón de soldadura de HDPE y fijar permanentemente todas las uniones.

Figura 13

Máquina de termofusión, pistola de calor y máquina extrusora.



Nota. Imágenes tomadas de: https://www.leister.com/

La poza debe estar cubierta de material fino en la superficie para evitar perforaciones en los geosintéticos, se instala primero el geotextil y encima se coloca la geomembrana como se muestra en la Figura 14, de preferencia con la luz del sol para facilitar la instalación.

Figura 14

Instalación de geosintéticos con excavadora.



Nota. Fotografía tomada en la zona 3.

La geomembrana debe ser soldada con el apoyo de la máquina de termofusión como se muestra en la Figura 15.

Figura 15

Soldado de geomembrana con máquina de termofusión.



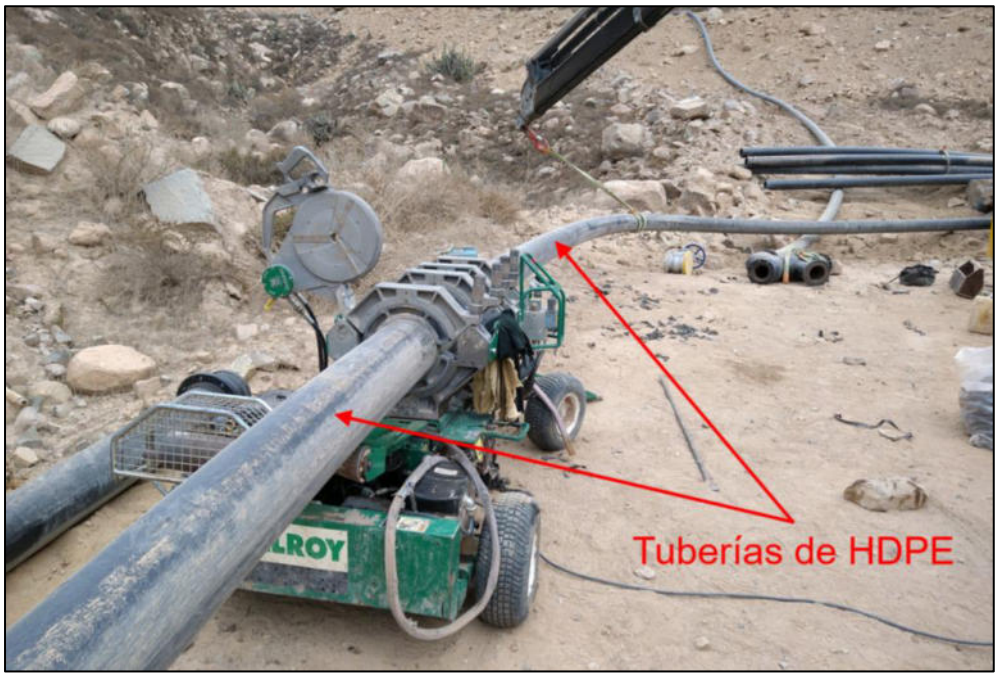
Nota. Fotografía tomada en la zona 3.

Para el presente proyecto se impermeabilizó un total de 5,580 m^2, para tres pozas y un canal, como se muestra en los planos de plan de trabajo en los Anexos 8, 9 y 10 y los planos de diseño de pozas en los Anexos 11, 12 y 13.

Para la instalación del sistema de descarga se utilizó una excavadora, una motoniveladora, un camión grúa y una máquina de termofusión. La excavadora se utilizó para extraer rocas grandes e ingresar a zona de difícil acceso, la motoniveladora se utilizó para definir el camino de las tuberías de HDPE por el borde de las vías de acceso, el camión grúa se utilizó para carga, descarga y sujeción de las tuberías de HDPE, y la máquina de termofusión se utilizó para unir las tuberías una con otra como se muestra en la Figura 16, además se utilizaron bridas para conectar las tuberías con las pozas. El sistema de descarga a través de la instalación de tuberías de HDPE de 8'' de diámetro, está dirigido hacia un dique de retención de una capacidad aproximada de 10,000 m^3 ubicado en el nivel más bajo de la zona como se muestra en el esquema del Anexo 15, cuyo recurso hídrico captado es retornado y recuperado para la operación de la mina. Para el presente proyecto se tendieron aproximadamente un total de 3,080 metros lineales de tuberías de HDPE, como se muestra en los planos de plan de trabajo en los Anexos 8, 9 y 10.

Figura 16

Soldado de tuberías de HDPE con máquina de termofusión.



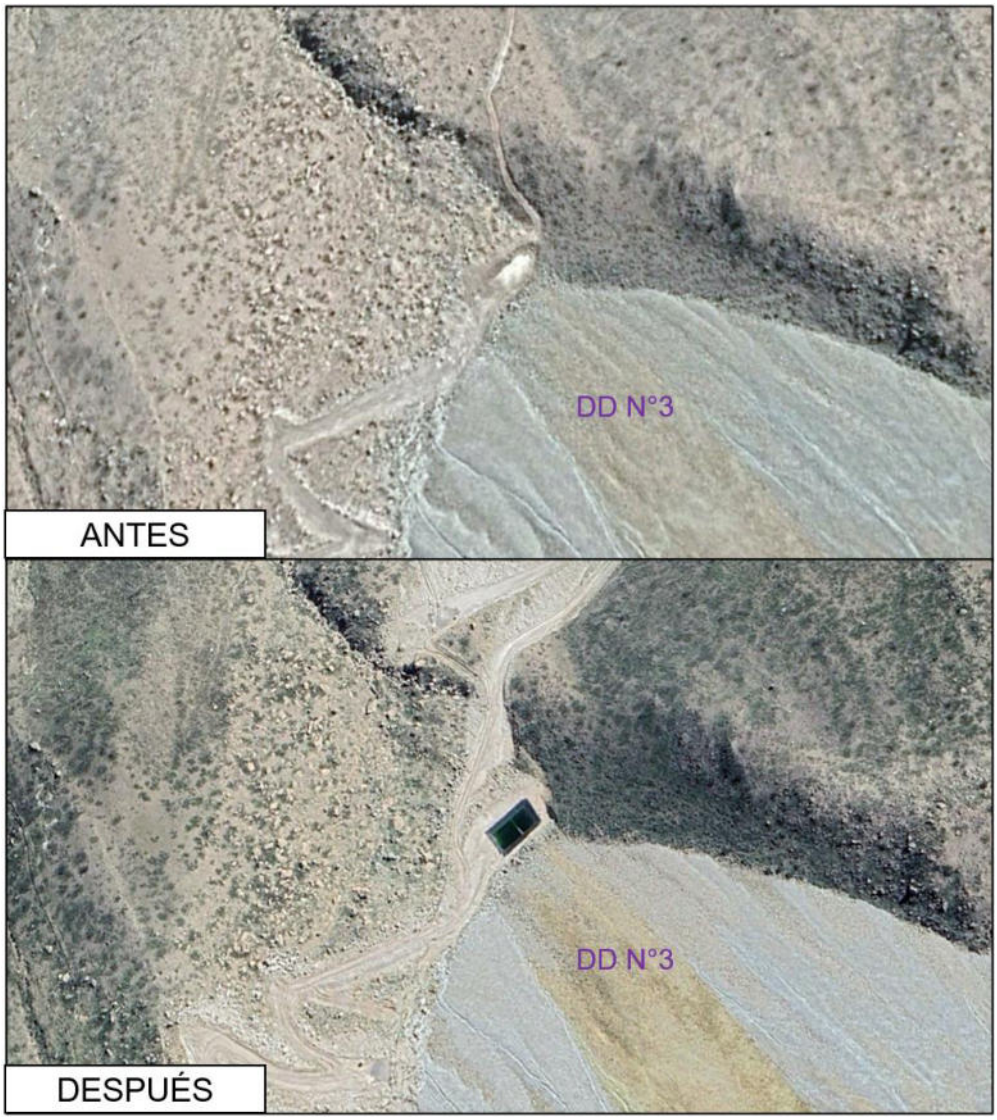
Nota. Fotografía tomada en la zona 2.

En la Figura 17 se muestra el antes y después de los trabajos realizados en la zona 1, que incluyen: habilitación de accesos, poza de

captación con revestimiento, cunetas de captación e instalación de tubería HDPE hacia dique de retención para su futuro aprovechamiento en la operación minera.

Figura 17

Antes y después, trabajos en la zona 1.



Nota. Imágenes tomadas de Google Earth Pro.

En la Figura 18 se muestra el antes y después de los trabajos realizados en la zona 2, que incluyen: habilitación de accesos, poza de captación con revestimiento, cuneta de captación e instalación de tubería HDPE hacia dique de retención para su futuro aprovechamiento en la operación minera.

Figura 18

Antes y después, trabajos en la zona 2.



Nota. Imágenes tomadas de Google Earth Pro.

En la Figura 19 se muestra el antes y después de los trabajos realizados en la zona 3, que incluyen: habilitación y construcción de accesos, poza de captación con revestimiento, canal de captación con revestimiento, cuneta de captación e instalación de tubería HDPE hacia dique de retención para su futuro aprovechamiento en la operación minera.

Figura 19

Antes y después, trabajos en la zona 3.



Nota. Imágenes tomadas de Google Earth Pro.

3.5.3. Costos

Para determinar el costo total del proyecto, es importante calcular las horas máquina y las horas hombre, adicionando el costo de los materiales empleados.

En Tabla 6 se detalla las horas máquina por zonas de trabajo de los equipos pesados utilizados en la ejecución del proyecto de un diseño de captación de escorrentías en la base de los depósitos de desmonte 3-5.

Tabla 6

Horas máquina por zonas de trabajo.

Equipo	Días hábiles			Horas			Subtotal (Hrs)
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3	
Excavadora	31	52	55	372	624	660	**1,656**
Tractor	2	20	14	24	240	168	**432**
Motoniveladora	0	4	2	0	48	24	**72**
Martillo Hidráulico	6	0	0	72	0	0	**72**
Cargador Frontal	13	20	31	156	240	372	**768**

Nota. Horas máquina ejecutadas por zona de trabajo (elaboración propia).

En Tabla 7 se detalla las horas hombre por zonas de trabajo del personal a cargo de la ejecución del proyecto de un diseño de captación de escorrentías en la base de los depósitos de desmonte 3-5.

Tabla 7

Horas hombre por zonas de trabajo.

Descripción	Días hábiles			Horas			Subtotal (Hrs)
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3	
Supervisores	29	52	63	348	624	756	**1,728**
Operadores y obreros	106	174	226	1,272	2,088	2,712	**6,072**

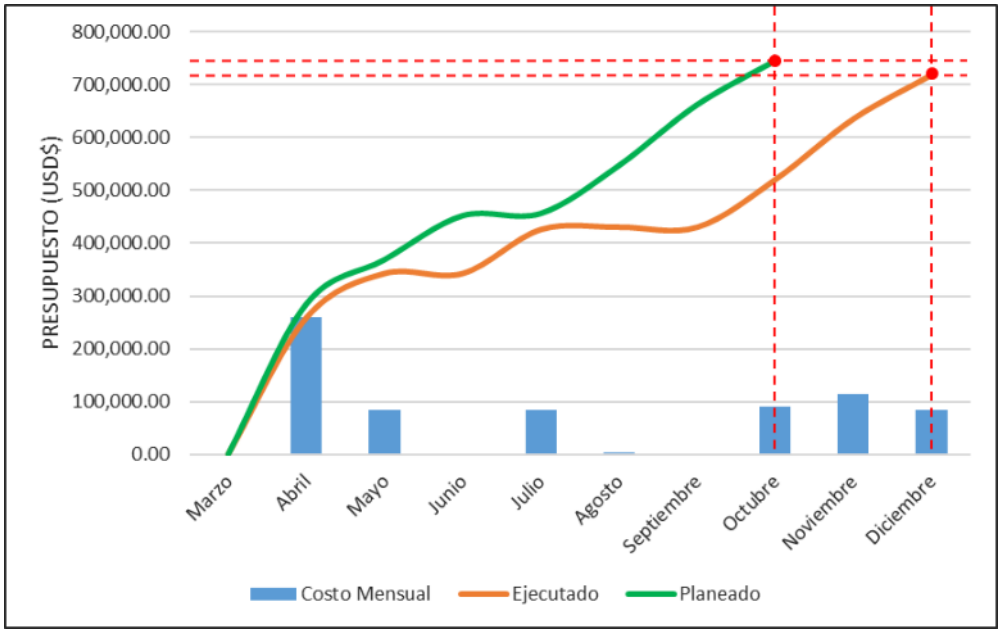
Nota. Horas hombre ejecutadas por zona de trabajo (elaboración propia).

Con las horas máquina y horas hombre definidas, más el costo de los materiales empleados, la ejecución del proyecto significó un costo general de USD$ 719,822.57 que se detalla en el Anexo 16, menor al costo planeado de USD$ 745,796.10.

Se realizó el análisis de Valor Ganado del proyecto, contrastando el costo actual (AC), valor planeado (PV) y el valor ganado (EV) mensual y acumulado como se muestra en la Figura 20.

Figura 20

Análisis de Valor Ganado del proyecto.



Nota. Elaboración propia.

El análisis del Schedule Performance Index (SPI), da un valor menor que 1 donde, para el tiempo, el valor ganado es menor con respecto al valor planeado, lo que significa que hubo un atraso en la ejecución del proyecto de aproximadamente dos meses.

El análisis del Cost Performance Index (CPI), da un valor mayor que 1 donde, para el costo, el valor ganado es mayor con respecto al costo actual, lo que significa que hubo un ahorro de USD$ 25,973.53 en el costo total del proyecto.

Para enfrentar el atraso de la ejecución del proyecto, se tomó la decisión de reducir la construcción de cuatro pozas de captación a tres pozas, lo que significó la reducción de utilización de personal, equipos y materiales.

3.6. Análisis de datos

3.6.1. Diagrama de Ishikawa

Con el objetivo de identificar estructuralmente las causas que contribuyen a la contaminación de una cuenca hidrográfica por escorrentías no controladas en la mina superficial en estudio, se elaboró un diagrama de Ishikawa (causa-efecto). Esta herramienta gráfica permite para el presente

proyecto visualizar de manera ordenada los factores que originan el problema en mención, clasificándolos en categorías que facilitan su análisis.

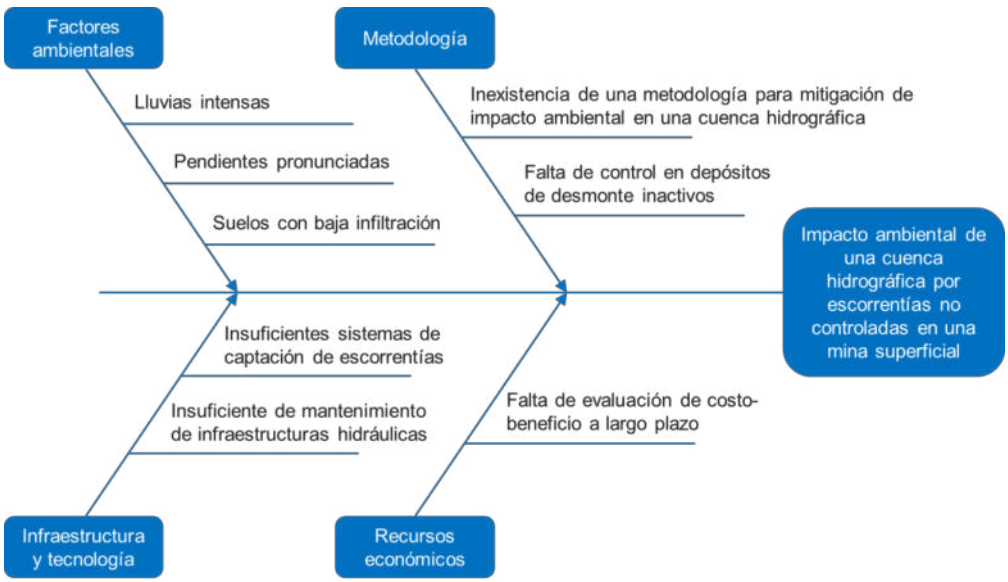
En el presente proyecto, las categorías consideradas incluyen:

- **Metodología** (inexistencia de una metodología para mitigación de impacto ambiental en una cuenca hidrográfica, falta de control en depósitos de desmonte inactivos).
- **Factores ambientales** (lluvias intensas, pendientes pronunciadas, suelos con baja infiltración).
- **Infraestructura y tecnología** (insuficientes sistemas de captación de escorrentías, insuficiente mantenimiento de infraestructuras hidráulicas).
- **Recursos económicos** (falta de evaluación de costo-beneficio a largo plazo).

La aplicación de este diagrama causa-efecto (Figura 21) permite no solo comprender la complejidad del problema, sino también orientar el diseño de un sistema económicamente viable de captación de escorrentías que ataque las causas más relevantes y factibles de intervenir.

Figura 21

Diagrama de Ishikawa del proyecto.



Nota. Elaboración propia.

3.6.2. Análisis de Pareto

Con el fin de priorizar las causas más significativas que contribuyen al impacto ambiental de una cuenca hidrográfica por escorrentías no controladas, se aplicó el análisis de Pareto. Este método establece que el 20% de las causas genera el 80% de los efectos o problemas, lo que permite focalizar recursos en las acciones con mayor impacto. En el presente proyecto, el análisis de Pareto se utilizó para jerarquizar las causas identificadas en el diagrama de Ishikawa, cuantificando su magnitud de aporte al problema. Esto facilita la toma de decisiones, orientando el diseño del sistema de captación hacia aquellas intervenciones que resuelvan el mayor porcentaje del impacto ambiental con la menor inversión posible.

En la Tabla 8 se presentan las causas identificadas que contribuyen al problema de escorrentías no controladas en una cuenca hidrográfica, junto con su peso porcentual y porcentaje acumulado. La información permite priorizar los factores según su relevancia.

Tabla 8

Categorías para el análisis de Pareto.

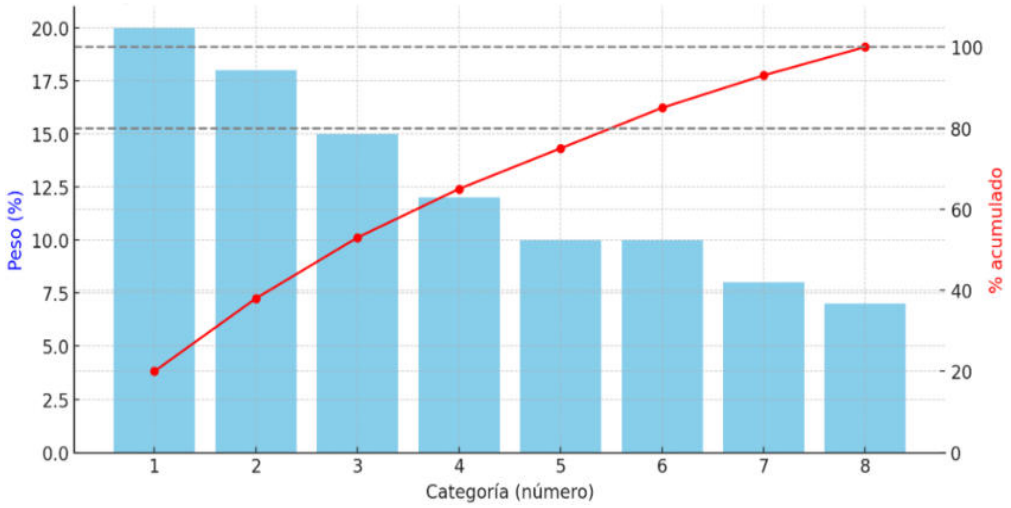
N°	Categoría	Peso (%)	% Acumulado
1	Inexistencia de una metodología para mitigación de impacto ambiental en una cuenca hidrográfica	20	20
2	Falta de control en depósitos de desmonte inactivos	18	38
3	Lluvias intensas	15	53
4	Pendientes pronunciadas	12	65
5	Suelos con baja infiltración	10	75
6	Insuficientes sistemas de captación de escorrentías	10	85
7	Insuficiente mantenimiento de infraestructuras hidráulicas	8	93
8	Falta de evaluación de costo-beneficio a largo plazo	7	100

Nota. Elaboración propia.

La Figura 22 muestra el gráfico de Pareto correspondiente, donde se observa la distribución de las frecuencias en orden descendente y la curva acumulada que indica la contribución porcentual acumulada de cada causa. Este análisis permite identificar que las primeras cuatro causas concentran alrededor del 80% del impacto total, lo que confirma la necesidad de focalizar los esfuerzos de mitigación en dichos factores para lograr una mayor efectividad en las acciones de control.

Figura 22

Diagrama de Pareto.



Nota. Elaboración propia

El análisis de Pareto evidencia que el 80% del impacto ambiental en la cuenca hidrográfica se concentra en las cuatro primeras causas identificadas: inexistencia de una metodología para mitigación de impacto ambiental (20%), falta de control en depósitos de desmonte (18%), lluvias intensas (15%) y pendientes pronunciadas (12%). Estos factores, de carácter tanto técnico como natural, representan los puntos críticos donde las acciones correctivas y preventivas tienen mayor efectividad. La distribución decreciente de las frecuencias confirma que, si bien existen causas secundarias como la baja infiltración del suelo, la insuficiencia de sistemas de captación y el mantenimiento inadecuado, su contribución al problema total es menor. En consecuencia, se recomienda priorizar la implementación de una metodología de mitigación integral, el control de depósitos y la gestión de riesgos por lluvias y pendientes, ya que la mejora en estas áreas podría generar un impacto positivo sustancial en la reducción de escorrentías y en la sostenibilidad ambiental de la cuenca hidrográfica.

3.6.3. Descripción de datos

Los datos recopilados para el presente proyecto se agruparon en tres categorías: medidas hidrológicas, medidas físicas y calidad de agua. Esta clasificación permite organizar la información y facilitar su análisis en función de los objetivos del proyecto.

Medidas hidrológicas. Incluyen los registros de precipitación, escorrentía y caudal, obtenidos mediante estaciones meteorológicas y pluviómetros instalados en puntos estratégicos de la unidad minera. Las series de precipitación se presentan en datos mensuales y anuales, complementadas con eventos de lluvia máxima diaria y umbrales para la identificación de eventos extremos. Estos datos son esenciales para cuantificar la disponibilidad hídrica, estimar el volumen de escorrentías y evaluar su variabilidad temporal.

Medidas físicas. Están relacionados con la geomorfología y las condiciones del terreno en la zona del proyecto. Se incluyen datos de pendiente media, tipo de suelo, capacidad de infiltración, cobertura vegetal y estado de la infraestructura hidráulica existente. Estos indicadores permiten identificar factores naturales y antrópicos que influyen en la generación y el transporte de escorrentías.

Calidad de agua. En el presente proyecto no se realizaron mediciones directas de parámetros físico–químicos del agua en la cuenca. Sin embargo, a partir de las características geológicas de la zona y de la naturaleza de la actividad minera, se presume que las escorrentías superficiales podrían contener aguas ácidas generadas por el contacto del agua con minerales sulfurados expuestos. Esta condición puede conllevar la presencia de metales disueltos, y una disminución significativa del pH, afectando potencialmente la calidad del agua en cuerpos receptores aguas abajo.

3.6.4. Procesamiento de datos

El procesamiento de los datos tuvo como finalidad transformar la información recopilada en formatos homogéneos y listos para el análisis estadístico y gráfico. En primer lugar, se realizó una revisión y depuración de los registros, eliminando valores no numéricos y verificando la coherencia de las series temporales. Esta depuración consistió principalmente en la

corrección de celdas que contenían símbolos o texto en lugar de valores de precipitación. Posteriormente, se llevó a cabo la estandarización de unidades, unificando la precipitación en milímetros (mm) y el caudal en metros cúbicos por segundo (m^3/s), así como los formatos de fecha para garantizar un orden cronológico correcto. En cuanto a los cálculos derivados, se obtuvieron los totales anuales de precipitación a partir de los registros mensuales, así como la precipitación media anual, los valores máximos mensuales y la identificación de eventos extremos, definidos según un umbral previamente establecido. Finalmente, la información fue preparada para su análisis mediante herramientas estadísticas y de visualización, lo que permitió generar gráficos de series temporales, histogramas, diagrama de Pareto y otros recursos gráficos empleados en este estudio.

3.6.5. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó sobre la serie de precipitación total anual registrada de los últimos 10 años (Tabla 9), a partir de los datos procesados en la etapa anterior. Los valores anuales oscilaron entre un mínimo de 61.0 mm (año 8) y un máximo de 376.2 mm (año 10), con una precipitación media anual de 204.53 mm y una desviación estándar de 105.22 mm, lo que evidencia una marcada variabilidad interanual.

Tabla 9

Precipitación total anual.

Año	Precipitación total anual (mm)
Año 1	221.10
Año 2	274.50
Año 3	186.10
Año 4	62.10
Año 5	180.30
Año 6	122.40
Año 7	329.85
Año 8	61.00
Año 9	231.80
Año 10	376.20

Nota. Elaboración propia.

Para complementar la caracterización de la serie, se calcularon los percentiles estadísticos, obteniéndose un P25 de 136.88 mm, un P50 (mediana) de 203.6 mm y un P75 de 263.83 mm. Estos indicadores (Tabla 10) muestran que la mayoría de los años presentan precipitaciones inferiores a 270 mm, y que solo en años puntuales se superan ampliamente estos valores.

Tabla 10

Estadísticas generales.

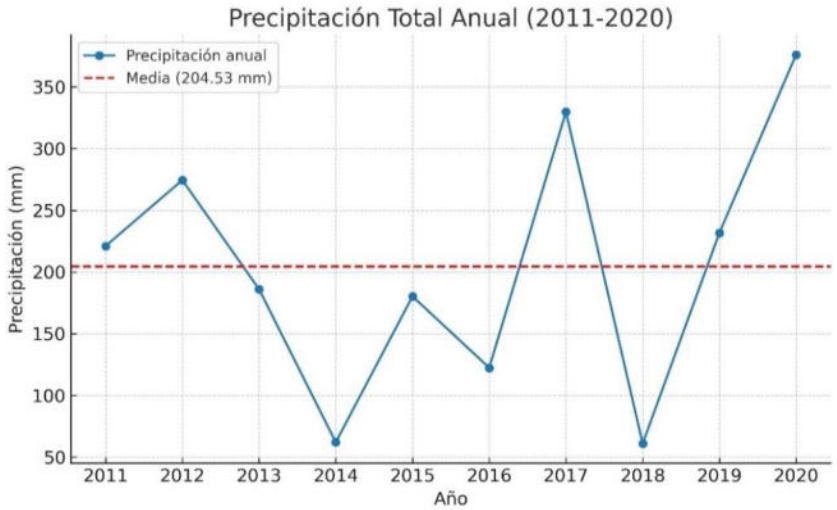
Estadístico	Valor (mm)
Media	204.54
Mínimo	61.00
Máximo	376.20
Desviación estándar	105.22
P25	136.88
Mediana (P50)	203.60
P75	263.83

Nota. Elaboración propia.

La representación gráfica (Figura 23) mediante la serie temporal muestra la distribución de los totales anuales y la ocurrencia de picos aislados de precipitación, sin una tendencia sostenida al aumento o disminución.

Figura 23

Gráfico de serie temporal de precipitación anual.

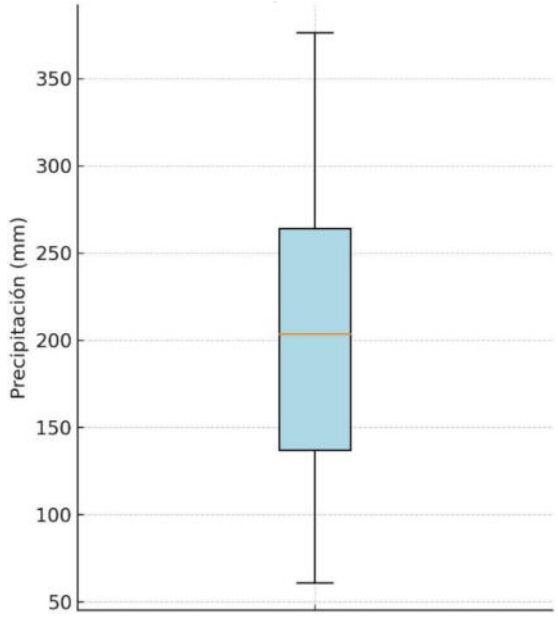


Nota. Elaboración propia.

Por su parte, el diagrama de caja (Figura 24) mostró una distribución asimétrica con presencia de valores extremos, correspondientes a años particularmente secos y húmedos.

Figura 24

Diagrama de caja de precipitación anual (Año 1 - Año 10).



Nota. Elaboración propia.

Este análisis estadístico proporciona una base cuantitativa sólida para la estimación de la disponibilidad hídrica en la cuenca y para dimensionar el sistema de captación de escorrentías, considerando la variabilidad y los eventos atípicos que pueden condicionar su operación y eficiencia.

3.6.6. Interpretación

La interpretación de los resultados obtenidos a partir del procesamiento y análisis estadístico de los datos permite comprender la dinámica hidrológica de la cuenca hidrográfica y su relación con los factores físicos y ambientales que influyen en la generación de escorrentías no controladas. El comportamiento de la precipitación anual durante los últimos 10 años muestra una alta variabilidad interanual, con años extremadamente secos (Año 8: 61.0 mm) y años inusualmente húmedos (Año 10: 376.2 mm). Esta variabilidad, confirmada por una desviación estándar equivalente al 51.5 % de la media anual, evidencia la ocurrencia de condiciones que pueden comprometer tanto la estabilidad de la cuenca como la eficiencia de los

sistemas de captación de escorrentías. La serie temporal y el diagrama de caja permitieron visualizar la recurrencia de estos eventos atípicos, reforzando la necesidad de diseñar infraestructuras flexibles y adaptables a escenarios extremos.

Por otra parte, el análisis de las características físicas de la cuenca confirmó que la presencia de pendientes pronunciadas, suelos de baja infiltración y deficiencias en la cobertura vegetal son factores que intensifican la escorrentía superficial. Estas condiciones, sumadas a la insuficiencia y falta de mantenimiento de las infraestructuras hidráulicas existentes, agravan la magnitud del arrastre de sedimentos y el riesgo de impacto ambiental aguas abajo.

Asimismo, aunque no se cuenta con datos directos de calidad de agua, se presume técnicamente la posible generación de aguas ácidas debido al contacto de las escorrentías con minerales sulfurosos expuestos. Este aspecto, aun sin cuantificación experimental, representa un riesgo ambiental significativo que refuerza la necesidad de contar con un sistema de captación que reduzca la exposición del agua a dichos minerales.

Finalmente, el uso de herramientas de análisis cualitativo y cuantitativo, como el diagrama de Ishikawa y el análisis de Pareto, permitió identificar las principales causas que originan el problema de la cuenca. En particular, se determinó que la falta de una metodología clara de mitigación, la deficiente gestión de los depósitos de desmonte inactivos, la ocurrencia de lluvias intensas y las pendientes pronunciadas concentran cerca del 80 % de los factores de impacto. Este hallazgo orienta los esfuerzos de mitigación hacia las causas de mayor peso, incrementando la eficiencia de las medidas a implementar.

En conjunto, la interpretación de los resultados evidencia que la problemática de las escorrentías en la cuenca es consecuencia de la interacción entre factores naturales (precipitación, topografía, suelos) y antrópicos (manejo inadecuado de desmonte, ausencia de infraestructura eficiente, falta de mantenimiento). Esta visión integrada constituye la base para el diseño del sistema de captación económicamente viable, cuyo propósito es mitigar los impactos ambientales y garantizar una gestión sostenible de los recursos hídricos en la operación minera.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presenta los resultados obtenidos a partir del análisis hidrológico y físico de la cuenca hidrográfica y del diseño del sistema de captación de escorrentías propuesto. El objetivo es contrastar la situación actual de la cuenca con el escenario proyectado tras la implementación del sistema, a fin de cuantificar la reducción del caudal de escorrentías que ingresa al sistema natural y valorar su incidencia en la mitigación del impacto ambiental, además de demostrar la ventaja económica de la implementación del sistema en contraste del costo que significaría la remediación de una posible contaminación de la cuenca y las multas impuestas por la autoridad competente.

En primer lugar, se caracteriza el escenario actual con base en la variabilidad de la precipitación y las condiciones físicas que favorecen la generación de escorrentías superficiales, describiendo el diseño y funcionamiento del sistema de captación, incluyendo sus criterios técnicos y parámetros operativos. Luego se desarrolla el escenario proyectado con la implementación del sistema, estimando el caudal captado y el caudal residual que continúa hacia la cuenca, con su respectiva comparación respecto del escenario actual. Posteriormente, se incorpora el análisis de costo-beneficio, contrastando la inversión y operación del sistema frente a los costos potenciales de no implementarlo (multas y remediación por eventos de contaminación). Finalmente, se presenta la discusión de resultados, integrando la evidencia hidrológica y económica para evaluar la viabilidad técnica y ambiental de la propuesta.

4.1. Escenario actual de la cuenca hidrográfica

El análisis de la información hidrológica de la cuenca durante el año 1 al año 10 evidencia una marcada variabilidad interanual en los registros de precipitación. Los totales anuales fluctuaron entre un mínimo de 61.0 mm en el año 8 y un máximo de 376.2 mm en el año 10, con una media de 204.5 mm y una desviación estándar de 105.2 mm, equivalente al 51.5 % de la media. Esta dispersión refleja la ocurrencia de años extremadamente secos y húmedos, situación que incrementa la incertidumbre en la disponibilidad hídrica y potencia los riesgos de escorrentías no controladas.

Las características físicas de la cuenca constituyen un factor adicional de vulnerabilidad. La topografía está marcada por pendientes pronunciadas, lo que favorece la aceleración del flujo superficial y el arrastre de sedimentos. A ello se suma la presencia de suelos de baja capacidad de infiltración y una cobertura vegetal limitada, lo que reduce la capacidad natural de retención de agua y acentúa la generación de escorrentías superficiales. La existencia de depósitos de desmonte inactivos con manejo inadecuado añade un riesgo adicional, ya que estos pueden erosionarse fácilmente y aportar sedimentos hacia los cauces naturales.

En términos cuantitativos, bajo las condiciones actuales, el caudal pico de escorrentía que ingresa a la cuenca hidrográfica (estimado en el ítem 3.5.1) alcanza los 0.054 m^3/s (54 l/s). Este valor constituye la línea base para el análisis comparativo con el escenario proyectado con la implementación del sistema de captación.

Si bien no se dispone de mediciones directas de calidad de agua, se presume técnicamente la generación de aguas ácidas debido al contacto de las escorrentías con materiales sulfurosos expuestos. Este aspecto representa un riesgo ambiental significativo para los cuerpos receptores situados aguas abajo, ya que puede deteriorar la calidad del recurso hídrico y afectar la estabilidad ecológica de la cuenca.

En conjunto, el escenario actual se caracteriza por una combinación de alta variabilidad climática, condiciones físicas desfavorables y un caudal de escorrentía significativo, que en ausencia de medidas de control se traduce en impactos potenciales por arrastre de sedimentos. Esta situación justifica la necesidad de diseñar e implementar un sistema de captación que permita regular y mitigar dichos efectos, asegurando una gestión más sostenible del recurso hídrico en el contexto minero.

4.2. Diseño y funcionamiento del sistema de captación de escorrentías

El diseño del sistema de captación de escorrentías se fundamenta en las condiciones hidrológicas y físicas de la cuenca hidrográfica, identificadas en el escenario actual. El objetivo principal es reducir el caudal de escorrentías que ingresan a la cuenca hidrográfica, evitando procesos erosivos, arrastre de sedimentos y el potencial transporte de contaminantes asociados a los depósitos de desmonte.

El sistema propuesto se compone de infraestructuras hidráulicas de interceptación, conducción, almacenamiento y descarga controlada. El caudal pico de diseño considerado es de 0.054 m³/s (54 l/s), sobre el cual se dimensionaron los componentes principales del sistema.

Entre los elementos más relevantes se incluyen:

- **Canales y cunetas de captación:** estructuras superficiales dispuestas para interceptar y conducir las escorrentías hacia puntos de control, evitando que alcancen zonas sensibles.
- **Pozas de captación:** permiten regular temporalmente el caudal interceptado, disminuyendo el volumen que ingresa de manera directa a la cuenca y favoreciendo procesos de sedimentación de partículas sólidas.
- **Cámaras disipadoras de energía:** diseñadas para reducir la velocidad del flujo y minimizar procesos erosivos en el recorrido del agua.
- **Descargas controladas:** salidas a través de tuberías HDPE diseñadas para liberar el agua captada en forma regulada, de modo que se reduzca el impacto sobre los cauces receptores y se minimice la probabilidad de desbordes.

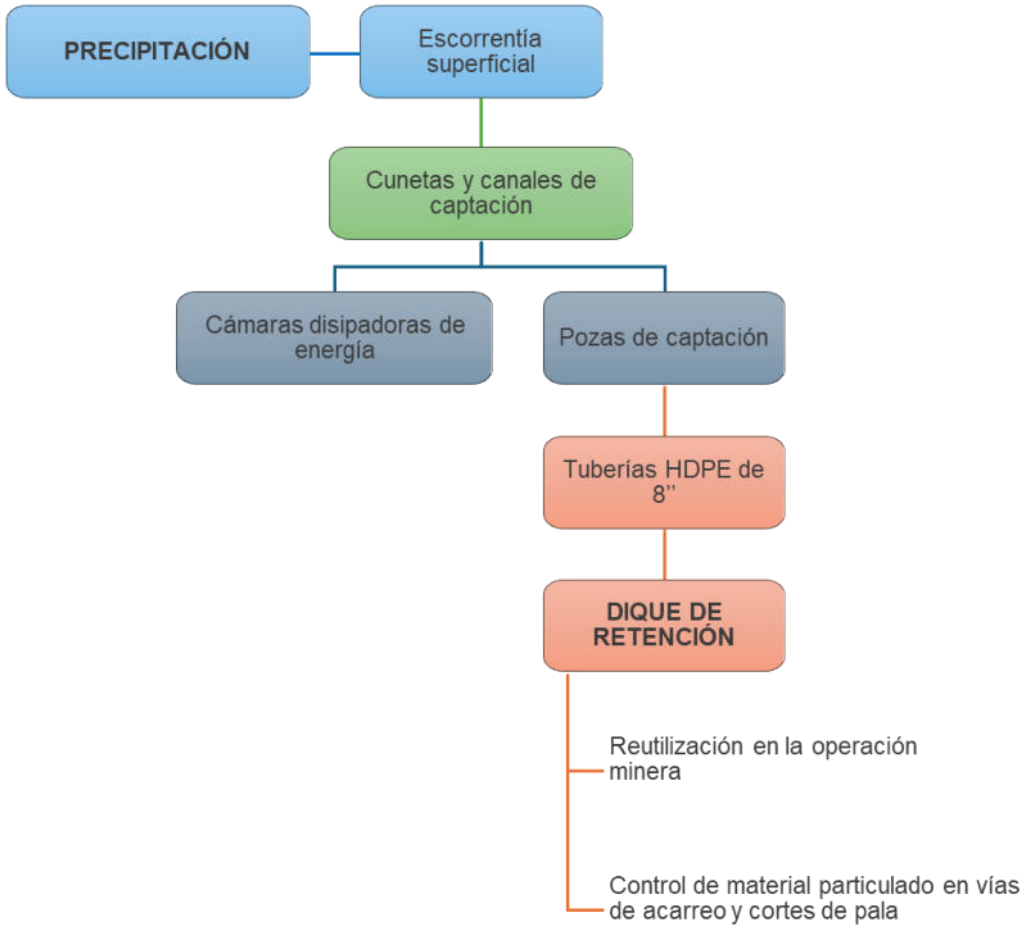
En el Anexo 17 se presenta el plano general del sistema de captación de escorrentías, en el cual se muestra la distribución espacial de las estructuras principales que conforman el proyecto. Asimismo, se indica la dirección del flujo superficial de las aguas de lluvia, desde las zonas más elevadas hasta el dique de retención. A partir del plano general se observa que las cunetas y canales se ubican en las laderas con mayor generación de escorrentías, permitiendo interceptar y encauzar el flujo hacia las pozas de captación. Cada poza tiene una capacidad promedio de 400 m³ y se encuentra revestida con geomembrana y geotextil, lo cual garantiza su impermeabilidad y durabilidad. Las tuberías HDPE facilitan la descarga controlada desde las pozas hacia el dique de retención para su posterior reutilización en procesos internos de la mina.

El funcionamiento del sistema se basa en un esquema de captación, regulación y liberación controlada, que asegura que los picos de escorrentía producidos durante eventos de lluvia intensa sean interceptados antes de ingresar a la cuenca. Con ello, se contribuye a reducir la presión hidrológica, los procesos de erosión y los riesgos de transporte de contaminantes hacia aguas abajo.

Con el propósito de representar de manera clara el funcionamiento hidráulico del sistema, se elaboró un diagrama de flujo que resume el proceso de captación, conducción y disposición final de las escorrentías (Figura 25).

Figura 25

Diagrama de flujo del sistema de captación de escorrentías.



Nota. Elaboración propia.

Como se observa, el proceso inicia con la precipitación pluvial, que genera escorrentía superficial sobre el terreno. Dicha escorrentía es interceptada por cunetas y canales de captación, los cuales la conducen hacia cámaras disipadoras de energía y pozas de captación. Posteriormente, mediante tuberías de conducción, el agua se transfiere hacia el dique de retención.

En síntesis, el sistema de captación de escorrentías constituye una medida de gestión integrada, cuyo diseño se sustenta en los parámetros hidrológicos obtenidos y cuya operación busca garantizar un balance más sostenible entre la actividad minera y la protección de la cuenca hidrográfica.

4.3. Escenario proyectado con implementación del sistema

La implementación del sistema de captación de escorrentías modifica de manera significativa el comportamiento hidrológico de la cuenca. A diferencia del escenario actual, en el que el caudal pico de diseño alcanza 0.054 m³/s (54 l/s), el sistema permite interceptar, regular y liberar de manera controlada una fracción importante de dicho flujo, reduciendo así la presión hidrológica sobre los cauces receptores.

El caudal que efectivamente ingresará a la cuenca tras la implementación del sistema, denominado caudal residual (Q_{res}), se estimó mediante un balance hidráulico simple que relaciona el caudal actual (Q_{actual}) con la eficiencia de captura (η) del sistema:

$$Q_{res} = (1 - \eta) \times Q_{actual} \quad (3)$$

Donde:

Q_{res} : Caudal residual (m^3/s)
η : Eficiencia de captura
Q_{caudal} : Caudal actual (m^3/s)

Este planteamiento se sustenta en la metodología de análisis hidrológico para obras de regulación superficial, donde la eficiencia de control refleja la capacidad del sistema para reducir el caudal de entrada a un cuerpo receptor (Chow, Maidment y Mays, 1988, p. 201).

Con base en la revisión de experiencias similares y en las características del diseño propuesto, se definieron tres escenarios de eficiencia hidráulica: conservador (65 %), objetivo (75 %) y óptimo (85 %). Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11

Escenarios de eficiencia de captura y caudal residual proyectado.

Escenario	Eficiencia de captura (η)	Q_{res} (m^3/s)	Q_{res} (l/s)
Conservador	0.65	0.0189	18.9
Objetivo	0.75	0.0135	13.5
Óptimo	0.85	0.0081	8.1

Nota. Elaboración propia.

En el escenario objetivo, considerado como el más realista en condiciones normales de operación y mantenimiento, el caudal pico que ingresaría a la cuenca se reduciría de 0.054 m³/s a 0.0135 m³/s (13.5 l/s). Esta disminución representa una reducción del 75 % del caudal pico y constituye un efecto significativo en la mitigación de impactos asociados a la escorrentía superficial.

La reducción del caudal no solo atenúa los procesos de erosión y transporte de sedimentos, sino que también limita la interacción del agua con los depósitos de desmonte, disminuyendo la probabilidad de generación aguas ácidas y, con ello, los riesgos de impacto ambiental aguas abajo.

En conclusión, el escenario proyectado con el sistema de captación de escorrentías evidencia una mejora sustancial en la gestión hidrológica de la cuenca, proporcionando una base técnica para la evaluación económica y ambiental.

4.4. Análisis costo-beneficio del proyecto

El análisis de costo-beneficio tiene como objetivo determinar la viabilidad económica y ambiental del sistema de captación de escorrentías propuesto, comparando los costos de implementación con los costos evitados.

El costo total del proyecto ya ha sido estimado previamente y abarca todos los gastos relacionados con la construcción, instalación y puesta en marcha del sistema de captación de escorrentías y representa un total de USD$ 719,822.57 que al tipo de cambio promedio (3.65 soles) resulta un aproximado de S/ 2’600,000.00. Además, el costo de mantenimiento del sistema de captación de escorrentías se estima en un 5% del costo total del proyecto por año.

De acuerdo con la legislación peruana (Ley N° 29325: Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental), las multas por incumplimiento de normas ambientales pueden alcanzar hasta 100 UITs por medidas cautelares y hasta 100 UITs por medidas correctivas. Con el valor actual (2025) de la UIT en S/ 5,350.00, el costo estimado de las multas sería de S/ 1’050,000.00.

En el supuesto de que no se implemente el sistema y se produzca una contaminación de la cuenca hidrográfica por residuos ácidos de mina, el costo de remediación de una cuenca de 1.7 km² depende del método de remediación

empleado, para lo cual se tomaron como referencia tres tecnologías de tratamiento pasivo:

- **Humedales Artificiales:** Estos sistemas imitan los procesos naturales de los humedales para tratar aguas contaminadas. Utilizan plantas y microorganismos para neutralizar la acidez y precipitar metales pesados. Son una opción sostenible y de bajo costo para áreas con espacio disponible (Denegri y Iannacone, 2020).

- **Drenajes Anóxicos Calizos (ALD):** Consisten en canales revestidos con materiales alcalinos como caliza o dolomita. El agua ácida pasa por estos canales, donde se neutraliza la acidez y se precipitan metales. Son efectivos y requieren una inversión moderada (Lipaca, 2015).

- **Biorremediación con Bacterias Reductoras de Sulfato (SRB):** Estas bacterias convierten el sulfato en sulfuro, lo que ayuda a neutralizar la acidez y precipitar metales pesados. Este proceso biológico es económico y puede integrarse en sistemas existentes (Medina y Rojas, 2019).

Para las condiciones específicas del proyecto con un área de cuenca aproximada de 1.7 km^2, se estimaron cifras aproximadas de costo de remediación en dólares según la tecnología empleada, y se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12

Costos de remediación por tecnología empleada.

Tecnología	Costo por m^2 (USD$)	Costo Total por 1.7 km^2 (USD$)
Humedales Artificiales	10 - 30	17’000,000 - 51’000,000
Drenajes Anóxicos Calizos	3 - 5	5’100,000 - 8’500,000
Biorremediación	1 - 3	1’700,000 - 5’100,000

Nota. Elaboración propia.

Para en análisis de costo-beneficio consideramos el costo de remediación más económico, que es por la tecnología de biorremediación con bacterias reductoras de sulfato, resultando un valor de USD$ 1’700,000.00, y con el tipo de cambio (3.65 soles) resulta un costo de remediación aproximado de S/ 6’200,000.00 por 20 años de tiempo de vida.

4.4.1. Comparación de Costos y Beneficios

Realizamos una evaluación comparativa entre los costos asociados a la implementación del sistema de captación de escorrentías y los beneficios que se obtendrían al evitar posibles costos adicionales.

Los costos de implementación incluyen el costo total del proyecto como los gastos asociados a la construcción, instalación y puesta en marcha del sistema. Este monto considera la inversión inicial de S/ 2’600,000 y el mantenimiento por 20 años que asciende a la suma de S/ 2’600,000, lo que asegura la operatividad y eficiencia a largo plazo.

Los costos de multas y remediación se han estimado en un valor de hasta 200 UITs por medidas cautelares y correctivas, y el costo de remediación de la cuenca en caso de no implementar el sistema se ha estimado en S/ 6’200,000.

Los beneficios evitados implican multas ambientales significativas y el costo de remediar la cuenca en caso de contaminación. Se estima un ahorro total de aproximadamente S/ 2’050,000, sumando las multas evitadas y el costo de remediación tal como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13

Comparación de costos y beneficios.

Concepto	Descripción	Monto estimado (S/)
Costo de implementación	Inversión inicial del proyecto	2’600,000
Costo de mantenimiento	5% anual del costo total por 20 años	2’600,000
Costos de multas	Multas ambientales (200 UITs)	1’050,000
Costo de remediación	Remediación por 20 años	6’200,000
Beneficios evitados	Ahorro por evitar multas y remediación	2’050,000

Nota. Elaboración propia.

Al comparar los costos totales del proyecto con los beneficios evitados, se demuestra que la inversión inicial se justifica, ya que los beneficios económicos y ambientales superan el costo de implementación y mantenimiento.

Este análisis demuestra que, además de los beneficios ambientales, la implementación del sistema de captación de escorrentías también representa un ahorro económico significativo a largo plazo (periodo de 20 años).

4.5. Discusión de resultados

En esta sección, se analizaron e interpretaron los resultados obtenidos del análisis de costo-beneficio del proyecto, considerando tanto los aspectos económicos como los ambientales.

La inversión inicial del proyecto es de S/ 2’600,000, y se estima un costo de mantenimiento de S/ 2’600,000 a lo largo de 20 años, sumando un costo total del proyecto de S/ 5’200,000. Antes de la implementación del sistema, el caudal de escorrentías que ingresaba a la cuenca era de 0.054 m^3/s (54 l/s), lo cual generaba un riesgo significativo de impacto ambiental negativo. Con la implementación del sistema de captación, el caudal residual se reduce a 0.0135 m^3/s (13.5 l/s), lo que disminuye considerablemente el riesgo de contaminación y mejora la calidad ambiental de la cuenca.

El proyecto permite evitar multas ambientales que ascienden a un monto máximo de S/ 1’050,000 y costos de remediación de S/ 6’200,000 considerando una remediación de bajo costo, sumando un total de S/ 7’250,000 en beneficios evitados.

El beneficio total evitado, al restar el costo de implementación y mantenimiento, asciende a S/ 2’050,000, como ahorro neto. La comparación entre el costo total del proyecto y los beneficios evitados demuestra que la inversión se justifica plenamente. Además de los beneficios económicos, el proyecto contribuye a la protección del medio ambiente, al reducir drásticamente el caudal con posible contenido de aguas ácidas y cumplir con las normativas vigentes.

Los hallazgos de esta investigación se alinean con las tendencias actuales en la gestión de aguas ácidas y en la protección de los recursos hídricos. A nivel internacional, los estudios de Torres (2019), Avelar et al. (2019) y Pérez (2019) en Cuba y México se enfocan en la captación de agua de lluvia con fines domésticos

y de consumo humano, un objetivo distinto al planteado en la presente tesis. No obstante, el énfasis de dichos trabajos en la viabilidad y diseño de sistemas de captación constituye un punto de conexión relevante. Por otra parte, investigaciones como las de Oregón y Mora (2013) en Chile y, Zamora y Trujillo (2016) en Bolivia presentan mayor pertinencia, al abordar tanto la gestión de aguas ácidas como la factibilidad económica de tratamientos. La diferencia principal radica en que, mientras esos estudios se orientan al tratamiento de aguas ácidas ya generadas, la presente investigación introduce un enfoque preventivo, diseñando un sistema que intercepta las escorrentías antes de su contaminación. Esta perspectiva refuerza la idea, también respaldada en la literatura, de que la inversión inicial en prevención resulta más rentable que los costos de remediación posteriores.

En el contexto nacional, se observa que los trabajos de Llecllish y Díaz (2022) se enfocan en técnicas de tratamiento de aguas ácidas, mientras que Ampuero y Barboza (2020) y Terán (2020) analizan métodos específicos como los sistemas pasivos y la electrólisis. En contraste, la presente tesis complementa dichos aportes al proponer una solución preventiva. De manera similar, aunque Quispe (2020) y Sánchez y Ulloque (2020) estudiaron el diseño de pozas y botaderos, sus objetivos se orientaron al almacenamiento de aguas o materiales de baja ley, por lo que difieren del propósito de este trabajo, centrado en la mitigación de aguas ácidas. En este sentido, resulta particularmente relevante el trabajo de Álvaro (2006), quien enfatiza la importancia de los métodos pasivos de prevención, una idea que se vincula directamente con el objetivo de este estudio de evitar el contacto entre el agua y los sulfuros.

En el ámbito local, el estudio de Cereceda et al. (2016) en Moquegua identificó las fuentes geogénicas de generación de aguas ácidas, lo que constituye un antecedente útil para la justificación del problema. Sin embargo, la presente investigación va más allá de determinar el origen de aguas ácidas al proponer una solución de ingeniería viable para su mitigación. De esta manera, el aporte de esta tesis radica en ofrecer una alternativa concreta, técnica y económicamente viable, orientada a la gestión de una cuenca hidrográfica específica.

Finalmente, el diseño del sistema de captación de escorrentías se plantea como una estrategia efectiva y rentable frente a la generación de aguas ácidas. A diferencia de numerosos estudios previos que priorizan el tratamiento, este trabajo enfatiza la prevención y demuestra, a través del análisis de costo-beneficio, un

ahorro proyectado de S/ 2’050,000. Dicho resultado constituye un aporte significativo, en tanto responde a la necesidad de la industria minera de conciliar la sostenibilidad ambiental con la viabilidad económica. Asimismo, la metodología de diseño aquí presentada puede funcionar como guía práctica para futuros proyectos, llenando un vacío en la literatura que, en su mayoría, se ha centrado en la caracterización o en el tratamiento, pero no en el diseño preventivo de sistemas de gestión de escorrentías.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

El presente proyecto permitió evaluar de manera integral los aspectos técnicos, económicos y ambientales relacionados con el diseño de un sistema de captación de escorrentías en una mina superficial. A partir del análisis hidrológico, geológico y de costo-beneficio, se planteó una propuesta de solución orientada a prevenir los impactos ambientales negativos en la cuenca hidrográfica ubicada aguas abajo de un depósito de desmonte inactivo, demostrando la viabilidad de la aplicación de infraestructura hidráulica adaptada al contexto minero.

- **Diseño del sistema:** Se ha diseñado con éxito un sistema de captación de escorrentías. El diseño incluye la ubicación estratégica de pozas de captación y canales perimetrales, con el fin de interceptar y dirigir las aguas de lluvia antes de que entren en contacto con las áreas de residuos mineros y aprovechar su uso en la operación minera. Este sistema mitiga significativamente la formación de aguas ácidas y el arrastre de sedimentos, reduciendo así el impacto ambiental negativo del agua en la cuenca.

- **Beneficios ambientales y económicos:** El diseño propuesto ofrece beneficios tanto ambientales como económicos. A nivel ambiental, asegura la protección de los recursos hídricos locales al controlar la generación de aguas ácidas y el transporte de material particulado. Económicamente, se determinó que la implementación del sistema de captación de escorrentías y su mantenimiento por 20 años (S/ 5’200,000) resulta más rentable que afrontar los costos de multas (S/ 1’050,000) y los elevados gastos de remediación de la cuenca (S/ 6’200,000). De esta manera, el análisis de costo-beneficio evidencia la viabilidad económica y preventiva del proyecto, lo que significa un ahorro aproximado de S/ 2’050,000.

- **Metodología de diseño:** La tesis presenta una metodología clara y viable para el diseño de sistemas de captación de escorrentías en minas superficiales. La metodología abarca desde la identificación de la problemática hasta el análisis hidrológico y la selección de componentes. Este enfoque sistemático puede servir como guía para futuros proyectos en minería, asegurando que se cumplan los estándares de diseño y que se logren los objetivos de mitigación ambiental de manera efectiva.

En síntesis, los resultados obtenidos confirman que la prevención es la alternativa más adecuada frente a la pasividad o la corrección posterior. El diseño de un sistema económicamente viable de captación de escorrentías no solo garantiza la protección de la cuenca hidrográfica y del ecosistema, sino que también fortalece la sostenibilidad económica y ambiental de la actividad minera, ofreciendo una solución práctica que puede ser considerada como referencia en futuros proyectos similares.

CAPÍTULO VI

RECOMENDACIONES

A partir de los resultados alcanzados en el presente proyecto, se plantean las siguientes recomendaciones técnicas, económicas y de gestión ambiental, con el propósito de asegurar la sostenibilidad y eficacia del sistema de captación de escorrentías en la mina superficial y generar lineamientos aplicables en otros contextos mineros similares.

- Se recomienda implementar el sistema de captación de escorrentías de manera inmediata, priorizando las zonas críticas identificadas en el levantamiento topográfico, con el fin de reducir el riesgo de impacto ambiental negativo en la cuenca hidrográfica durante la temporada de lluvias.

- Es necesario establecer un programa de monitoreo hidrológico y de calidad del agua, para evaluar de forma continua la efectividad de la infraestructura en la reducción de caudales con posible contenido de aguas ácidas y en la preservación de la calidad ambiental.

- Se sugiere destinar un presupuesto del 5% anual del costo total del proyecto para el mantenimiento preventivo que garantice el adecuado funcionamiento de las cunetas, canales, pozas de captación y tuberías de HDPE, evitando la acumulación de sedimentos y el deterioro de los geosintéticos.

- Se recomienda fortalecer la capacitación del personal operativo y de mantenimiento en temas de gestión hídrica, seguridad industrial y cuidado ambiental, asegurando la correcta operación del sistema y la reducción de riesgos asociados a su manipulación.

- A nivel institucional, se sugiere promover la replicación de esta metodología en otros depósitos de desmonte inactivos de la región, como parte de una política de prevención ambiental impulsada por la empresa minera y en concordancia con las disposiciones del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA).

- Finalmente, se recomienda a las autoridades competentes y a las empresas mineras priorizar inversiones preventivas en infraestructura hidráulica, ya que los resultados de este estudio demuestran que la prevención es

económicamente más viable y ambientalmente más sostenible que los procesos de remediación posteriores.

En conclusión, las recomendaciones planteadas buscan consolidar la propuesta de este proyecto como una estrategia integral de gestión hídrica en la minería superficial, asegurando no solo el cumplimiento normativo y la reducción de impactos ambientales, sino también la generación de una cultura de sostenibilidad y responsabilidad social en la industria extractiva.

CAPÍTULO VII

REFERENCIAS

Álvaro Ordoñez, R. (2006). *Tratamiento de drenaje ácido de mina en la Cía Minera Santa Luisa.* Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_815f3b6b4d986759b73c9bf66d7ca2a0/Description#tabnav

Ampuero Chavez, R., Barboza Navarro, A. (2020). *Propuesta de tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM) de la bocamina prosperidad con el método óxico calizo para cumplir con los límites máximos permisibles de descarga de efluentes, Cajamarca 2019.* Perú: Universidad Privada del Norte. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUPN_c1780d47b65ef79fb94a12ba2f207ce9

Avelar Roblero, J., Sánchez Bravo, J., Domínguez Acevedo, A., Lobato de La Cruz, C. y Mancilla Villa, O. (2019). *Validación de un prototipo de sistema captación de agua de lluvia para uso doméstico y consumo humano.* Chile: IDESIA. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292019000100053

Baquero Úbeda, J., Fernández Rubio, R., Verdejo Serrano, J. y Lorca Fernández, D. (2008). *Tratamiento de Aguas Ácidas. Prevención y Reducción de la Contaminación.* España: Revista de la Sociedad Española de mineralogía. https://www.semineral.es/websem/PdfServlet?mod=archivos&subMod=publicaciones&archivo=Macla10_44.pdf

Bellido Bravo, E. (1979). *Boletín N° 15: Geología del Cuadrángulo de Moquegua. Hoja: 35-u.* Perú: INGEMMET. https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/132

Cereceda Quintanilla, I., Vásquez Cardeña, S., Chapilliquén Neira, J., García Zavaleta, A., Santos Romero, B., Ng Cutipa, W. (2016). *Fuentes naturales de drenaje ácido: cuenca del río Tambo (Puno-Moquegua).* Perú: INGEMMET. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/INGEMMET_8ec2e591eb1a16d34a325f1393bd42e6

Chow, V., Maidment, D. y Mays, L. (1988). *Applied Hidrology*. Estados Unidos: McGraw-Hill. https://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf

Decreto Supremo N° 040-2014-EM. Reglamento de Protección y Gestión Ambiental para las Actividades de Explotación, Beneficio, Labor General, Transporte y Almacenamiento Minero. 12 de noviembre de 2014. https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/3295154-reglamento-de-proteccion-y-gestion-ambiental-para-las-actividades-de-explotacion-beneficio-labor-general-transporte-y-almacenamiento-minero-edicion-2022

Denegri, J. y Iannacone, J. (2020). *Tratamiento de Drenaje Ácido de Minas mediante Humedales Artificiales*. Perú: Universidad Ricardo Palma. https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Biotempo/article/view/3349

Henry, J. y Heinke, G. (1999). *Ingeniería Ambiental.* México: Prentice Hall. https://biblioasesorbogota.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/04/ingenieria-ambiental_glynn.pdf

Hernández Jiménez, M. (2018). *Diseño del drenaje pluvial y evaluación de impacto ambiental en Urb. El Chilcal de la ciudad de Piura.* Perú: Universidad de Piura. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UDEP_c7128fdcfc29b7c13a32cd5c2b504a1c

Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación.* México: Mc Graw Hill Education. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=775008

Ley N° 27314. Reglamento de la Ley General de Residuos Sólidos. 24 de julio de 2004. Decreto Supremo N° 057-2004-PCM. https://sinia.minam.gob.pe/normas/reglamento-ley-general-residuos-solidos

Ley N° 29325. Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental. 04 de marzo de 2009. https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=12165

Lipaca Redolfo, G. (2015). *Influencia del Tiempo de Retención y Composición del Sustrato en la Remoción de Hierro y Cobre del Drenaje Ácido de Mina en Humedales Artificiales*. Perú: Universidad Nacional de Cajamarca. https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/1553/Tesis%20Gladys%20Licapa%20pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Llecllish Ponte, P., Diaz Sheen, E. (2022). *Técnicas de tratamiento de aguas ácidas generadas por la actividad minera.* Perú: Universidad César Vallejo. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_838bf9ed575e0f7a214f27f5cbca7912

Luna Cabrera, P. (2023). *Diseño de Investigación para la propuesta de un sistema de captación, tratamiento, y reutilización de aguas especiales en una industria de producción de concreto.* Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. http://www.repositorio.usac.edu.gt/19252/1/Pedro%20Pablo%20Luna%20Cabrera.pdf

Medina Pulido, A. y Rojas Suárez, A. (2019). *Reducción de hierro (total) y sulfatos analizando procesos fisicoquímicos y microbiológicos en un biorreactor anaerobio*. Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. https://repositorio.uptc.edu.co/server/api/core/bitstreams/0cbdd623-76b0-4cc7-abfb-cbb30d294ed7/content

Mendoza Macedo, G. (2019). *Diseño Hidráulico del Sistema de Drenaje Pluvial de la Localidad de Sauce, Distrito de Sauce, Provincia de San Martín, Región San Martín.* Perú: Universidad Nacional de San Martin. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNSM_9b0ac9432e70c7a3f984fee0412243d6

Ministerio de Energía y Minas (1994). *Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas.* Perú: República del Perú. https://www.gob.pe/institucion/minem/informes-publicaciones/4699428-normas-tecnicas-para-diseno-ambiental

Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014). *Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje.* Perú: República del Perú. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf

Mongui Galvis, A., Sánchez Ávila, V. (2018). Determinación de alternativas para el manejo de aguas residuales de la mina didáctica ubicada en el centro minero - SENA Regional Boyacá. Colombia: EXPOSENA. https://core.ac.uk/download/pdf/225145986.pdf#page=34

Nieto Liñán, J., Macías Suárez, F., Ayora, C. (2015). *Tratamiento Ecológico de Drenajes Ácidos de Mina: Proyecto LIFE-ETAD.* España: Universidad de Huelva. https://www.uhu.es/fexp/sem2015/arc/macla/macla_20_103-104.pdf

Oregón Pérez, C., Mora Nercam, L. (2013). *Propuesta de un sistema de captación de aguas ácidas de drenaje mina, asociadas a las faenas mineras de CODELCO Chile, División El Teniente, Sexta Región Chile.* Chile: Universidad Academia de Humanismo Cristiano. https://bibliotecadigital.academia.cl/server/api/core/bitstreams/890aae5c-714a-41dd-b567-c9fc6ff3d097/content

Pérez Rodríguez, C. (2019). *Diseño de sistemas de recolección de agua lluvia, una apuesta por la conservación.* Colombia: Revista Espirales. https://www.redalyc.org/journal/5732/573263327002/html/

Quispe Ortiz, J. (2020). *Diseño y conformación del revestimiento con geosintéticos de una poza para almacenamiento de aguas en exceso en una empresa a tajo abierto en Cajamarca*. Perú: Universidad Privada del Norte. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUPN_585c497e21b91644bd33ddc987839824

Ramírez Sandoval, G. (2013). *Estudio técnico del tratamiento de aguas ácidas.* Perú: Universidad Nacional del Callao. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNAC_578e6bd772786cd817fbf83fad5789ae

Rocha Felices, A. (2007). *Hidráulica de tuberías y canales.* Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. https://www.academia.edu/40046489/HIDRAULICA_DE_TUBERIAS_Y_CANALES

Rodríguez Vásquez, C. (2018). *Diseño de planta de tratamiento de aguas ácidas de mina con alto contenido de manganeso y zinc.* Perú: UNI. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_b46a68f9a602570be6ed6865a5230d33

Sánchez Rodrigo, L., Ulloque Caicedo, C. (2020). *Impacto del diseño de botadero en el almacenamiento de material de baja ley en una mina a tajo abierto, Cajamarca 2019.* Perú: Universidad Privada del Norte. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUPN_084f21b2a8a5ebc15455167b78c612b8

Sgier, H., Macías, F., Nieto, J., Rötting, T. (2015). *Diseño de una planta piloto para el tratamiento pasivo de drenaje ácido de mina.* España: Universidad de Huelva. https://www.tecnoaqua.es/media/uploads/noticias/documentos/articulo-tecnico-diseno-planta-piloto-tratamiento-pasivo-drenaje-acido-mina-tecnoaqua-es.pdf

Terán Chilon, J. (2020). *Tratamiento de drenaje ácido de mina, por electrólisis para la remoción de plomo, Hualgayoc - Cajamarca 2019.* Perú: Universidad Privada del Norte. https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUPN_79168ab2a28ddca9b6b1ff43331af285

Torres Hugues, R. (2019). *La captación del agua de lluvia como solución en el pasado y el presente.* Cuba: Revista SciELO. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1680-03382019000200125

Vega Loyola, M., Villaseca Eddy, A., Contreras Contreras, R. (2015). *Evaluación de la calidad y propuesta de tratamiento del agua proveniente de la mina "Dos Carlos" en Pachuca, Hidalgo.* México: Instituto Politécnico Nacional. https://zaloamati.azc.uam.mx/server/api/core/bitstreams/4c0e399b-b316-42d0-b284-4f0bb4daa743/content

Zamora Echenique, G., Trujillo Lunario, E. (2016). *Viabilidad del tratamiento de las aguas ácidas de la mina San José - Oruro, Bolivia.* Bolivia: Universidad Técnica de Oruro. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6070039

CAPÍTULO VIII

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de Consistencia de la Investigación.

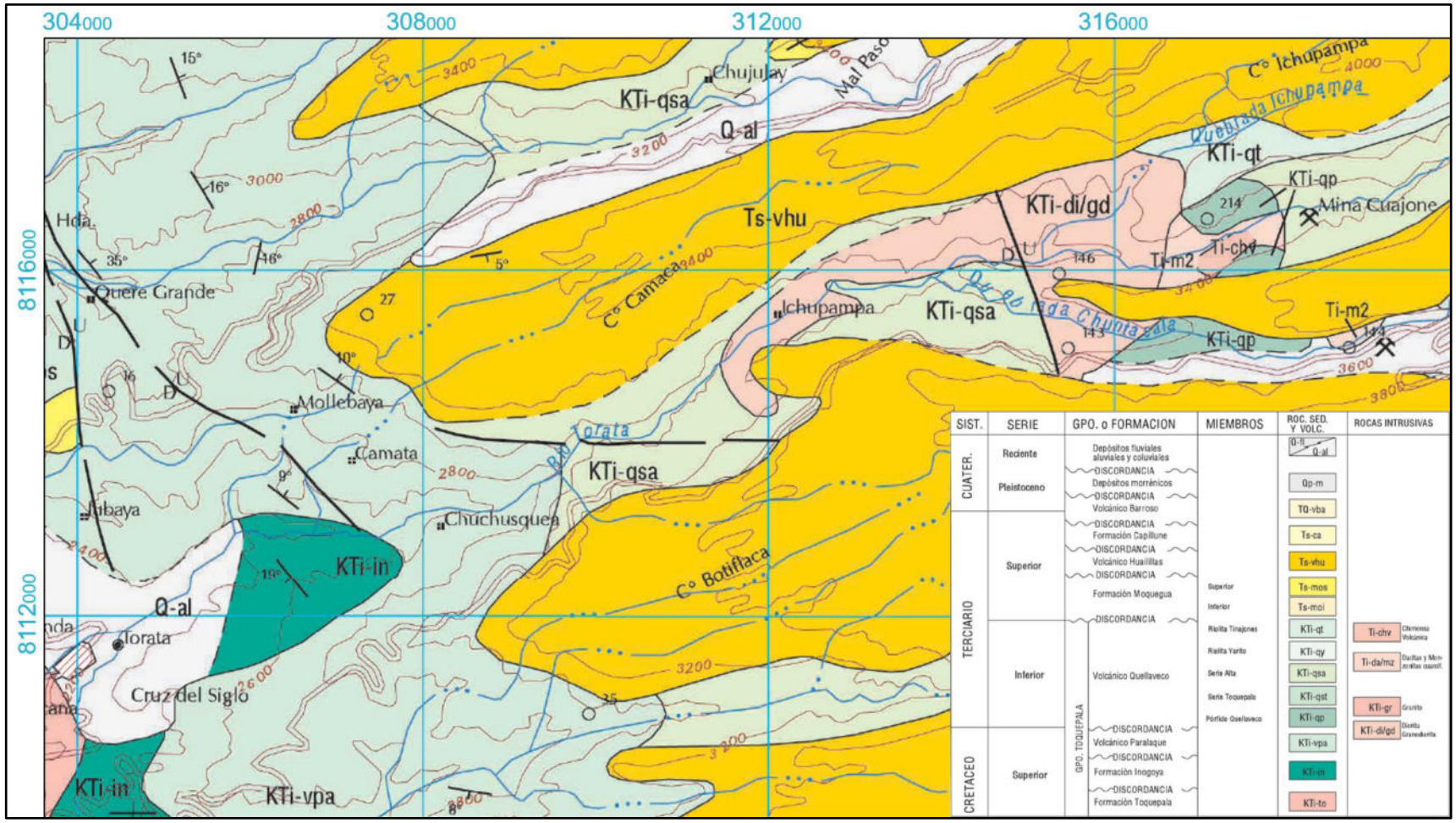
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
Problema General	**Objetivo General**	**Hipótesis General**	**Variable Independiente**	**Tipo de Investigación**
¿Cómo diseñar un sistema de captación de escorrentías que mitigue el impacto ambiental de una cuenca hidrográfica en una mina superficial?	Diseñar un sistema de captación de escorrentías que mitigue el impacto ambiental de una cuenca hidrográfica en una mina superficial.	Un sistema de captación de escorrentías puede mitigar el impacto ambiental de una cuenca hidrográfica en una mina superficial.	Diseño de un sistema de captación de escorrentías: - Diseño y planeamiento. - Construcción.	El tipo de investigación es aplicada. El nivel de investigación es observacional experimental.
Problemas Específicos	**Objetivos Específicos**	**Hipótesis Específicas**	**Variables Dependientes**	**Diseño de Investigación**
1) ¿Qué beneficios ambientales y económicos podrían registrarse al diseñar un sistema de captación de escorrentías en una mina superficial? 2) ¿Cuál es la metodología que se debe aplicar para del diseño de un sistema de captación de escorrentías en una mina superficial?	1) Determinar los beneficios ambientales y económicos asociados al diseño de un sistema de captación de escorrentías en una mina superficial. 2) Proponer una metodología viable para el diseño de un sistema de captación de escorrentías en una mina superficial.	1) Un sistema económicamente viable de captación de escorrentías permite reducir el caudal de aguas de contacto que ingresan a una cuenca hidrográfica. 2) Una metodología que consiste en la construcción de pozas y canales para la captación de escorrentías es el adecuado para mitigar el impacto ambiental de una cuenca hidrográfica.	Impacto ambiental en una cuenca hidrográfica: - Indicadores de caudal de escorrentías antes y después del proyecto. Viabilidad económica del proyecto: - Costo-beneficio.	El diseño de investigación es experimental porque se busca dar solución al problema de investigación, que es mitigar el impacto ambiental en la quebrada del río Torata.

Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables.

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADORES	INSTRUMENTOS
Diseño de un sistema de captación de escorrentías en una mina superficial	Diseño y planeamiento del sistema de captación de escorrentías	Planos topográficos Planos de diseño Plan de trabajo	Drones, Software MinePlan y AutoCAD, Cronograma de actividades, Equipos auxiliares, Equipos de termofusión
	Construcción del sistema de captación de escorrentías	Movimiento de Tierras Instalación de geosintéticos Instalación de tuberías	
Impacto ambiental de una cuenca hidrográfica	Escorrentías que ingresan al río antes del proyecto	Caudal de escorrentías	Cálculo de caudal (fórmula racional)
	Escorrentías que ingresan al río después del proyecto	Caudal de escorrentías	Fórmula caudal residual (Chow, 1988)
Viabilidad económica del proyecto	Costo total del proyecto	Costo por uso de equipos Costo por uso de materiales Costo por horas hombre	Análisis costo-beneficio del proyecto
	Costo de multas y remediación	Costo por multas y remediación	

Nota. Matriz tomada de *Metodología de la Investigación* (p. 211), por R. Hernández, 2014, Mc Graw Hill Education.

Anexo 3: Plano Geológico de la zona de estudio.



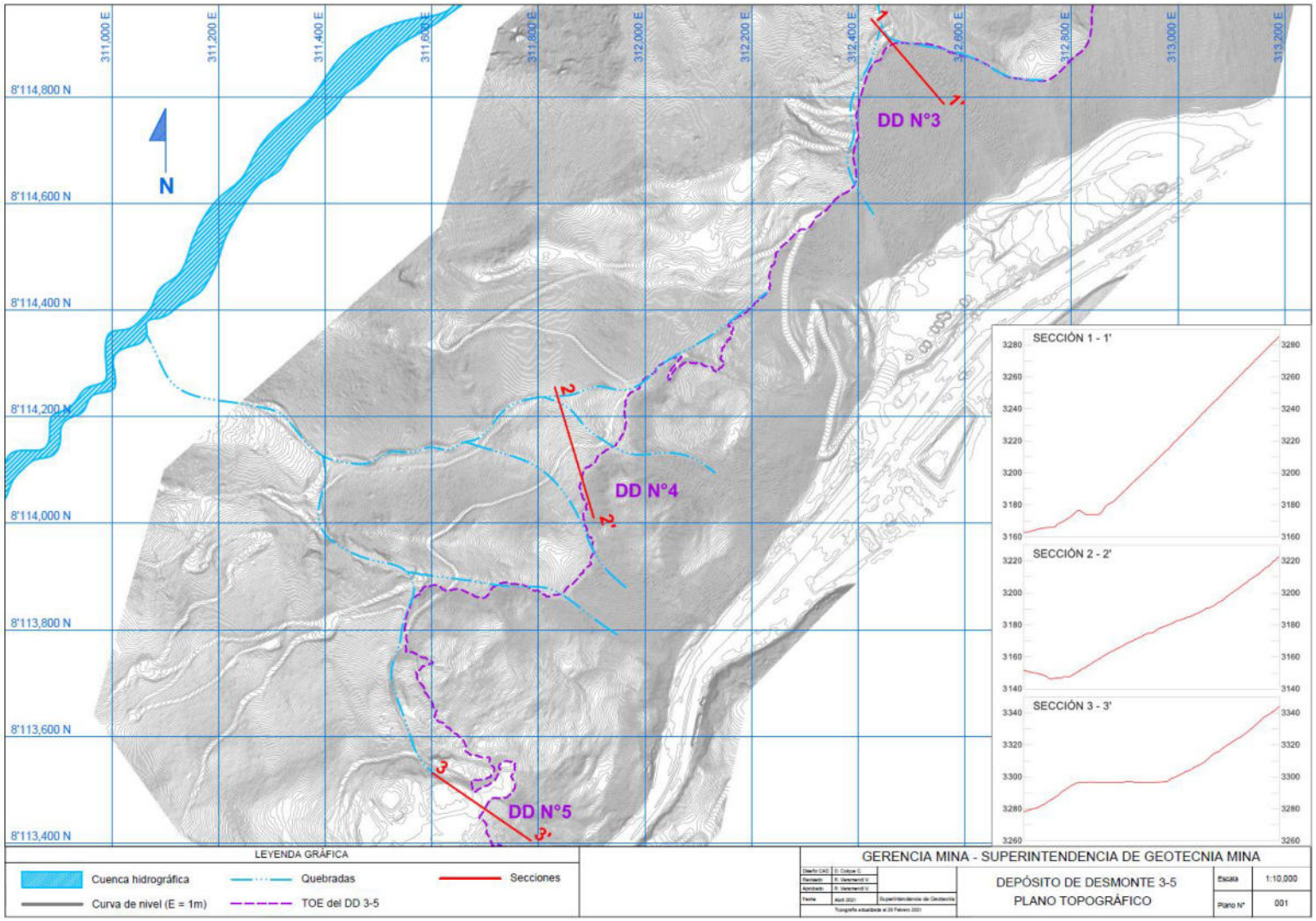
Sistema de coordenadas UTM - WGS84. Imagen tomada de INGEMMET.

Anexo 4: Coeficientes de escorrentía método racional.

COBERTURA VEGETAL	TIPO DE SUELO	PENDIENTE DEL TERRENO				
		PRONUNCIADA	ALTA	MEDIA	SUAVE	DESPRECIABLE
		>50%	>20%	>5%	>1%	<1%
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierba, grama	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosques, densa vegetación	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

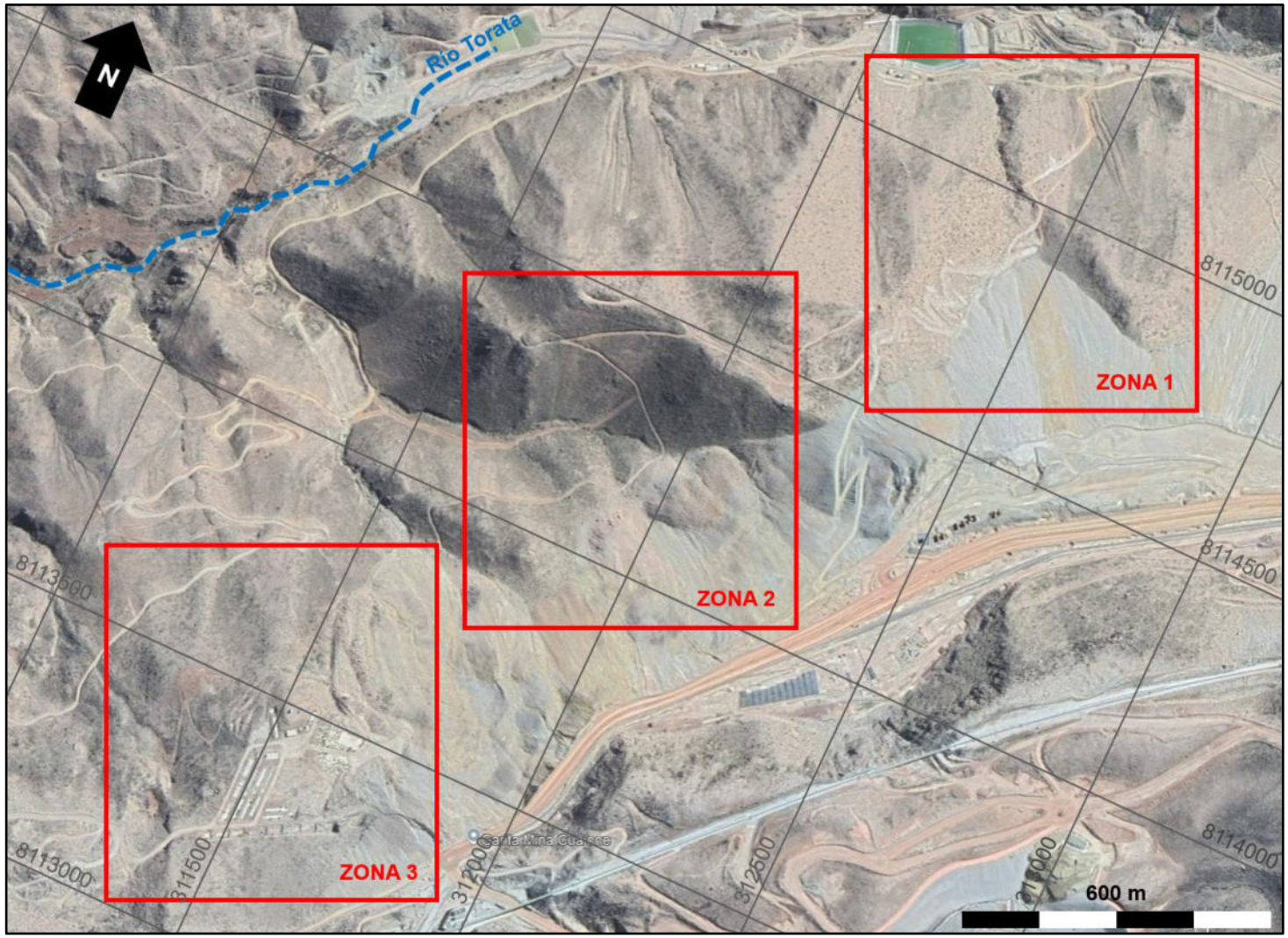
Nota. Tomado del *Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje* (p. 50), por el MTC, 2014, República del Perú.

Anexo 5: Plano topográfico de la zona.



Sistema de coordenadas UTM - WGS84. Equidistancia de curvas de nivel de 1m. (Elaboración propia)

Anexo 6: Plano de Ubicación de Zonas de trabajo.

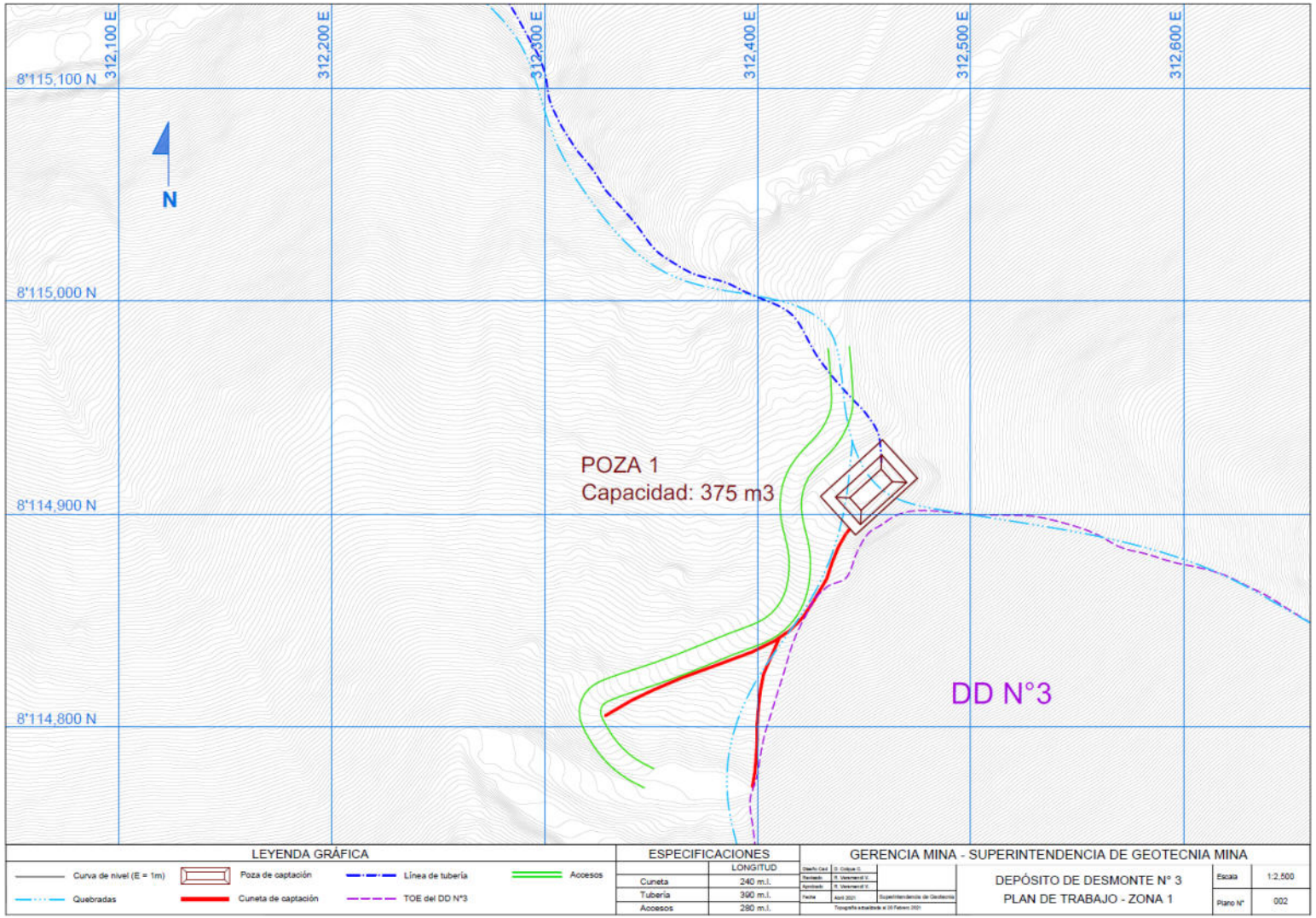


Sistema de coordenadas UTM - WGS84. Imagen tomada de Google Earth Pro.

Anexo 7: Precipitación histórica mensual en la zona de estudio.

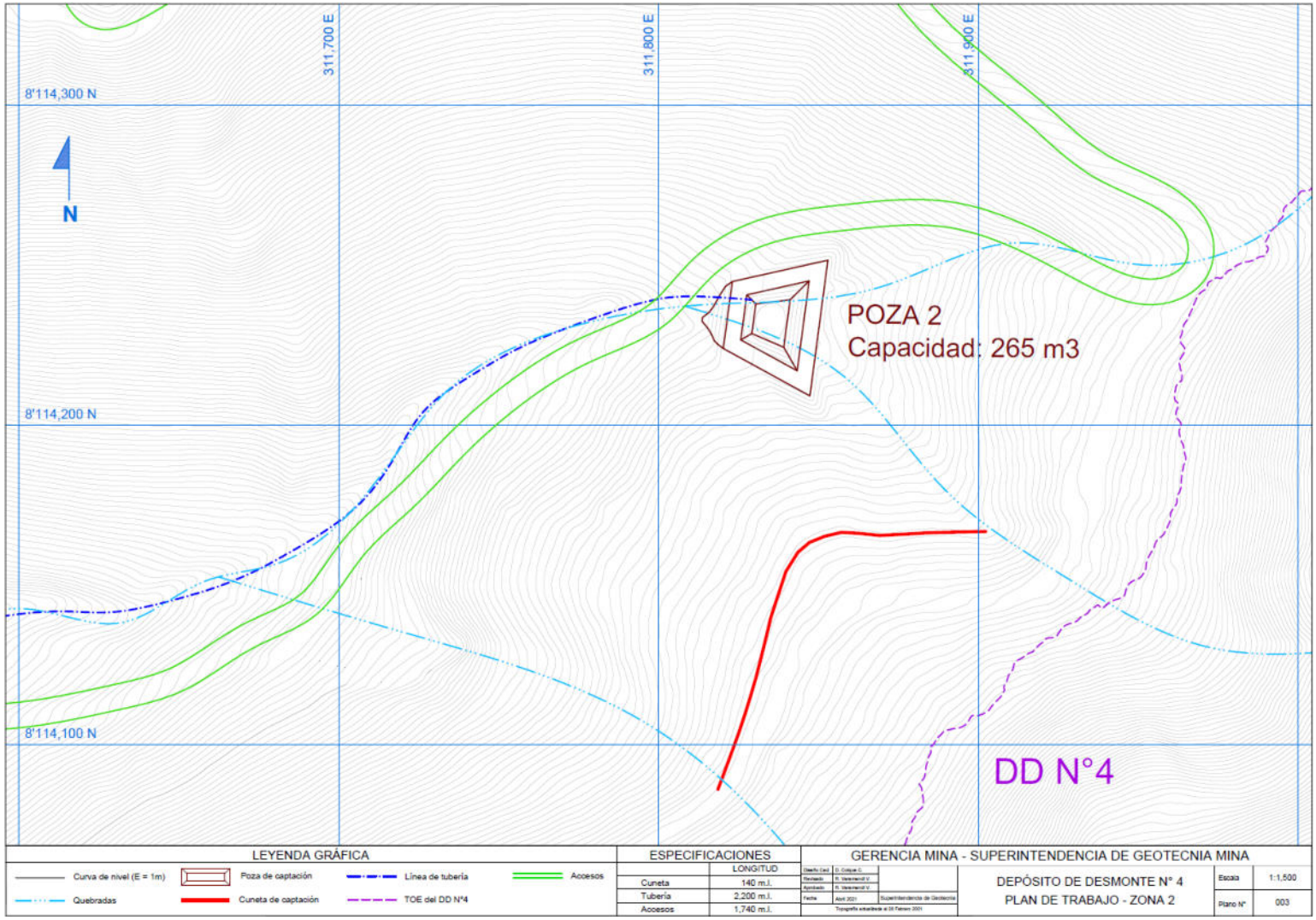
Precipitación	Año 1 (mm)	Año 2 (mm)	Año 3 (mm)	Año 4 (mm)	Año 5 (mm)	Año 6 (mm)	Año 7 (mm)	Año 8 (mm)	Año 9 (mm)	Año 10 (mm)
Enero	55.20	59.90	38.50	57.10	23.40	4.00	141.60	24.70	72.50	157.50
Febrero	106.70	108.90	73.60	0.00	84.90	105.90	99.70	13.70	156.40	106.60
Marzo	2.50	42.90	37.00	0.50	70.60	1.40	88.55	11.00	1.90	55.10
Abril	9.50	16.20	0.00	4.50	1.40	7.60	0.00	9.40	0.00	8.10
Mayo	2.60	0.00	13.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Junio	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	1.40	0.00	0.00
Julio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.50	0.00	0.80	0.00	0.00
Agosto	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Septiembre	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Octubre	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.70
Noviembre	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Diciembre	43.60	46.60	22.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.20
Total Anual	**221.10**	**274.50**	**186.10**	**62.10**	**180.30**	**122.40**	**329.85**	**61.00**	**231.80**	**376.20**

Anexo 8: Plan de trabajo en la Zona 1.



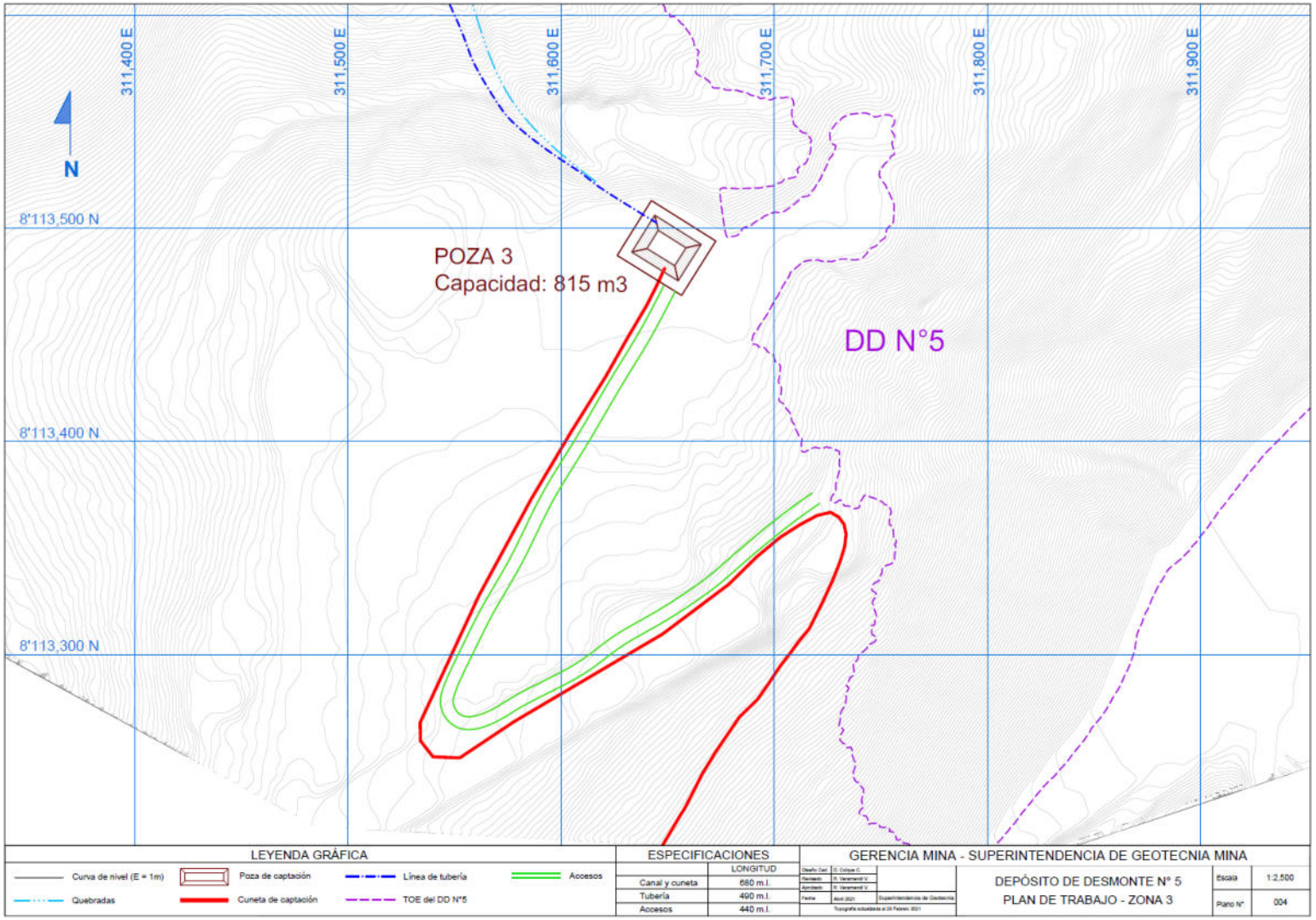
Sistema de coordenadas UTM - WGS84. Equidistancia de curvas de nivel de 1m. (Elaboración propia)

Anexo 9: Plan de trabajo en la Zona 2.



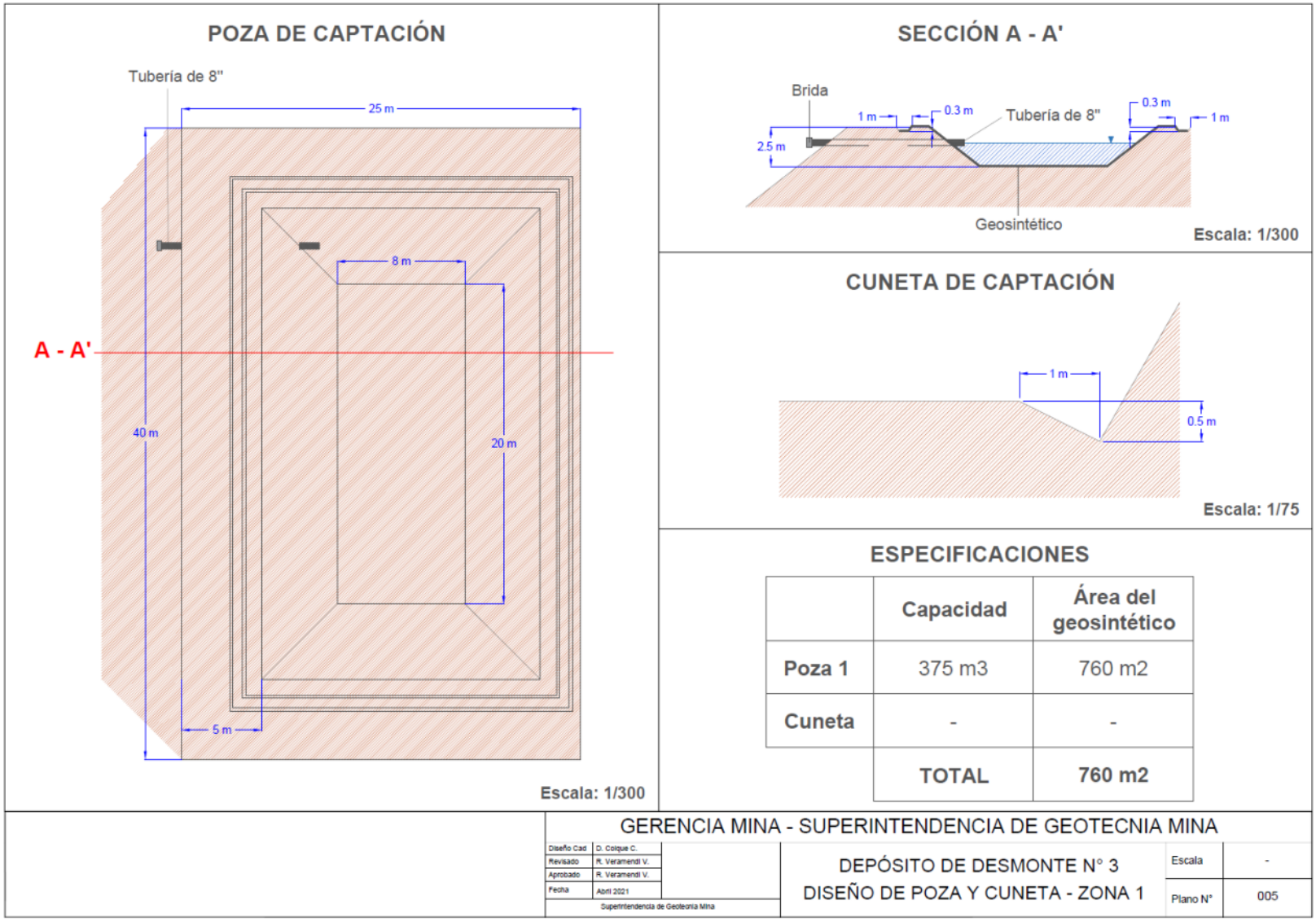
Sistema de coordenadas UTM - WGS84. Equidistancia de curvas de nivel de 1m. (Elaboración propia)

Anexo 10: Plan de trabajo en la Zona 3.

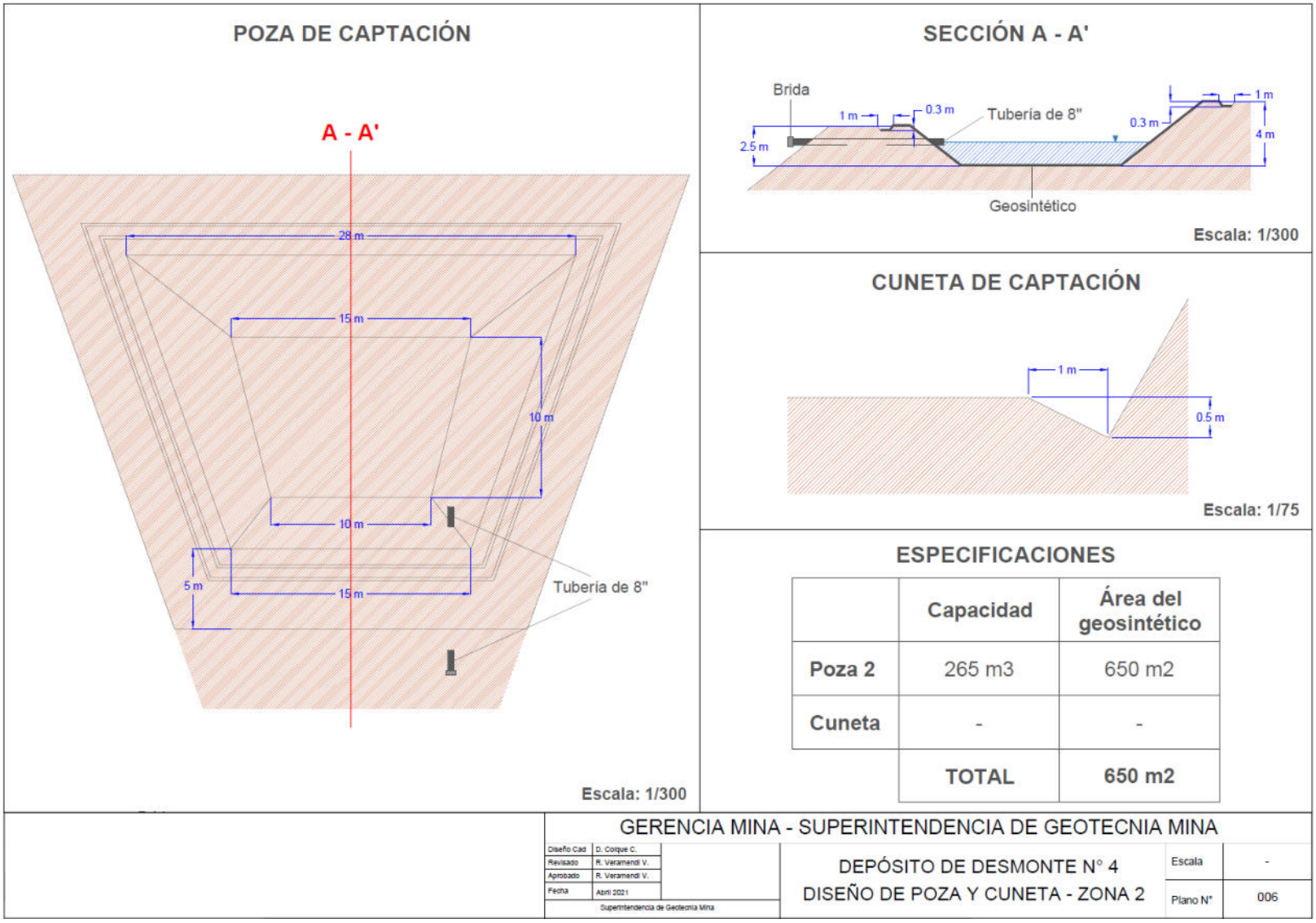


Sistema de coordenadas UTM - WGS84. Equidistancia de curvas de nivel de 1m. (Elaboración propia)

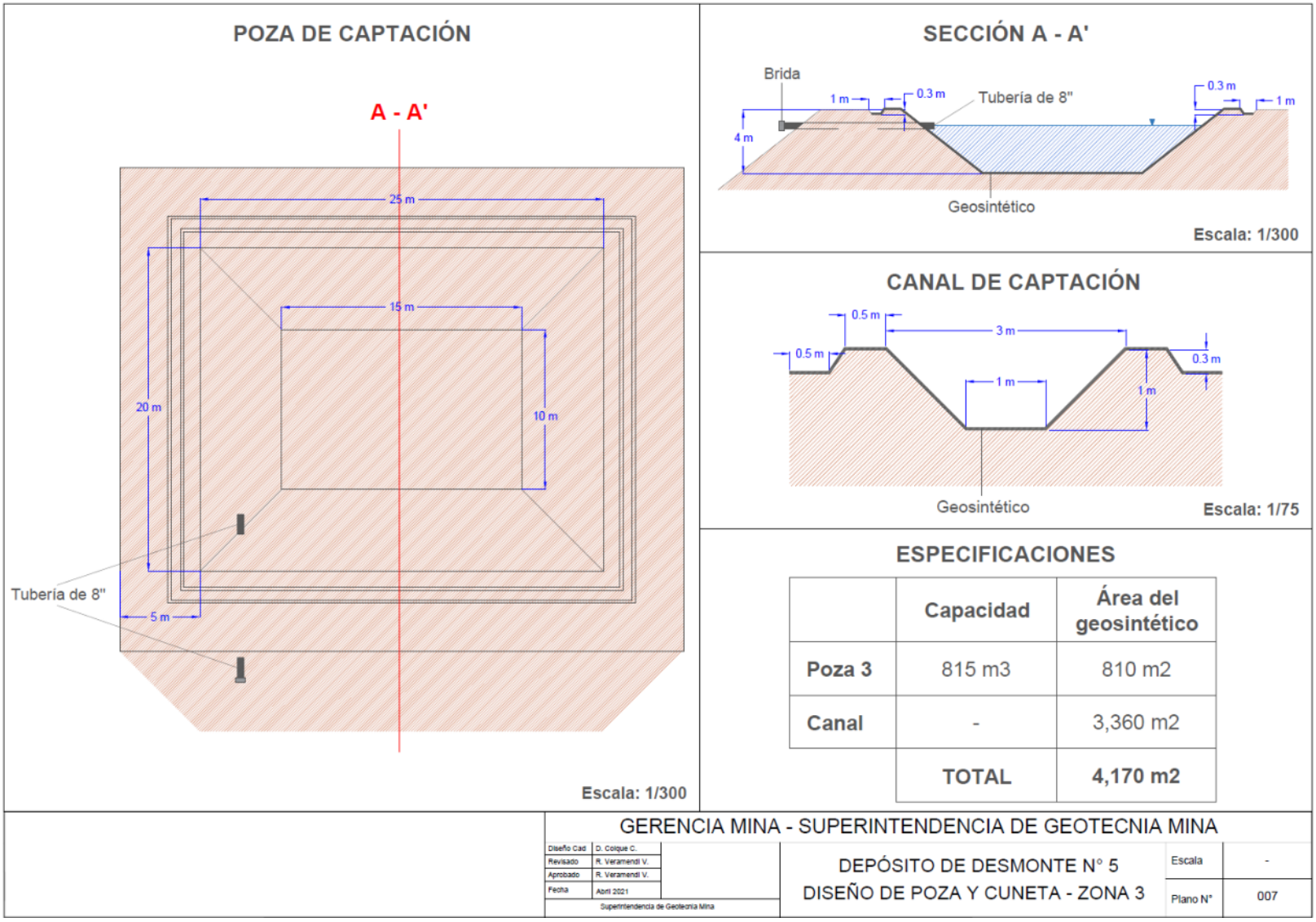
Anexo 11: Plano de diseño de poza y cunetas de captación en la Zona 1.



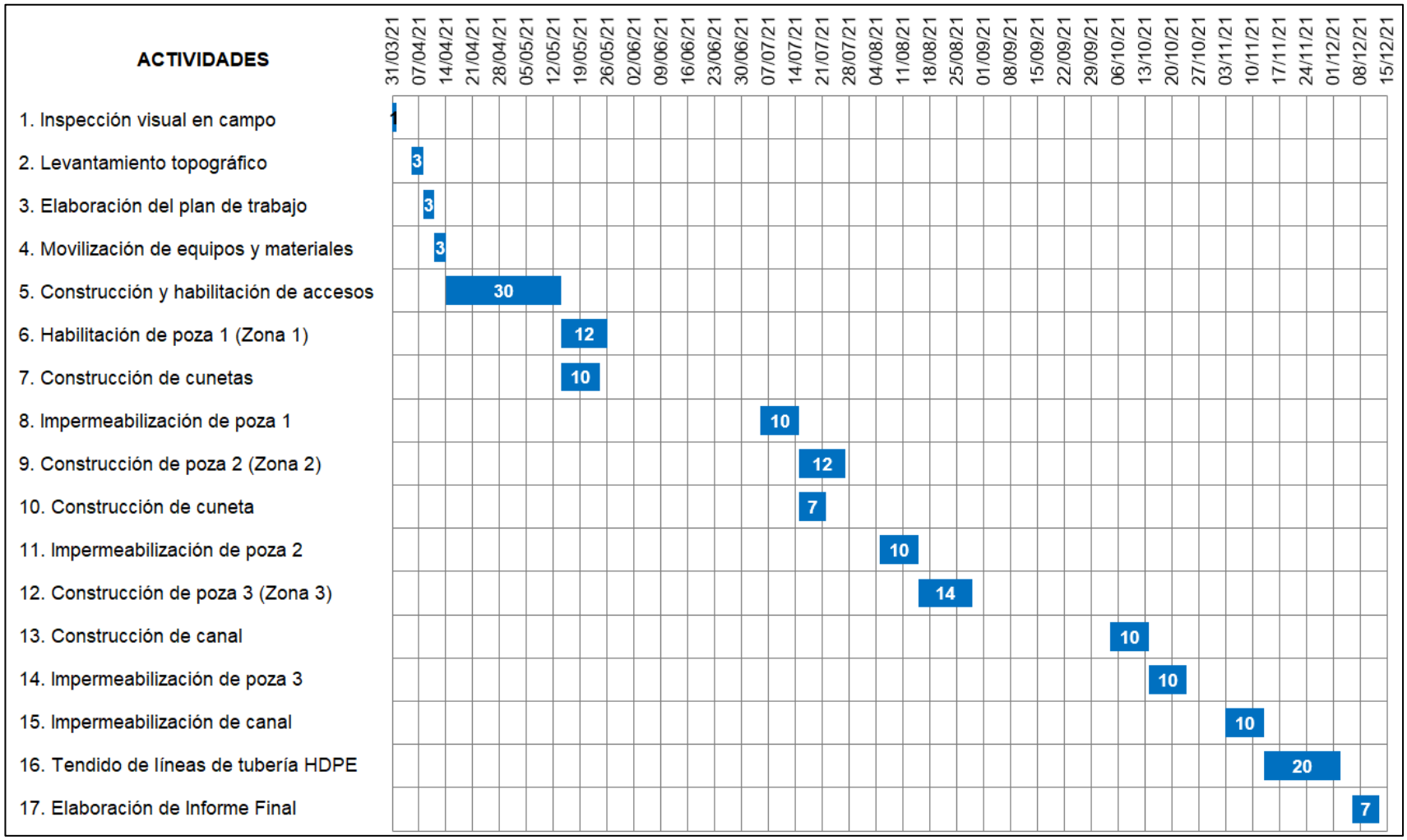
Anexo 12: Plano de diseño de poza y cuneta de captación en la Zona 2.



Anexo 13: Plano de diseño de poza y canal de captación en la Zona 3.



Anexo 14: Cronograma de actividades.



Nota. No se realizaron actividades en feriados como: Semana Santa, Fiestas Patrias, Todos los Santos y Fieles Difuntos. En los meses de junio y septiembre se paralizaron las actividades por falta de personal y equipos.

Anexo 15: Esquema de tendido de tuberías HDPE hacia dique de retención.



Imagen tomada de Google Earth Pro. El recurso hídrico del dique de retención es recuperado para la operación de la mina, por ejemplo, control de material particulado en las vías de acarreo.

Anexo 16: Costo de la ejecución del proyecto.

Ítem	Descripción	Cantidad	Unidad	Costo Unitario (USD$)	Subtotal (USD$)
Equipos	Excavadora	1,656	HRS	184.40	305,366.40
	Tractor	432	HRS	220.69	95,338.08
	Motoniveladora	72	HRS	129.47	9,321.84
	Martillo Hidráulico	72	HRS	184.40	13,276.80
	Cargador Frontal	768	HRS	104.63	80,355.84
Materiales	Geotextil (Rollo de 4x100 m)	14	ROL	117.41	1,643.78
	Geomembrana (Rollo de 7x130 m)	7	ROL	7,248.70	50,740.89
	Tubería HDPE de 8" (Longitud 12 m)	257	UND	406.59	104,493.51
	Cordón de soldadura HDPE (Rollo de 300 m)	14	ROL	122.38	1,713.26
Personal	Supervisores	1,728	HRS	8.72	15,068.16
	Operadores y obreros	6,072	HRS	7.00	42,504.00
Total					**719,822.57**

Nota. Los costos unitarios fueron obtenidos del área de Administración Dispatch y como referencia se tomaron los costos del año 2020.

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UNAM

Formulario de autorización para la publicación electrónica en la página web del Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua, de conformidad con la Ley N° 30035 Ley que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto y Resolución de Comisión Organizadora N° 041-2022-UNAM que aprueba el Reglamento que regula el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

1. DATOS DEL AUTOR

Nombres y Apellidos : **Daniel Edson Colque Calizaya**.....
DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N° : **45309949**.....
Correo electrónico : **dcolquec17@gmail.com**.....
Teléfono/Celular : **975112771**.....

2. GRADO, TITULO O ESPECIALIZACIÓN (Marque con una X)

Bachiller	Título Profesional	Magister	Doctor	Segunda Especialidad
	X			

3. TIPO DE PUBLICACIÓN (Marque con una X)

a) Articulo ( )
b) Tesis de pregrado (**X**)
c) Tesis de Maestría ( )
d) Tesis de Doctorado ( )
e) Monografía ( )
f) Reporte de caso científico o hallazgos ( )
g) Libro ( )
h) Parte de un libro ( )
i) Revisión ( )
j) Conferencia ( )
k) Presentación ( )
l) Artículo preliminar ( )
m) Articulo antes de ser publicado ( )
n) Artículo de prensa ( )
o) Documentos internos ( )
p) Imagen ( )
q) Documentos técnicos ( )
r) Ponencias presentadas en eventos científicos (Jornada, Congreso, Simposio Conferencias, etc.) ( )
s) Informes de suficiencia profesional ( )
t) Patentes producidas por académicos/as ( )

4. TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (Marque con una X)

a) Tesis **(X)**
b) Trabajo de Investigación **( )**
c) Trabajo de suficiencia profesional **( )**
d) Trabajo académico **( )**

5. DATOS DE LA PUBLICACION

a) Título : **Diseño de un sistema económicamente viable de captación de escorrentías para mitigar el impacto ambiental de una cuenca hidrográfica en una mina superficial.**
b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra : https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html) : **1.05.08**.....
c) Fecha de publicación : **20 de noviembre del 2025**.....

6. DATOS DEL ASESOR:

a) Nombres y Apellidos : **Dr. Arquímedes León Vargas Luque**.....
b) DNI/Pasaporte/Cédula : **01309736**.....
c) ORCID : **0000-0001-7619-2844**.....

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : **45309949**.....
NOMBRES Y APELLIDOS : **Daniel Edson Colque Calizaya**.....

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

LICENCIAS

Licencia Estándar

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

Con la autorización de depósito da mi trabajo de investigación, otorgo a la Universidad Nacional de Moquegua, una Licencia No Exclusiva para reproducir. distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi trabajo de investigación (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios provistos por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Institucional Digital de la UNAM, Colección de Tesis, entre otros, en el Perú y en el extranjero, por el tiempo y veces que considere necesarias, y libre de remuneraciones.

En virtud de dicha Licencia, la UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA, podrá reproducir mi trabajo de investigación en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con los propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que el trabajo de investigación es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, o coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicho trabajo de investigación no infringe derechos de autor de terceras personas.

La UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA consignara el nombre del/los autor/es del trabajo de investigación, y no le hará ninguna modificación más de la permitida en la presente licencia.

Autorizo el depósito (marque con una X).

(_X_) **SI autorizo que se deposite inmediatamente.**

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : **45309949**.....

NOMBRES Y APELLIDOS : **Daniel Edson Colque Calizaya**.....

FECHA : **20 de noviembre del 2025**.....



UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN / TESIS / TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Yo, **Daniel Edson Colque Calizaya**, bachiller de la Escuela Profesional de: Ingeniería de Minas, de la Universidad Nacional de Moquegua, identificado (a) con DNI: Nº 45309949, autor(a) de la Tesis / Trabajo de suficiencia profesional titulado **"Diseño de un sistema económicamente viable de captación de escorrentías para mitigar el impacto ambiental de una cuenca hidrográfica en una mina superficial".**

Declaro bajo juramento que:

1. El trabajo de investigación es auténtico, siendo resultado de mi trabajo personal, que no se ha copiado, que no se ha utilizado ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones diversas, sacadas de cualquier tesis, obra, artículo, memoria, etc., (en versión digital o impresa), sin mencionar de forma clara y exacta su origen o autor, tanto en el cuerpo del texto, figuras, cuadros, tablas u otros que tengan derechos de autor. Por tanto, el trabajo de investigación no ha sido plagiado total ni parcialmente.
2. El trabajo de investigación no ha sido autoplagiada, es decir, no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
3. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados y por tanto los resultados que se presentan en el trabajo de investigación constituirán aporte a la realidad investigada.

Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el trabajo de investigación, así como de los derechos sobre la obra presentada.

Moquegua, 20 de noviembre del 2025



Huella digital

Nombres y Apellidos: Daniel Edson Colque Calizaya
DNI: 45309949

Base legal: RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 194-2020-SUNEDU-02-15

Daniel Colque C.

Tesis

Quick Submit

Quick Submit

Universidad Nacional de Moquegua

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3370755551

Fecha de entrega
12 oct 2025, 6:47 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
12 oct 2025, 6:59 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
Tesis_Daniel_Colque_v4.pdf

Tamaño del archivo
5.8 MB

104 páginas

24.695 palabras

136.104 caracteres

11% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)

Fuentes principales

11% Fuentes de Internet
2% Publicaciones
7% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

11% Fuentes de Internet
2% Publicaciones
7% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1 Internet
repositorio.unsaac.edu.pe 1%

2 Internet
hdl.handle.net 1%

3 Internet
tesis.usat.edu.pe <1%

4 Internet
alicia.concytec.gob.pe <1%

5 Internet
repositorio.continental.edu.pe <1%

6 Internet
pt.scribd.com <1%

7 Internet
dspace.unitru.edu.pe <1%

8 Internet
www.coursehero.com <1%

9 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Moquegua <1%

10 Internet
core.ac.uk <1%

11 Internet
docs.google.com <1%

12 Internet
repositorioslatinoamericanos.uchile.cl <1%

13 Internet
1library.co <1%

14 Internet
repositorio.unp.edu.pe <1%

15 Trabajos del estudiante
Universidad Cesar Vallejo <1%

16 Internet
repositorio.unap.edu.pe <1%

17 Trabajos del estudiante
Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez <1%

18 Internet
zaloamati.azc.uam.mx <1%

19 Internet
www.repositorio.usac.edu.gt <1%

20 Trabajos del estudiante
uncedu <1%

21 Trabajos del estudiante
Organismo de Evaluación y Fiscalización <1%

22 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional Federico Villarreal <1%

23 Internet
pubhtml5.com <1%

24 Internet
repositorio.upn.edu.pe <1%

25 Trabajos del estudiante
Consorcio CIXUG <1%

26	Internet	
www.scielo.org.bo		<1%
27	Internet	
cdn.www.gob.pe		<1%
28	Internet	
prensaregional.pe		<1%
29	Publicación	
BISA INGENIERIA DE PROYECTOS S.A.. "EIA-SD para el Proyecto Explotación de Cal...		<1%
30	Trabajos del estudiante	
Pontificia Universidad Catolica del Peru		<1%
31	Internet	
docplayer.es		<1%
32	Internet	
old.bs.camcom.it		<1%
33	Internet	
repositorio.ucv.edu.pe		<1%
34	Internet	
asgmi.org		<1%
35	Internet	
repositorio.uesiglo21.edu.ar		<1%
36	Trabajos del estudiante	
Universidad Continental		<1%
37	Trabajos del estudiante	
Universidad Privada Antenor Orrego 2025		<1%
38	Internet	
repositorio.unu.edu.pe		<1%
39	Internet	
www.grafiati.com		<1%

40 Trabajos del estudiante
Universidad Francisco de Paula Santander <1%

41 Internet
prcp.com.pe <1%

42 Internet
repositorio.esan.edu.pe <1%

43 Internet
repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080 <1%

44 Internet
repositorio.unac.edu.pe <1%

45 Internet
repositorio.uncp.edu.pe <1%

46 Internet
apirepositorio.unu.edu.pe <1%

47 Internet
es.scribd.com <1%

48 Internet
repositorio.ute.edu.ec <1%

49 Internet
www.wikipresas.org <1%

50 Internet
patents.google.com <1%

51 Internet
repositorioacademico.upc.edu.pe <1%

52 Internet
tesis.ipn.mx <1%

53 Internet
www.scielo.org.mx <1%

Universidad Nacional de Moquegua

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 833-2025-CU

Moquegua, 26 de noviembre de 2025

VISTOS:

El Proveído N° 4882-2025-R de fecha 24 de noviembre de 2025 emitido por el Rectorado, Informe N° D0488-2025-UNAM-R-SG de fecha 24 de noviembre de 2025 emitido por el Secretario General, Informe Técnico N° D0164-2025-SEGE-GT emitido por la Especialista Administrativo I–Grados y Títulos, el Acuerdo del Pleno del Consejo Universitario de Sesión Extraordinaria N° 45-2025-SE-CU-UNAM, de fecha 26 de noviembre de 2025, y;

CONSIDERANDO:

Que, conforme al 4to párrafo del artículo 18, de la Constitución Política del Perú, dispone que cada Universidad es autónoma en su régimen normativo, de gobierno, académico, administrativo y económico. Y el artículo 8º de la Ley Nº 30220-Ley Universitaria, establece que la referida autonomía inherente a las Universidades, se ejerce de conformidad con la Constitución y demás normativa aplicable. Concordante con el artículo 1, de la Ley Nº 31520, Ley que restablece la autonomía y la institucionalidad de las universidades peruanas, así como la Ley N° 32141, Ley que modifica la Ley N° 30220-Ley Universitaria, a fin de fortalecer la institucionalidad de las Universidades Públicas licenciadas;

Que, el Artículo 58, de la Ley N° 30220-Ley Universitaria, establece que el Consejo Universitario es el máximo órgano de gestión, dirección y ejecución académica y administrativa de la Universidad. Concordante con el artículo 18° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, aprobado bajo Resolución de Asamblea Universitaria N° 015-2025-AU-UNAM;

Que, el artículo 59 de la Ley Universitaria-Ley N° 30220, establece las atribuciones del Consejo Universitario, y específicamente el numeral 59.9, establece; Conferir los grados académicos y los títulos profesionales aprobados por las Facultades y Escuela de Posgrado, así como otorgar distinciones honoríficas y reconocer y revalidar los estudios, grados y títulos de universidades extranjeras, cuando la universidad está autorizada por la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria. Concordante con el numeral 14, del artículo 20° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua;

Que, el Sr. Rector es el personero y representante legal de la Universidad Nacional de Moquegua, conforme a lo dispuesto por la Ley Nº 30220-Ley Universitaria, tiene a su cargo la Dirección, Conducción y Gestión del Gobierno Universitario en todos sus ámbitos, concordante con el artículo 24° y numeral 2 del artículo 26° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua;

Que, mediante Informe Técnico N° D0164-2025-SEGE-GT, de fecha 24 de noviembre de 2025, e Informe N° D0488-2025-UNAM-R-SG de fecha 24 de noviembre de 2025, el Secretario General de la UNAM, remite al Rectorado los expedientes para el trámite de Título Profesional de Ingeniero de Minas de los Bachilleres: PLATERO SOSA ALEXANDER DAVID, MELENDREZ FLORES ROBERTO CARLOS, ALE PRETELL NAYELI ALEXANDRA y COLQUE CALIZAYA DANIEL EDSON de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quienes se encuentran aptos para la expedición del Título Profesional de Ingeniero de Minas, al haber cumplido satisfactoriamente con los requisitos legales y reglamentarios, exigidos en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, conforme lo señala la Dirección de Actividades y Servicios Académicos y la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas; razón por la cual, el señor Secretario General incluye dichos expedientes como punto de agenda para ser tratado en Sesión Extraordinaria de Consejo Universitario de fecha 26 de noviembre de 2025;

Que, el artículo 44° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria señala que las universidades otorgan los grados académicos de Bachiller, Maestro, Doctor y los Títulos Profesionales que correspondan, a nombre de la Nación (...). Asimismo la Ley N° 31803, modifica el artículo en mención adicionando; La Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria (SUNEDU) determina los criterios, así como establece y supervisa el procedimiento administrativo para el reconocimiento de grados y títulos otorgados en el extranjero, en el marco de la normativa vigente;

Que, el numeral 45.2 del artículo 45° de la Ley Nº 30220, Ley Universitaria, precisa los requisitos mínimos para la obtención del título profesional, como son: el grado de Bachiller y la aprobación de una tesis o trabajo de suficiencia profesional. Asimismo, establece que el título profesional solo se puede obtener en la universidad en la cual se haya obtenido el grado de bachiller;

Que, mediante Resolución de Comisión Organizadora N° 1153-2021-UNAM, se aprobó el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, el mismo que fue modificado a través de las Resoluciones de Comisión Organizadora N° 410; 453 y 890-2022, N° 880-2023-UNAM y N° 081, 484-2024-UNAM el cual establece los requisitos y norma los procedimientos para la obtención de los grados académicos y títulos profesionales conferidos por esta Casa Superior de Estudios;

Que, bajo el amparo de los considerandos precedentes, el Pleno del Consejo Universitario en Sesión Extraordinaria N° 45-2025-SE-CU-UNAM, de fecha 26 de noviembre de 2025, emitió, el siguiente, Acuerdo; POR UNANIMIDAD: CONFERIR, a nombre de la Nación el Título Profesional de Ingeniero de Minas por la modalidad de sustentación de tesis a los Bachilleres: : PLATERO SOSA ALEXANDER DAVID, MELENDREZ FLORES ROBERTO CARLOS, ALE PRETELL NAYELI ALEXANDRA y COLQUE CALIZAYA

Domicilio Legal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe

Universidad Nacional de Moquegua

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 833-2025-CU

Moquegua, 26 de noviembre de 2025

DANIEL EDSON, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Moquegua;

En uso de las facultades y atribuciones conferidas por el Art. 18, de la Constitución Política del Perú, la Ley N° 30220-Ley Universitaria, el Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, y a lo acordado por el pleno del Consejo Universitario;

SE RESUELVE:

ARTÍCULO 1°: CONFERIR, A NOMBRE DE LA NACIÓN a los Bachilleres

- **PLATERO SOSA ALEXANDER DAVID**
  TESIS : "EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO OPERATIVO MEDIANTE LA DIGITALIZACIÓN DEL IPERC CON MINEOPS PARA MEJORAR LA PRODUCCIÓN EN UNA MINA SUPERFICIAL", cuyo asesor principal fue Dr. Christ Jesus Barriga Paria.
- **MELENDREZ FLORES ROBERTO CARLOS**
  TESIS : "EVALUACIÓN DE PARÁMETROS GEOTÉCNICOS PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA EXPLOTACIÓN DE LA UNIDAD MINERA NO METÁLICA EL CHASQUI SOY", cuyo asesor principal fue el Dr. Arquímedes Leon Vargas Luque.
- **ALE PRETELL NAYELI ALEXANDRA**
  TESIS : "OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL DE LA "CONCESIÓN MINERA NO METÁLICA EL CHASQUI SOY" DURANTE EL AÑO 2025 APLICANDO EL IPERC ESPECÍFICO Y ACTUALIZANDO LAS HERRAMIENTAS DE GESTIÓN DE SEGURIDAD", cuyo asesor principal fue la Dra. Bertha Silvana Vera Barrios.
- **COLQUE CALIZAYA DANIEL EDSON**
  TESIS : "DISEÑO DE UN SISTEMA ECONÓMICAMENTE VIABLE DE CAPTACIÓN DE ESCORRENTÍAS PARA MITIGAR EL IMPACTO AMBIENTAL DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA EN UNA MINA SUPERFICIAL", cuyo asesor principal fue el Dr. Arquímedes Leon Vargas Luque.

El **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS.**

Por la modalidad de SUSTENTACIÓN DE TESIS, de la Escuela Profesional Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 2°: ENCARGAR, al Secretario General a través de quien corresponda, para que realice las acciones pertinentes relacionadas con la inscripción correspondiente en el Registro de Grados y Títulos de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria – SUNEDU.

ARTÍCULO 3°: DISPONER el cumplimiento de la presente Resolución a todas las dependencias de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 4°: DISPONER la publicación de la presente resolución en el Portal Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua www.unam.edu.pe

REGÍSTRESE, PUBLÍQUESE, Y CÚMPLASE;

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA – SECRETARÍA GENERAL

ABOG. EDGAR PINTO HUANCAVILCA
SECRETARIO GENERAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA – CONSEJO UNIVERSITARIO

DR. HUGO RUBEN MARCA MAQUERA
RECTOR
PRESIDENTE DEL CONSEJO UNIVERSITARIO

DISTRIBUCION:
VRA,
VRI,
FAIN,
EPIM,
DASA,
GeT,
OTI,
Interesados,
C.c. Arch.

Domicilio Legal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe