

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas

Tesis

**Análisis del comportamiento hidrológico  
subterráneo en la unidad Colquijirca, El Brocal**

Kevin Maycol Yachi Corilla

Para optar el Título Profesional de  
Ingeniero de Minas

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

## INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

**A** : Decano de la Facultad de Ingeniería  
**DE** : Nelida Tantavilca Martinez  
Asesor de trabajo de investigación  
**ASUNTO** : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación  
**FECHA** : 22 de Febrero de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

**Título:**

"Análisis del Comportamiento Hidrológico Subterráneo en la Unidad Colquijirca El Brocal"

**Autores:**

1. Kevin Maycol Yachi Corilla – EAP. Ingeniería de Minas

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 18 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI  NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores SI  NO   
Nº de palabras excluidas (**en caso de elegir "SI"**): 30
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI  NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,



---

Asesor de trabajo de investigación

**ASESOR**

...

## **DEDICATORIA**

A mis padres, por su orientación a lo largo de los años, llenándome de valores y principios que guían mi vida diaria.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por su guía y bendiciones, porque me brindó la fortaleza para seguir adelante cada día de mi vida.

A mis padres, por todo su apoyo incondicional a lo largo de mis estudios y mi vida profesional., por sus consejos, comprensión y estímulo constante.

A los docentes de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas de la Universidad Continental, por sus enseñanzas académicas a lo largo de mi estadía en sus instalaciones.

A la Unidad Minera Colquijirca El Brocal, por el apoyo y la facilidad constante en la obtención de datos e información necesaria para el desarrollo de la presente investigación.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ASESOR .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN .....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	xiv
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO .....	16
1.1. Planteamiento y formulación del problema .....	16
1.1.1. Planteamiento del problema .....	16
1.1.2. Formulación del problema.....	19
1.2. Objetivos .....	20
1.2.1. Objetivo general .....	20
1.2.2. Objetivos específicos .....	20
1.3. Justificación e importancia.....	20
1.3.1. Justificación teórica .....	20
1.3.2. Justificación práctica .....	20
1.3.3. Justificación metodológica .....	21
1.4. Delimitación de la investigación .....	21
1.4.1. Delimitación espacial .....	21
1.4.2. Delimitación temporal .....	21
1.4.3. Delimitación económica .....	22
1.5. Hipótesis de la investigación.....	22
1.5.1. Hipótesis general .....	22
1.5.2. Hipótesis específicas.....	22
1.6. Identificación de las variables .....	22
1.6.1. Variable independiente: Factores hidrológicos.....	22
1.6.2. Variable dependiente: Comportamiento hidrológico.....	22
1.6.3. Operacionalización de variables .....	23
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	24
2.1. Antecedentes del problema .....	24
2.1.1. Antecedentes nacionales .....	24

2.1.2. Antecedentes internacionales.....	27
2.2. Bases teóricas .....	30
2.1.1. Comportamiento hidrológico.....	30
2.1.2. Factores hidrológicos.....	31
2.1.3. Medición de caudales .....	33
2.1.4. Precipitación .....	34
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>37</b>
3.1. Método y alcances de la investigación.....	37
3.1.1. Método de la investigación.....	37
3.1.2. Método específico de la investigación.....	38
3.2. Tipo y nivel de la investigación .....	38
3.2.1. Tipo de investigación.....	38
3.2.2. Nivel de investigación .....	38
3.3. Diseño de la investigación .....	38
3.4. Población y muestra .....	39
3.4.1. Población .....	39
3.4.2. Muestra .....	40
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	40
3.5.1. Técnicas utilizadas en la recolección de datos.....	40
3.5.2. Instrumentos utilizados en la recolección de datos.....	40
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>41</b>
4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información .....	41
4.1.1. Análisis de la producción minera .....	41
4.1.2. Análisis económico del área minera .....	49
4.2. Supervisión y construcción de piezómetros .....	64
4.3. Ensayos hidráulicos.....	68
4.4. Pozos .....	69
4.5. Mapeo hidrogeológico en interior mina .....	69
4.6 Manejo de agua en interior mina.....	76
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>87</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>88</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>91</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables .....	23
Tabla 2. Fallas identificadas por Lavalin ty SRK, 2021 .....	48
Tabla 3. Precipitación total anual de las estaciones más cercanas al área de estudio .....	51
Tabla 4. Fallas identificadas por Lavalin ty SRK, 2021 .....	61
Tabla 5. Características de los piezómetros monitoreados en superficie .....	63
Tabla 6. Resumen de sondajes perforados y piezómetros instalados.....	64
Tabla 7. Profundidades de los tramos de ensayo y valores de conductividad hidráulica .....	68
Tabla 8. Condición de los pozos de bombeo en el tajo.....	69
Tabla 9. Puntos de mapeo hidrogeológico en la primera campaña (julio – agosto 2023) .....	74
Tabla 10. Puntos de mapeo hidrogeológico en la segunda campaña (octubre 2023).....	75
Tabla 11. Resumen de valores de permeabilidad en macizo rocoso .....	81
Tabla 12. Resumen de valores de permeabilidad en depósitos cuaternarios .....	82
Tabla 13. Resumen de parámetros hidráulicos obtenidos de las pruebas de bombeo.....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plano general de instalaciones superficiales.....	18
Figura 2. Plano de ubicación geográfica.....	19
Figura 3. Ubicación política - Delimitación espacial.....	21
Figura 4. Clasificación jerárquica de cuencas.....	34
Figura 5. Principales tipos de precipitaciones.....	35
Figura 6. Diseño de investigación correlacional.....	38
Figura 7. Precipitación media mensual del área de estudio.....	52
Figura 8. Evaporación mensual en la estación Upamayo.....	54
Figura 9. Evapotranspiración potencial mensual.....	54
Figura 10. Registro de cores, representando los tramos interceptados durante la perforación DDH- 01-023.....	65
Figura 11. Registro de cores, representando los tramos interceptados durante la perforación DDH- 02-023.....	66
Figura 12. Registro de cores, representando los tramos interceptados durante la perforación DDH-.....	67
Figura 13. Monumentación de piezómetros DDH-01-023, DDH-02A/B-023 y DDH-03-023.....	68
Figura 14. Izquierda: aforo en rampa Esperanza que reúne filtraciones del nivel 3922. Derecha: filtraciones del nivel 3912.....	71
Figura 15. Izquierda: surgencia de agua de sondaje DDH en la Vn 8606W. Derecha: aforo de filtraciones en la Vn 1580S del nivel 3872.....	71
Figura 16. Aforo de las filtraciones en la Rp 1345 nivel 4185.....	72
Figura 17. Izquierda: aforo en GL1013N nivel 4085. Derecha: filtraciones de la GL 1035N nivel 3912.....	72
Figura 18. Punto de aforo en la RB15 del nivel 4055.....	73
Figura 19. filtraciones de sondaje DDH nivel 4092.....	73
Figura 20. Circuito de agua de ingreso a Interior mina.....	77
Figura 21. Unifilar del manejo de agua en interior mina.....	79
Figura 22. Conductividad hidráulica vs profundidad de los medios no consolidados (cuaternarios).....	82
Figura 23. Conductividad hidráulica vs profundidad del grupo Mitu.....	83
Figura 24. Conductividad hidráulica vs profundidad del grupo Pucará.....	84
Figura 25. Conductividad hidráulica vs profundidad del miembro Calera.....	84
Figura 26. Conductividad hidráulica vs profundidad de rocas volcánicas e intrusivas.....	85

Figura 27. Esquema de sistema de bombeo. ....	98
Figura 28. Circuito agua de perforación. ....	99
Figura 29. Esquema de sistema de bombeo - captación de agua limpia. ....	100

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo principal determinar la relación existente entre los factores y el comportamiento hidrológico en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal. Se describió el comportamiento de la precipitación pluvial, el caudal y las características fisiográficas de la unidad minera estudiada. La metodología de la investigación fue del tipo aplicado, de nivel correlacional-explicativo, de diseño no experimental, teniendo como población a la unidad minera, el instrumento de recolección de datos fue la ficha de observación.

**Palabras claves:** comportamiento hidrológico, unidad minera, zona subterráneo.

## **ABSTRACT**

The main objective of this research was to determine the relationship between hydrological factors and hydrological behavior in the Colquijirca El Brocal Mining Unit, where rainfall behavior was described, the flow rate and physiographic characteristics of the mining unit studied. The research methodology was applied, of a correlational-explanatory level, of non-experimental design, with the Mining Unit as population; the data collection instrument was the observation sheet.

**Keywords:** hydrological behavior, mining unit, underground zone.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, todos reconocen que el agua se ha convertido en un elemento esencial para la humanidad y sus actividades industriales, siendo utilizadas para diferentes fines como el consumo directo, actividades agrícolas e industriales. Por ello, con la disminución mundial de la disponibilidad del agua dulce, lo ha convertido en un tema de gran importancia y preocupación evidente. Entre el uso del agua en actividades industriales, se encuentran las mineras que se han visto involucradas en responsabilidades relacionadas a su contaminación tanto en las superficiales y subterráneas, lo que evidentemente, presenta un ambiente poco saludable para las poblaciones y seres vivos en general.

Por esta razón, muchas empresas del sector minero buscan la forma adecuada de gestionar el uso del recurso hídrico para sus actividades sin afectar al entorno con posibles desechos. Si bien es cierto, durante la historia peruana, la minería ilegal y la mala gestión del uso del agua han sido los principales responsables de la contaminación ambiental, esto incrementa el ánimo de los esfuerzos para planificar mejor las actividades teniendo en cuenta el uso adecuado de sus recursos naturales.

La Sociedad Minera El Brocal S. A. A. viene explotando minerales de zinc y plomo en el yacimiento de Tajo Norte, mediante el minado superficial. Este tajo tiene continuidad hacia el sur, llegando a unirse con el depósito de Marcapunta norte, teniendo una transición de zinc-plomo hacia cobre con una actualización en el año 2023 para el plan de minado. La Unidad Minera Colquijirca de SMEB se ubica en el distrito de Tinyahuarco, provincia y departamento de Pasco. Hidrográficamente, el proyecto se ubica en la cuenca del río San Juan, afluente al río Mantaro perteneciente a la vertiente del Atlántico.

Las actividades del nuevo plan de minado toman en cuenta a las zonas de descargas, la ubicación de la mina, las canteras de material de préstamo, la planta de beneficio, el depósito de relaves, talleres, vías de acceso, campamentos, servicios de salud y otros.

Dentro del estudio del análisis del comportamiento hidrológico subterráneo, se necesita actualizar toda la información geológica, hidrológica e hidrogeológica disponible en la unidad minera, buscando complementar el entendimiento hidrogeológico del sitio, actualizar el esquema conceptual de funcionamiento hidrodinámico y el modelo numérico hidrogeológico, teniendo en cuenta las recomendaciones y los riesgos relacionados a la interacción con el agua subterránea. Por esta razón, se formuló la pregunta principal: ¿cuál es la relación entre los factores y el comportamiento hidrológico en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal?

Con la finalidad de comprender mejor el contenido del presente documento, este se estructuró mediante cuatro capítulos generales. El Capítulo I abarca el planteamiento del problema, la formulación de esta y los objetivos, la justificación de la investigación y la hipótesis junto a la operacionalización de las variables. En el Capítulo II se observa los antecedentes tomados en cuenta, las bases teóricas de las variables y el marco conceptual. El Capítulo III plantea toma en cuenta la metodología general de la investigación, el tipo, nivel y diseño de esta, la población y las técnicas para la recolección de datos. El Capítulo IV muestra los resultados y la discusión de los mismos respecto a los obtenidos en el desarrollo de la investigación, finalizando el informe con las conclusiones, las recomendaciones, las referencias bibliográficas y los anexos que evidencian el desarrollo de la investigación.

El autor

## **CAPÍTULO I**

### **PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

#### **1.1. Planteamiento y formulación del problema**

##### **1.1.1. Planteamiento del problema**

En la actualidad, todos reconocen que el agua se ha convertido en un elemento esencial para la humanidad y sus actividades industriales, siendo utilizadas para diferentes fines como el consumo directo, actividades agrícolas e industriales. Por ello, con la disminución mundial de la disponibilidad del agua dulce, lo ha convertido en un tema de gran importancia y preocupación evidente. Entre el uso del agua en actividades industriales, se encuentran las mineras que se han visto involucradas en responsabilidades relacionadas a su contaminación tanto en las superficiales y subterráneas, lo que evidentemente, presenta un ambiente poco saludable para las poblaciones y seres vivos en general.

Por esta razón, muchas empresas del sector minero buscan la forma adecuada de gestionar el uso del recurso hídrico para sus actividades sin afectar al entorno con posibles desechos. Si bien en cierto, durante la historia peruana, la minería ilegal y la mala gestión del uso del agua han sido los principales responsables de la contaminación ambiental, esto incrementa el ánimo de los esfuerzos para planificar mejor las actividades teniendo en cuenta el uso adecuado de sus recursos naturales.

La alarmante disminución de fuentes de agua en diferentes zonas andinas y altoandinas se vienen originando por causa humana y fenómenos de cambios climáticos presentando problemas en el ecosistema. Al respecto, Ataroff (2015) menciona “se vienen presentando problemas como la disminución de vegetales, erosión de suelos, incremento de escorrentía, disminución de la infiltración y desertificación; generando sobrepastoreo, quemas, deforestación y cambio de uso del suelo” (1). De igual forma, el cambio climático viene

alterando los indicadores de temperatura y precipitación. De acuerdo al Instituto de Manejo de Agua y Medio Ambiente (IMA; 2018): “los estudios reportan que las temperaturas son mayores y las precipitaciones son más intensos y de corta duración” (2).

La Sociedad Minera El Brocal S.A.A., (en adelante El Brocal viene explotando minerales de zinc y plomo en el yacimiento de Tajo Norte, mediante el minado superficial. Este tajo tiene continuidad hacia el sur, llegando a unirse con el depósito de Marcapunta norte, teniendo una transición de zinc-plomo hacia cobre con una actualización en el año 2023 para el plan de minado. La Unidad Minera Colquijirca de SMEB se ubica en el distrito de Tinyahuarco, provincia y departamento de Pasco. Hidrográficamente, el proyecto se ubica en la cuenca del río San Juan, afluente al río Mantaro perteneciente a la vertiente del Atlántico.

El acceso desde Lima se realiza a través de la carretera central hasta la ciudad de La Oroya, desde donde se toma la carretera que va hacia la ciudad de Cerro de Pasco. Ambas carreteras se encuentran asfaltadas en su totalidad. El campamento de Colquijirca, se ubica a 15.8 km de la ciudad de Cerro de Pasco. El recorrido desde Lima hasta el campamento de Colquijirca es de aproximadamente 288 km. El clima es frío, glacial y con grandes precipitaciones en zonas de cordillera alta donde se encuentran las cumbres nevadas. La temperatura varía entre los  $-8^{\circ}\text{C}$  hasta los  $10^{\circ}\text{C}$ , con una temperatura media anual de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $7^{\circ}\text{C}$ . Lluvia de octubre a abril. La humedad relativa, o cantidad de vapor de agua contenida en el aire, oscila entre los promedios anuales de 60 % y 84.1 %.

Dentro de las actividades del nuevo plan de minado, se toma en cuenta a las zonas de descargas, la ubicación de la mina, las canteras de material de préstamo, la planta de beneficio, el depósito de relaves, talleres, vías de acceso, campamentos, servicios de salud y otros. La siguiente figura muestra el plano general de la ubicación de la instalación del proyecto.

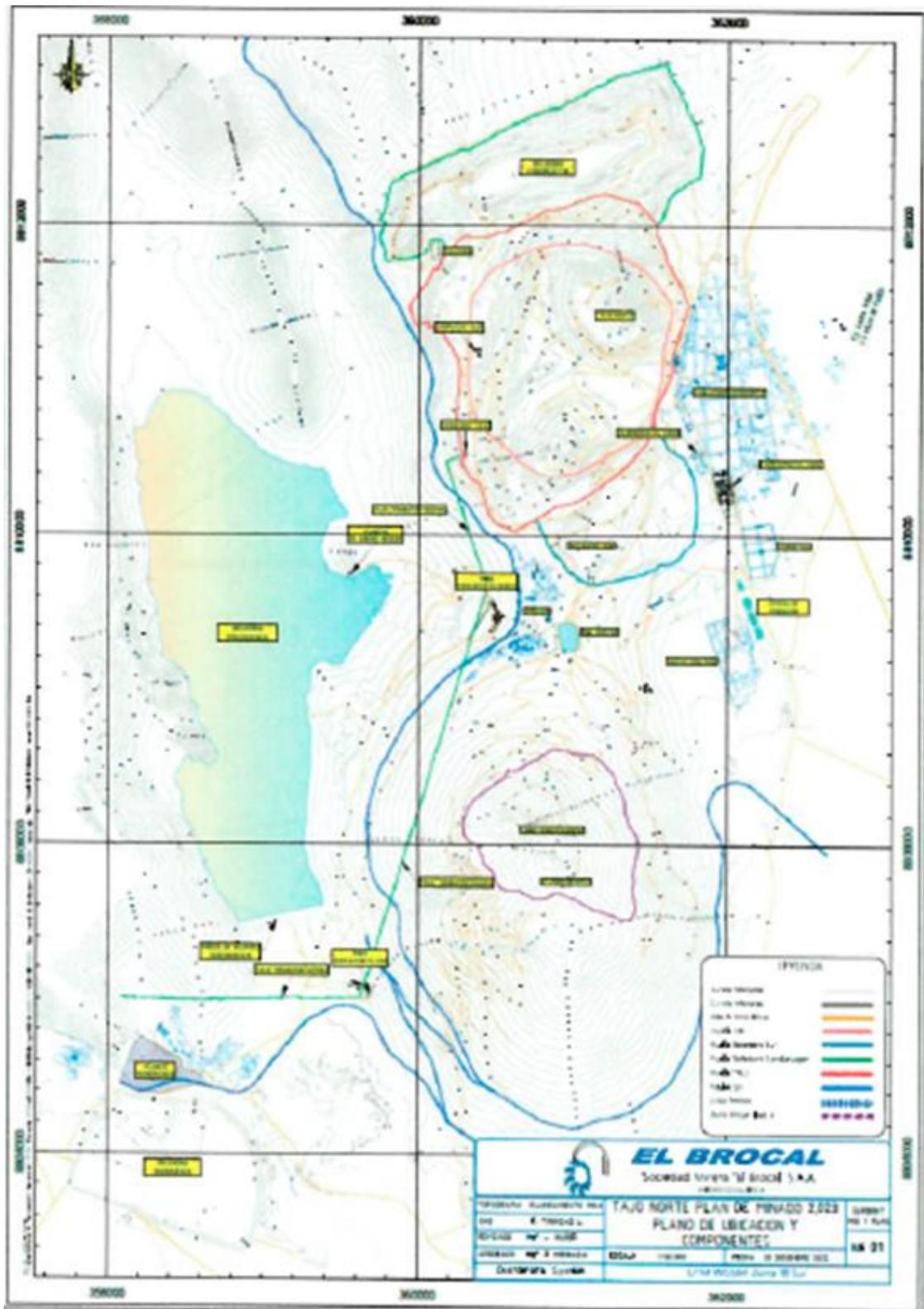
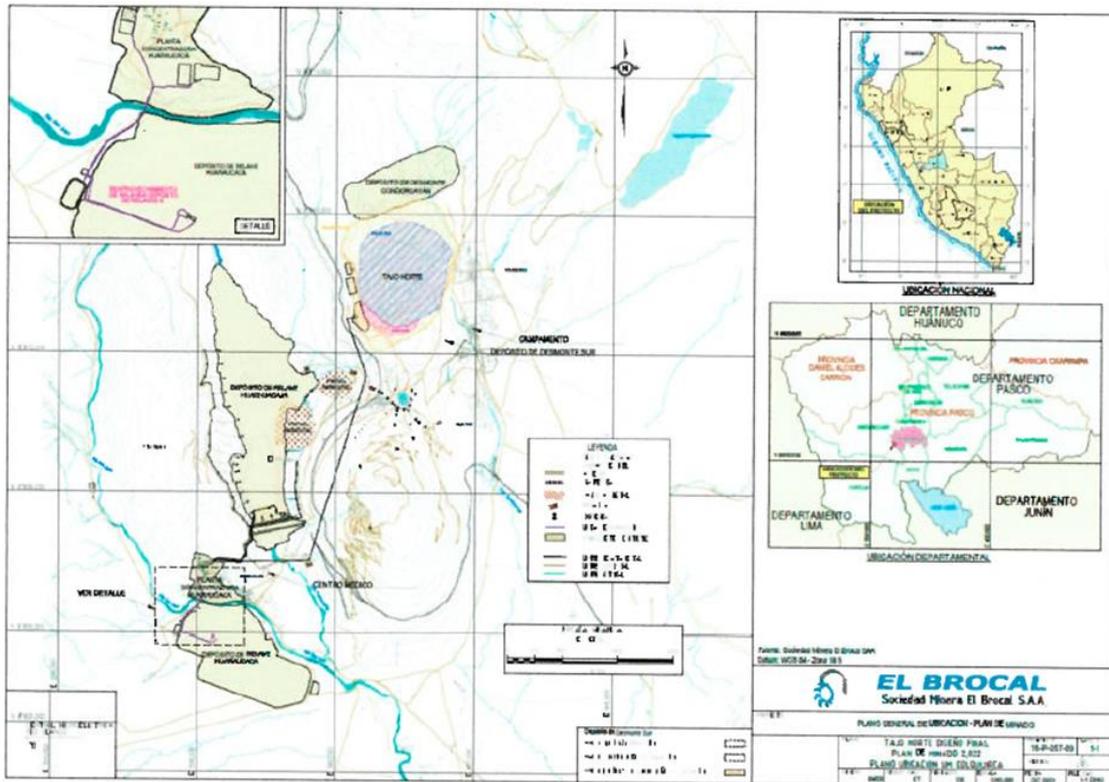


Figura 1. Plano general de instalaciones superficiales



**Figura 2. Plano de ubicación geográfica**  
**Tomada del Plan de minado de la UEA Colquijirca - Sociedad Minera El Brocal S.A.A.**

Dentro del estudio del análisis del comportamiento hidrológico subterráneo, se necesita actualizar toda la información geológica, hidrológica e hidrogeológica disponible en la unidad minera para complementar el entendimiento hidrogeológico del sitio, actualizar el esquema conceptual de funcionamiento hidrodinámico y el modelo numérico hidrogeológico, teniendo en cuentas las recomendaciones y los riesgos relacionados a la interacción con el agua subterránea. Por esta razón, se formuló la pregunta principal: ¿cuál es la relación entre los factores y el comportamiento hidrológico en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal?

## 1.1.2. Formulación del problema

### 1.1.2.1. Problema general

¿Cuál es la relación entre los factores y el comportamiento hidrológico en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal?

### 1.1.2.2. Problemas específicos

1. ¿Cómo es el comportamiento de la precipitación pluvial en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal?
2. ¿Cómo es el comportamiento del caudal en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal?

3. ¿Cuáles son las características fisiográficas más importantes en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal?

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Determinar la relación entre los factores y el comportamiento hidrológico en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

1. Describir el comportamiento de la precipitación pluvial en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.
2. Describir el comportamiento del caudal en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.
3. Determinar las características fisiográficas más importantes en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.

## **1.3. Justificación e importancia**

### **1.3.1. Justificación teórica**

La investigación se justifica de forma teórica al buscar contribuir con la información y el conocimiento respecto al comportamiento de los factores hidrológicos, la precipitación pluvial y el caudal. Esto se considera como información fundamental para tomar decisiones eficaces mediante el análisis de su comportamiento, respecto a la gestión correcta del recurso hídrico dentro de la Unidad Minera Colquijirca El Brocal permitiendo implementar acciones para promover la interacción entre los interesados y fortalecer las capacidades técnicas definiendo los conocimientos generados.

### **1.3.2. Justificación práctica**

La investigación se justifica de forma práctica al realizar el monitoreo de los parámetros de la precipitación pluvial y el comportamiento del caudal, lo que permite conocer el régimen hidrológico con el fin de realizar una correlación y buscar la influencia entre los factores hidrológicos con el comportamiento del mismo, para así, después, realizar obtener la productividad del régimen hidrológico de un área determinada.



### **1.4.3. Delimitación económica**

La presente investigación se delimita en el aspecto económico donde fue financiado en su totalidad por el autor, con la finalidad de cubrir los egresos necesarios para el desarrollo de la investigación.

## **1.5. Hipótesis de la investigación**

### **1.5.1. Hipótesis general**

Existe una relación directa y significativa entre los factores y el comportamiento hidrológico en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.

### **1.5.2. Hipótesis específicas**

1. Existen diferencias significativas en el comportamiento de la precipitación pluvial en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.
2. Existen diferencias significativas en el comportamiento del caudal en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.
3. Las características fisiográficas más importantes en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal corresponden a una cuenca pequeña subterránea.

## **1.6. Identificación de las variables**

### **1.6.1. Variable independiente: Factores hidrológicos**

Acosta et al. afirman que “son los factores que determina la naturaleza de descarga de los ríos o escorrentía superficial, los factores pueden ser agrupados en precipitación pluvial y las características fisiográficas de la unidad” (3).

La precipitación pluvial se mide en mm, se denomina a toda el agua meteórica que cae en la superficie de tierra, tanto de forma líquida y sólida (3).

### **1.6.2. Variable dependiente: Comportamiento hidrológico**

Según iMHEA: “se rige, además de sus características fisiográficas, por algunos procesos del ciclo hidrológico del agua, tales como: evapotranspiración, tipos de suelo y subsuelo y vegetación, entre muchos otros” (4).

Es la cantidad de agua expresada en volumen (libros o m<sup>3</sup>) que circula en un lugar de un río (sección) por unidad de tiempo (horas o segundos) (4).

### 1.6.3. Operacionalización de variables

**Tabla 1. Operacionalización de variables**

Variables	Dimensiones	Indicadores
Independiente:	Precipitación pluvial	Duración de las precipitaciones
		Intensidad de las precipitaciones
Factores hidrológicos	Características fisiográficas	Precipitación promedio
		Área de la hidrológica subterránea
		Perímetro del hidrológico subterráneo
		Pendiente del hidrológico subterráneo
		Curva hipsométrica
Dependiente:		Pendiente general del curso principal del dren
Comportamiento hidrológico	Comportamiento del caudal	Caudal de escorrentía superficial
		Caudal específico

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Antecedentes del problema**

##### **2.1.1. Antecedentes nacionales**

En la tesis titulada: “*Análisis geomecánico y diseño de estabilidad física e hidrológica de labores mineras subterráneas en Santillana, Ayacucho 2020*” de Chávez y García (5), los autores indicaron que el propósito de este estudio fue llevar a cabo un análisis para el diseño de la estabilidad física e hidrológica en el sellado de las operaciones mineras BSB9 y BSB10 en el cierre de la mina Santillana en Ayacucho. La investigación se enmarcó en un enfoque descriptivo, explicativo y cuantitativo, utilizando instrumentos como el formato de clasificación geomecánica y la ficha de toma de datos de campo. Se evaluaron los parámetros geomecánicos basados en el RMR 89, RMR ajustado, GSI y Q de Barton para los macizos rocosos donde se encuentran ubicadas las operaciones mineras BSB9 y BSB10, determinando la calidad de la roca para cada una de ellas. Se llevó a cabo un análisis cinemático utilizando el software Dips para identificar los posibles tipos de ruptura para cada operación minera. Con la información recopilada, se diseñó mediante planos la estabilidad física utilizando un tapón de tipo I, y la estabilidad hidrológica mediante una zanja de tipo trapezoidal, además de considerar la estabilidad geoquímica mediante un bloqueo de aire para las chimeneas. De esta manera, se garantizó la estabilidad para la fase de cierre de la mina, previniendo la generación de aguas ácidas (5).

En la tesis titulada: “*Estudio hidrológico e hidrogeológico de la microcuenca Hércules de la Compañía Minera Lincuna S.A. – Huaraz*” de Quintana (6), la autora indicó que la contaminación ambiental tiene enormes repercusiones en el medio ambiente. Para abordar este problema, se emplean diversas metodologías que se centran en el estudio hidrológico e hidrogeológico para evaluar la cantidad y calidad del agua en la microcuenca Hércules de

Minera Lincuna S.A. Este estudio utiliza una variedad de métodos, incluyendo enfoques deductivos, inductivos, evaluativos, así como análisis y síntesis. La investigación se enfoca en la descripción y explicación de los datos recopilados sobre la geología local, mapeando la hidrología e hidrogeología y realizando análisis estadísticos. La microcuenca Hércules abarca un área de 7.31 km<sup>2</sup> dentro de la cuenca de Huarmey, donde se encuentra la compañía minera Lincuna S. A. Utilizan el método de Lutz Schol, se calcularon los caudales, que oscilaron entre 0.06 y 49.21 litros por segundo para los meses de julio y febrero, respectivamente. En cuanto a la calidad del agua, se compararon los resultados de los puntos de monitoreo CAg-2 e IM-01 con los estándares de calidad ambiental y los límites máximos permisibles establecidos por decretos supremos. Se observó que la concentración de ciertos metales como el zinc, arsénico y sulfatos, entre otros, superaba los límites permitidos, y se atribuye a la lixiviación de las rocas volcánicas (6).

En la tesis titulada: “*Simulación del impacto de la variabilidad climática sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca del lago Chinchaycocha – Junín*” de Hurtado (7), el autor indicó que el propósito de esta investigación fue evaluar cómo la variabilidad climática afecta el comportamiento hidrológico de la cuenca del lago Chinchaycocha – Junín, utilizando un modelo determinístico. El estudio se realizó de manera descriptiva y no experimental, siguiendo un enfoque longitudinal que se centró en la observación, recopilación de datos, análisis estadísticos y explicación de los cambios a lo largo del tiempo. Se empleó el modelo hidrológico SWAT + (herramienta de evaluación de suelo y agua) para simular el comportamiento hidrológico entre 1981-2018, con una calibración que arrojó valores de R<sup>2</sup> de 0,59 y p-value de 1,284e-05, y una validación que mostró valores de PBIAS de 18,5 y p-value de 0,0501. Estos procesos se compararon con datos observados de la represa Upamayo. Se utilizaron variables hidrometeorológicas y geográficas, así como datos de temperatura y precipitación obtenidos de fuentes como PISCO (Peruvian Interpolation of the SENAMHI’s Climatological and Hydrological Stations) y Senamhi. Además, se utilizó teledetección para analizar los cambios en la superficie del lago Chinchaycocha durante la estación seca entre 2014 y 2018. Los resultados de la simulación mostraron un caudal máximo anual de escurrimiento superficial de 16 200 m<sup>3</sup> /año en 2017 y un mínimo de 1 610 m<sup>3</sup> /año en 1981. Se observó una correlación positiva entre la precipitación y el caudal simulado (R<sup>2</sup> = 0,81), mientras que las temperaturas máximas y mínimas mostraron una correlación negativa. Los últimos dos años evaluados mostraron variabilidad en la precipitación, lo que afectó el recurso hídrico. No se encontraron diferencias significativas en la superficie del lago Chinchaycocha durante el período evaluado. Se proyectó el comportamiento hidrológico de la cuenca hasta 2028 utilizando redes neuronales, con un caudal máximo proyectado de 2 354 m<sup>3</sup> /mes en enero de 2021 y un mínimo de 278 m<sup>3</sup> /mes en agosto de 2019 (7).

En la tesis titulada: “*Análisis del comportamiento del balance hídrico superficial de la Sub Cuenca Ichu*” de Chanca y Soto (8), los autores indicaron que el propósito de esta investigación fue examinar el comportamiento del balance hídrico superficial en la subcuenca Ichu. Los objetivos específicos incluyeron la identificación de los meses con exceso y déficit en el balance hídrico, así como la evaluación del impacto de diferentes métodos de cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP) en los resultados de dicho balance. Se adoptó un enfoque no experimental aprovechando los datos proporcionados por el Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología (Senamhi), con tres estaciones meteorológicas ubicadas en la parte alta, media y baja de la subcuenca. Se recopilaron datos de precipitación, temperatura y humedad relativa desde el año 2000 hasta el 2018. A partir de estos datos, se determinaron las áreas de influencia de cada estación mediante el método del polígono de Thiessen. Se calculó la evapotranspiración potencial (ETP) y se realizó el balance hídrico superficial (BHS), generando un total de 114 balances, siguiendo la guía metodológica de la Unesco para América del Sur. Los resultados mostraron que, según el método de Thornthwaite y Mather (BHS(T&M)), los meses de exceso de agua fueron enero, febrero, marzo, abril y diciembre, excepto en la parte baja de la cuenca donde el exceso se registró en marzo. En cambio, según el método de Garcia y López (BHS G&L)), los meses con mayor exceso de agua fueron enero, febrero, marzo, abril, diciembre, noviembre y octubre. Además, se observaron excesos en mayo y septiembre en la parte media y alta de la cuenca en varios años. En cuanto a los meses de déficit de agua, el BHS(T&M) identificó agosto, septiembre y octubre como los más afectados, seguidos por julio y noviembre con déficits moderados. Por otro lado, el BHS(G&L) mostró resultados de déficit únicamente en la parte baja de la cuenca, específicamente en noviembre de 2003. Los resultados del BHS con cálculo de ETP mediante el método de Thornthwaite y Mather (T&M) mostraron una consistencia notable a lo largo del periodo de estudio, reflejando los patrones esperados de fenómenos climáticos y estacionalidad en la subcuenca (8).

En la tesis titulada: “*Análisis de precipitación del periodo de 1981-2014 mediante la metodología de Downscaling de precipitación en la UH-Yauli para realizar predicciones climáticas futuras*” de Huamani (9), el autor indicó que el objetivo del presente estudio es realizar una reducción de escala de las precipitaciones en la unidad hidrográfica (UH) Yauli durante el periodo 1981-2014, con el propósito de realizar predicciones futuras hasta el año 2099 en esta variable climática. Para llevar a cabo este análisis, se emplearon datos de modelos de circulación global de diferentes países, obtenidos del escenario del "Proyecto de Interpolación de Modelos Acoplados - Fase 6" (CIMP-6), así como datos observados del producto PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations). Se aplicó el método de mapeo de cuantiles utilizando el programa

R-Studio para corregir sesgos presentes en los datos de los modelos de circulación global. Se evaluó la calidad de los datos mediante métricas estadísticas durante el proceso de reducción de escala (downscaling), se analizó la estacionalidad en el periodo base (1981-2014) de los datos de los modelos de circulación global y se verificó su similitud con los datos observados (PISCO). Además, se examinaron las anomalías de los modelos de circulación global durante el periodo 2020-2099 y se cuantificaron las variaciones en las precipitaciones para cada modelo (GCM), utilizando como referencia el periodo 1981-2014. Los resultados revelaron un aumento en las precipitaciones proyectadas para el año 2099, con la presencia de anomalías y eventos extremos. También se identificaron periodos de sequía en algunos modelos de circulación global, especialmente durante los meses secos (9).

### **2.1.2. Antecedentes internacionales**

En la tesis titulada: “*Análisis del comportamiento hidrológico de obras de cosecha de agua por escorrentía superficial de tipo reservorio, sobre la microcuenca Quebrada Sucia, corredor seco de Nicaragua*” de Matus (10), el autor indicó que en áreas donde el agua es escasa, la falta de lluvia durante períodos prolongados puede reducir la disponibilidad del recurso hasta un 30 % a 40 %, lo cual afecta negativamente la producción de cultivos básicos, fundamentales para la subsistencia en la región. Este estudio se llevó a cabo en la microcuenca Quebrada Sucia, ubicada en la subcuenca del río Inalí, en los municipios de San Lucas y Somoto, departamento de Madriz, en Nicaragua. El objetivo fue analizar el comportamiento de variables hidrológicas (agua subterránea, humedad del suelo, percolación) que describen el balance hídrico en la microcuenca, considerando diferentes escenarios de construcción de obras de cosecha de agua. Se empleó un enfoque exploratorio y un diseño de muestreo no probabilístico por conveniencia, basado en información geoespacial secundaria y la herramienta para la evaluación del suelo y agua (SWAT). Los escenarios evaluados fueron: integración de las obras existentes construidas por el proyecto cosecha de agua a SWAT; incremento del 25 % en la construcción de nuevas obras, identificando sitios potenciales; y el incremento del 50 %, que mostró un aumento significativo en la contribución de agua subterránea en la microcuenca, hasta un 22 % más que los escenarios anteriores. Estos hallazgos sugieren que aumentar la cantidad de obras para la cosecha de agua tiene un impacto positivo en la recarga de acuíferos y, por consiguiente, en la disponibilidad de agua a largo plazo. Se subraya la importancia de implementar y mantener estas obras en áreas similares, como estrategia clave para asegurar una gestión sostenible del agua (10).

En la tesis titulada: “*Relación geomorfología-hidrología del Valle de Antinaco – Los Colorados, Sierras Pampeanas y Sistema de Famatina, provincia de La Rioja*” de Corbat (11), la autora indicó que el presente estudio de doctorado representa una contribución al entendimiento de las características geomorfológicas y sus implicaciones hidrológicas en el

Valle de Antinaco - Los Colorados, situado en la región central de la provincia de La Rioja. Se basa en la integración de trabajos previos y de información disponible. El análisis de las características geomorfológicas en el área de estudio ha permitido comprender los agentes, factores y procesos que han dado forma al paisaje, así como su interacción con el agua superficial y subterránea, aspecto crucial para la gestión sostenible de este recurso en la zona. Este estudio cobra especial importancia dada la creciente demanda de agua relacionada con el desarrollo socioeconómico y las condiciones climáticas de la región, así como la escasez de información hidrológica y climática disponible. Se ha propuesto investigar la relación entre aspectos geomorfológicos e hidrológicos, mediante su identificación, descripción, caracterización y registro. Se plantean preguntas sobre el posible impacto de la tectónica y los cambios climáticos en la morfología del paisaje y su influencia en el comportamiento hidrológico. Para abordar estas cuestiones, se llevaron a cabo actividades de campo, gabinete y laboratorio, incluyendo recopilación y análisis de material temático, procesamiento de imágenes satelitales y modelos digitales de elevación, observaciones de campo, toma de muestras, análisis granulométrico e identificación mineral, entre otros. Se reconoce la importancia del contexto geológico para comprender las características específicas de esta investigación. Se analizó información geológica, estructural, geomorfológica y topográfica, así como datos derivados de tareas de campo y procesamiento digital para establecer la influencia de estos factores en el relieve. También se investigó si las morfologías pueden diferenciar sectores con comportamientos hidrológicos particulares, utilizando las características descritas y su distribución espacial. Se elaboraron mapas geomorfológicos para el Valle de Antinaco - Los Colorados y la cuenca del río del Oro, destacando serranías, depresiones tectónicas y otras formas del relieve. Se identificaron estructuras geológicas que afectan los depósitos cuaternarios, contribuyendo a la comprensión de la evolución geomorfológica local. El análisis hidrológico permitió comparaciones de datos y la identificación de procesos en distintos sectores del paisaje. La integración de características ambientales confirmó la relación entre aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrológicos. Los resultados y mapas generados pueden ser útiles en futuras investigaciones y en la gestión ambiental y del agua en la región. Esta metodología puede ser aplicable a otros valles con escasa información o que requieran un análisis detallado de la relación entre componentes ambientales (11).

En la tesis titulada: “*Análisis multitemporal de las características geomorfológicas de la Cuenca Río Quito presionada por actividad minera*” de Asprilla (12), el autor indicó que el propósito de este estudio es llevar a cabo un análisis temporal de las características geomorfológicas en la cuenca del río Quito, ubicada en el departamento del Chocó. Esto se realiza mediante la evaluación de la actividad minera a lo largo del tiempo utilizando imágenes de radar Alos Palsar y Sentinel 1 procesadas con el software SNAP, así como la delimitación

de la cuenca y la detección de posibles cambios causados por la minería en la red fluvial. Se identifica una alta presión sobre la vegetación ribereña en varios sectores, especialmente desde la comunidad de San Isidro hasta Villa Conto. Se observa que la extensión de la cuenca pasó de 1702.1 km<sup>2</sup> en 2007 a 1702.58 km<sup>2</sup> en 2018, con una ligera reducción en el perímetro y la pendiente media. Se detectan alteraciones en el perfil altimétrico del cauce principal, posiblemente causadas por la acumulación de sedimentos debido a la extracción minera. En cuanto a los segmentos fluviales evaluados, el 44 % se interseca con áreas degradadas en 2010, con varios cambios registrados posteriormente. Se concluye que la actividad minera continua está causando deterioro en la cuenca, afectando la anchura, estructura, naturalidad y conectividad del corredor ribereño, lo que a su vez tiene impactos negativos en la geomorfología de los cauces fluviales (12).

En la tesis titulada: “*Minería y seguridad hídrica en el noroeste de México: un análisis de doble exposición*” de Lutz (13), la autora indicó que el propósito es investigar las interacciones entre la actividad minera y la seguridad del agua en Sonora, considerando el contexto del cambio climático y cómo estas interacciones afectan a las comunidades rurales, exponiéndolas a riesgos múltiples. Se utiliza la localidad de Cucurpe como un ejemplo ilustrativo de estas relaciones. Se emplean técnicas tanto cuantitativas como cualitativas para recopilar, construir y analizar datos espaciales, estadísticos y discursivos en diversas escalas. Los resultados indican que muchas de las concesiones mineras de tierra y agua se encuentran en áreas con graves limitaciones hídricas. Aunque pueden existir beneficios a nivel local, las comunidades enfrentan riesgos impredecibles a corto plazo. Este estudio tiene limitaciones debido a su naturaleza exploratoria y descriptiva, las cuales podrían superarse en el futuro mediante el uso de muestras de estudio representativas a nivel regional. Se concluye destacando la importancia de la colaboración entre los sectores minero, gubernamental y social para garantizar la seguridad del agua frente al cambio climático (13).

En la tesis titulada: “*Análisis del comportamiento ante metales pesados en bacterias aisladas de relaves mineros zacatecanos*” de Solano (14), el autor indicó que la problemática de la contaminación causada por metales pesados se ha destacado como un tema de relevancia debido a sus impactos ambientales y sociales en el desarrollo y la supervivencia de todas las formas de vida, especialmente para los seres humanos. En el Estado de Zacatecas, la actividad minera, centrada principalmente en la extracción de oro y plata, tiene una gran importancia en la actualidad. El propósito general de este proyecto es investigar la respuesta bacteriana ante la presencia de Zn, Pb y As, así como explorar posibles mecanismos de interacción bacteria-metal. Esto se logra mediante el aislamiento bacteriano a partir de muestras de relaves mineros recolectadas en las áreas de estudio, con el fin de evaluar la tolerancia o resistencia bacteriana

a estos metales y determinar su concentración en los aislados bacterianos para proponer un posible mecanismo de interacción, comparando los resultados obtenidos con la información existente en la literatura científica. El proceso incluyó el análisis de muestras de suelo, el aislamiento de microorganismos y su identificación mediante tinción de Gram. Luego, se evaluó la respuesta de los aislados frente a los metales, midiendo la densidad óptica. Posteriormente, se cuantificaron los metales mediante espectrometría de absorción atómica para determinar su distribución entre el medio de cultivo y la biomasa. Se logró aislar nueve cepas bacterianas, cinco de la mina El Bote y cuatro de Concepción del Oro, de las cuales siete fueron Gram positivas y dos Gram negativas. Las bacterias expuestas al Zn mostraron un mayor crecimiento en comparación con el control, con una mayor acumulación de este metal en la biomasa que en el medio de cultivo. Por otro lado, el As y el Pb resultaron ser tóxicos, inhibiendo el crecimiento bacteriano y mostrando una concentración mínima en la biomasa, con la mayor cantidad presente en el medio de cultivo. Los resultados obtenidos fueron consistentes con la literatura científica, sugiriendo un posible mecanismo de bioacumulación para el Zn, mientras que la interacción con el As y el Pb podría implicar mecanismos de biosorción y bioacumulación, aunque resultaron ser tóxicos para las bacterias estudiadas (14).

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.1.1. Comportamiento hidrológico**

#### **2.1.1.1. Clima**

Como lo comenta Chereque (15) “el clima es un conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas caracterizado por los estados y la evolución del tiempo en el curso de un período suficientemente largo en un dominio espacial determinado” (15). Los elementos principales que conforman al clima son la temperatura, precipitación, presión, viento y radiación solar (15). De igual forma, afirmó que “el clima, de forma sencilla para su comprensión, es el patrón medio del tiempo a largo plazo” (15).

#### **2.1.1.2. Variabilidad climática**

Chereque (1980) menciona que “es una medida del rango en que los elementos climáticos, como temperatura o lluvia, varían de un año a otro. Incluso puede incluir las variaciones en la actividad de condiciones extremas, como las variables del número de lluvias” (15).

Los factores que condicionan al clima en gran medida son: la latitud que determina la intensidad de radiación solar, la altitud determina la temperatura y la continentalidad refiriéndose a la mayor o menor proximidad de un lugar a los mares (15). Con esto, puede

afirmarse que el clima presenta fluctuaciones durante periodos, dichas fluctuaciones contienen el registro de datos de la variabilidad climática.

Por lo mencionado, la variabilidad climática se comprende como las variaciones del estado promedio del clima en las escalas temporales y espaciales, teniendo en cuenta los eventos meteorológicos extremos de largos periodos como sequías prolongadas, lluvias torrenciales, inundaciones, eventos climatológicos de El Niño y La Niña, entre otros similares.

### **2.1.1.3. Efectos del cambio climático en el comportamiento hidrológico.**

Los cambios climáticos alteran todos los componentes hidrológicos, al igual que los procesos físicos que normalmente son considerados al describir el ciclo hidrológico. Las modificaciones del comportamiento hidrológico normalmente son:

- El ciclo del agua.
- El comportamiento de la cobertura vegetal.
- El uso del territorio.
- Las extracciones de agua para los humanos.

El análisis de las variaciones de estos aspectos físicos permite obtener tendencias y predicciones para la pérdida de los recursos hidrológicos, aunque es necesario tener en cuenta las variaciones de las tendencias estimadas de la temperatura y las precipitaciones por cada siglo, con el fin de tener altos niveles de representatividad de los datos hidrológicos medidos.

## **2.1.2. Factores hidrológicos**

### **2.1.2.1. Factores que influyen sobre el contenido de humedad del suelo**

#### **a) El clima**

Los factores que llegan a influenciar en el contenido de la humedad del suelo, según iMHEA: “en todos los lugares, las lluvias varían con la estación del año; la frecuencia dentro de la estación, la media durante un periodo subestacional dado la confiabilidad anual de ocurrencia en una época” (4). El clima del lugar toma en cuenta la cantidad real del recurso hidrológico, el promedio en cada periodo semejante y la cantidad dentro de cada evento de lluvia.

#### **b) Propiedades del suelo**

De la misma forma, las propiedades del suelo influyen en gran medida al contenido de la humedad del suelo, debido a que varía en tipos, profundidad terrestre y cantidad de materias orgánicas encontradas en el suelo.

Para un correcto análisis de los factores, son importantes que se encuentren presentes las siguientes capacidades físicas:

- Capacidad de infiltración del agua
- Capacidad de permeabilidad del agua
- Capacidad de retención del agua

### **c) Topografía**

Las estructuras geológicas subyacentes, en conjunto con los fenómenos climáticos y de elevación, impactan la configuración de los paisajes, ejerciendo influencia en la creación tanto de pendientes abruptas como suaves (4).

El agua recolectada por una cuenca natural se dirige hacia áreas de menor altitud en su salida, donde puede mezclarse con aguas provenientes de otras cuencas. Los límites exteriores de la cuenca están marcados por crestas de elevaciones que circundan (4). En los bordes de un valle, el flujo superficial tiende a avanzar de manera perpendicular a la pendiente, desde las crestas hasta el cauce del curso de agua.

### **d) Cobertura del suelo**

Una cobertura de suelo absorbe las energías de las gotas de agua, sean de lluvia o de riego; estas condiciones ayudan a desintegrar los agregados del suelo y desprender partículas finas (14).

La cobertura del suelo y la superficie presentan un contacto físico que obstruye el movimiento de la escorrentía, dando tiempo para la infiltración y la reducción del volumen de la escorrentía (15). Existen dos aspectos importantes de la cobertura de la superficie a ser distinguida:

- La capa superficial retiene la energía de las gotas de lluvia, evitando la erosión de los espacios porosos donde el agua puede infiltrarse.
- Cuando la capa entra en contacto con el suelo, disminuye el escurrimiento superficial, permitiendo que haya más tiempo para que el agua se filtre en el suelo.

### **2.1.2.2. Factores que degradan la regulación hídrica**

Dentro de los factores que degradan la regulación hídrica, dependiendo la zona cultural, se encuentran el sobrepastoreo, la deforestación, las quemas forestales y el cambio del uso de suelo. En general, las intervenciones humanas producen un gran aumento de la variabilidad del

flujo de la corriente hídrica y la reducción de esta, sin importar las propiedades hidrológicas del ecosistema real.

**a) Deforestación:**

Provoca disminución de recursos hídricos, ya que el rol ecológico que desempeña el bosque y las plantas en general es generar agua, tanto al regular el ciclo hídrico como al contribuir a la formación de precipitaciones mediante la evapotranspiración (4).

**b) Quemas:**

Las quemas generadas de forma natural, o provocada por intervención humana ocasiona erosión hídrica (4).

### **2.1.3. Medición de caudales**

Entre los métodos para la medición de caudales más conocidos se encuentran:

- Método volumétrico
- Método del flotador
- Método del correntómetro

#### **2.1.3.1. Cuenca hidrográfica**

La cuenca hidrográfica es una unidad natural, cuyos límites físicos son definidos por la divisoria superficial de las aguas. La cuenca permite configurar una red de drenaje superficial que canaliza las aguas hacia otra red (6).

La unidad de gestión territorial se define por la red de drenaje superficial donde interaccionan la biofísica, lo socioeconómico, el ser humano, los ecosistemas y el ambiente (15).

#### **2.1.3.2. Gestión de cuencas hidrográficas**

Cervantes y Bustinza (16) afirmaron que:

La gestión de cuencas tiene como base un conjunto de procesos y acciones encaminados a lograr la sostenibilidad de la misma, denominado como ciclo de gestión de cuencas; el cual incluye: el reconocimiento de la cuenca, la identificación y análisis de los actores e informantes claves, el diagnóstico, el ordenamiento del territorio, el establecimiento de la línea base, la elaboración e implementación del plan de gestión de la cuenca, los mecanismos de gestión financiera y administrativa, el sistema de monitoreo y evaluación, así como la sistematización y comunicación de las experiencias.

### 2.1.3.3. Clasificación de caudales.

#### a) Cuencas:

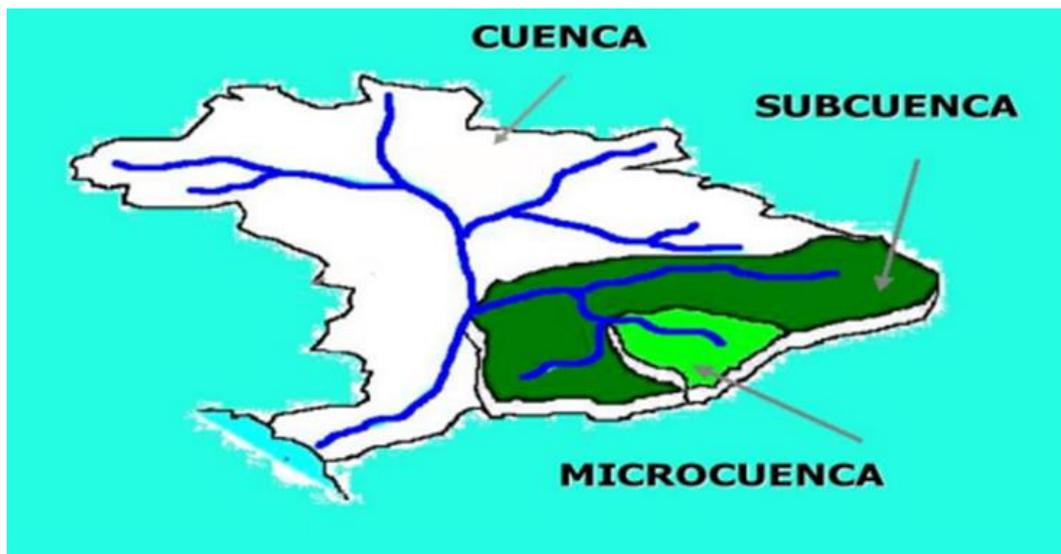
Albergan al río principal, así como a los afluentes que drenan agua hacia él.

#### b) Subcuencas:

Funcionan como piezas del rompecabezas de la cuenca, conformando múltiples subcuencas más pequeñas que en conjunto forman la cuenca completa.

#### c) Microcuencas:

Constituyen una sección de la subcuenca, compuesta por arroyos o quebradas que alimentan a los afluentes secundarios del río.



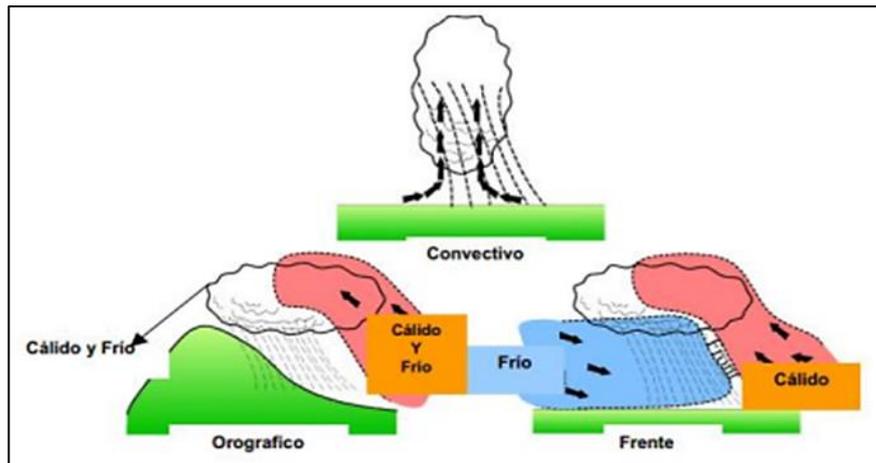
*Figura 4. Clasificación jerárquica de cuencas  
Tomada de Chereque Moran (1980) (15)*

### 2.1.4. Precipitación

Solano (14) menciona que “la precipitación se refiere a toda forma de agua atmosférica que llega a la superficie terrestre, ya sea en estado líquido (lluvia, llovizna, etc.) o sólido (nieve, granizo, etc.), incluyendo también formas ocultas como el rocío y la helada blanca” (14). Estos fenómenos son resultado de cambios en la temperatura o la presión atmosférica. La precipitación representa la principal entrada al sistema hidrológico continental (14).

#### 2.1.4.1. Tipos de precipitación

Existen diferentes tipos de precipitación:



*Figura 5. Principales tipos de precipitaciones  
Tomada de Ataroff y Sanchez (2015)*

#### **a) Precipitación convectiva**

Ataroff y Sanchez (1) indican que:

Se originan debido a una rápida ascensión de masas de aire en la atmósfera, usualmente asociadas con nubes de tipo cúmulos y cumulonimbos que muestran un desarrollo vertical marcado, generado por el proceso de Bergeron. La precipitación que se deriva de este fenómeno tiende a ser tempestuosa, de corta duración (menos de una hora), de alta intensidad y con una cobertura espacial limitada.

#### **b) Precipitación orográfica**

Ataroff y Sanchez (1) indican que:

La precipitación orográfica, como su nombre sugiere (del griego 'oros', que significa montaña), está vinculada a la presencia de obstáculos topográficos. Las características de este tipo de precipitación varían según la altitud, la pendiente y la orientación de la barrera, así como la distancia entre el punto donde se origina el aire cálido y el lugar donde se produce el ascenso. Por lo general, estas precipitaciones exhiben una intensidad y una frecuencia consistentes (1).

#### **c) Precipitación frontal**

Ataroff y Sanchez (1) indican que:

Están vinculados a las zonas de transición entre la temperatura de la masa de aire, el gradiente térmico vertical, la humedad y varios índices atmosféricos, conocidos como frentes. Los frentes fríos ocasionan precipitaciones breves pero intensas, mientras que los frentes cálidos provocan precipitaciones prolongadas, pero menos intensas (1).

#### **2.1.4.2. Formas de precipitación**

La precipitación puede adquirir diversas formas como producto de la condensación del vapor de agua atmosférico, formado en el aire libre o en la superficie de la tierra, y de las condiciones locales (1), siendo las más comunes las que se detallan a continuación:

##### **a) Llovizna:**

Atarrof y Sanchez (1) afirman que “consiste en pequeñas gotas líquidas con diámetros entre 0.1 y 0.5 mm; debido a un asentamiento lento e incluso parece como si flotaran en el aire”.

##### **b) Lluvia:**

Es la forma de precipitación más conocida; consiste de gotas de agua líquida comúnmente mayores a los 5mm de diámetro (1).

##### **c) Nieve:**

Está compuesta de cristales de hielo, de forma hexagonal ramificada, y a menudo aglomerada en copos de nieve, los cuales pueden alcanzar varios centímetros de diámetro (1).

##### **d) Granizo:**

Ataroff y Sanchez (1) indicaron que “es la precipitación en forma de bolas de hielo, producida por nubes convectivas. Los granizos pueden ser esferoidales, cónicos o irregulares en forma, y su tamaño varía desde 5 hasta 125 mm de diámetro, pudiendo llegar a destrozar cosechas”.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1. Método y alcances de la investigación**

La presente investigación se encuentra enmarcado con el enfoque de la investigación científica que estudia ciertas relaciones entre las variables que se están evaluando. Como método general se utilizó el método científico.

##### **3.1.1. Método de la investigación**

Sánchez y otros (17) afirmaron que “es el camino por seguir mediante una serie de operaciones y reglas prefijadas, que permite alcanzar un resultado propuesto; toda labor de procesamiento humano de información requiere asumir el camino más adecuado y viable para lograr el objetivo trazado”. También se considera el método como un procedimiento de indagación para tratar un conjunto de problemas desconocidos, procedimiento en el cual se hace uso fundamental del pensamiento lógico (17). Es decir, el método científico es la forma sistemática en que se efectúa el pensamiento reflexivo que permite llevar a cabo un proceso de investigación científica (17).

Sánchez y otros (17) mencionaron que “el método descriptivo consiste en describir, analizar e interpretar sistemáticamente un conjunto de hechos relacionados con otras variables tal como se da en el presente”. El método descriptivo apunta a estudiar el fenómeno de su estado actual y en su forma natural; por tanto, las posibilidades de tener un control directo sobre las variables de estudio mínimas, por lo cual su validez interna es discutible (17).

Oseña (18) indica que “consiste en el análisis e interpretación de datos que han sido reunidos con un propósito definido, el de comprensión y solución de problemas importantes. La simple descripción de los que es no representa todo el proceso de investigación”. Aunque el acopio de

datos y la referencia de las condiciones dominantes son etapas necesarias, el proceso de investigación no se considera completo hasta que los datos estén organizados, analizados y se hayan derivado conclusiones significativas (18). O sea que el descubrimiento de algo significativo, y que será la meta de todo el proceso.

### 3.1.2. Método específico de la investigación

El diseño de la investigación es de tipo correlacional, según Sánchez y otros (17).mencionaron que “la investigación correlacional se orienta a la determinación del grado de relación existente entre dos o más variables de interés en una misma muestra de sujetos o el grado de relación existente entre dos fenómenos o eventos observados”

Además, según Hernández y otros (19) “este tipo de estudio tiene como finalidad conocer la relación o grado de asociación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un contexto en particular”.

## 3.2. Tipo y nivel de la investigación

### 3.2.1. Tipo de investigación

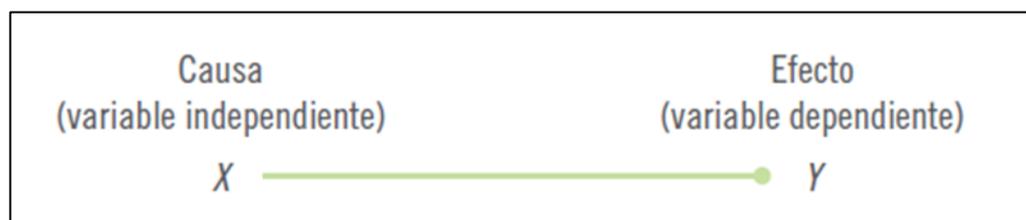
El tipo de investigación a desarrollar es la aplicada, pues parte de una situación problemática que presenta la Unidad Minera El Brocal y que requiere ser intervenida y mejorada.

### 3.2.2. Nivel de investigación

La investigación se encuentra en el nivel explicativo, ya que se medirá la relación entre los factores y el comportamiento hidrológicos en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.

## 3.3. Diseño de la investigación

La investigación conlleva a seleccionar o desarrollar uno o más diseños de investigación y aplicarlos al contexto particular de un estudio. El término diseño se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea.



*Figura 6. Diseño de investigación correlacional  
Tomada de Sánchez y otros (2018)*

En la investigación cuantitativa es posible encontrar diferentes clasificaciones de los diseños. En la investigación se adopta la clasificación: investigación experimental e investigación no experimental.

La investigación experimental puede dividirse de acuerdo con las clásicas categorías de Campbell y Stanley (20), quienes afirmaron que “la división del diseño de investigación experimental se basa en preexperimentales, experimentales puros y cuasiexperimentales”.

Para referirse al término “experimental”, se tiene al menos dos acepciones, una general y otra particular. La general afirma elegir o realizar una acción y luego observar las consecuencias. La manipulación de una variable independiente puede realizar en dos o más grados; el mínimo nivel de manipulación es de presencia-ausencia de la variable independiente. Cada grado de manipulación involucra un grupo en el experimento.

Las preexperimentaciones, se llaman de esta forma por el grado de control mínimo, se aplican en el estudio de caso con una sola medición. Este diseño podría diagramarse de la siguiente forma:

G ----- X ----- O

Hernández y otros (19) afirmaron que “consiste en administrar un estímulo o tratamiento de un grupo, y después aplicar una medición de una o más variables para observar cuál es el nivel del grupo en éstas”. No existe manipulación de la variable independiente o grupos de contraste. Tampoco hay una referencia previa de cuál era el nivel que tenía el grupo en las variables dependientes antes del estímulo (19).

### **3.4. Población y muestra**

#### **3.4.1. Población**

Oseda (18) menciona que “la población es el conjunto de individuos que comparten por lo menos una característica, sea un ciudadano común, la calidad de ser miembro de una asociación voluntaria o de una raza, la matrícula en una misma universidad, o similares” (18 pág. 120).

La población para el estudio de la variable de factores hidrológicos está representada por 12 datos mensuales de precipitación obtenida de pluviómetros instalados en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal y corresponden al periodo: marzo del 2022 a marzo del 2023.

### **3.4.2. Muestra**

Oseña (18) menciona que “la muestra es una parte pequeña de la población o un subconjunto de esta, que posee las principales características de aquella; la que hace posible que el investigador, que trabaja con la muestra, garantice sus resultados a la población”.

La muestra de la investigación abarca todos los registros obtenidos sobre el comportamiento hidrológico con la finalidad de obtener resultados exactos al ser un proyecto de suma precisión e importancia.

## **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

### **3.5.1. Técnicas utilizadas en la recolección de datos**

Para la investigación, la medición y el procesamiento de las variables se recolectó información mediante la observación de los indicadores, empleando mapas donde se lograron identificar la cuenca subterránea y los puntos de origen del recurso hídrico.

### **3.5.2. Instrumentos utilizados en la recolección de datos**

El instrumento de recopilación de datos se trata de fichas de observación y libretas de campo que registraron cada indicador necesario para el análisis del comportamiento hidrológico en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Resultados del tratamiento y análisis de la información**

##### **4.1.1. Análisis de la producción minera**

###### **4.1.1.1. Aspectos generales**

###### **a) Ubicación y accesibilidad**

La Unidad Minera Colquijirca de SMEB se ubica en el distrito de Tinyahuarco, provincia y departamento de Pasco. Hidrográficamente, el proyecto se ubica en la cuenca del río San Juan, afluente al río Mantaro perteneciente a la vertiente del Atlántico.

El acceso desde Lima se realiza a través de la carretera central hasta la ciudad de La Oroya, desde donde se toma la carretera que va hacia la ciudad de Cerro de Pasco. Ambas carreteras se encuentran asfaltadas en su totalidad. El campamento de Colquijirca, se ubica a 15.8 km de la ciudad de Cerro de Pasco. El recorrido desde Lima hasta el campamento de Colquijirca es de aproximadamente 288 km.

###### **b) Geología regional**

A nivel regional, el área de estudio se enmarca en la terminación septentrional de las Altiplanicies, delimitada con el flanco oeste de la cordillera oriental, en zonas situadas en el cuadrángulo de Cerro de Pasco (Hoja 22-k) y sus cuadrantes a escala 1: 50 000 (Hojas 22-k I, 22-k II, 22-k III y 22-k IV).

La secuencia litoestratigráfica regional inicia con la deposición al norte del área de estudio, del grupo Cabanillas en el Paleozoico, conformado por lutitas pizarrosas negras con intercalaciones de areniscas cuarzosas en estratos delgados; seguido de las rocas del grupo Mítu; grupo Pucará con las formaciones Chambará y Aramachay; formación Pocobamba

representado por el miembro Shuco; y finalmente, por conglomerados, facies continentales de brechas y carbonatos de la formación Calera del Oligoceno, que es la principal unidad que alberga la mineralización importante de la U.M. Colquijirca. Estas unidades son intruidas por el complejo volcánico Marcapunta del Mioceno, denominado como Domo Marcapunta.

Cabe señalar que, las rocas sedimentarias presentan una deposición continua, elongada y paralela a la cuenca andina, con un plegamiento asimétrico, formando anticlinales y sinclinales generado por la orogenia andina, y con un lineamiento de su eje de pliegue NO-SE, que se encuentran erosionadas, dejando expuestas las capas sedimentarias. Tectónicamente, en el área de estudio existen tres fallas longitudinales denominadas: falla Huachuacaja, con desplazamiento aparente de rumbo, falla Cerro de Pasco, que corresponde a una falla inversa de rumbo N-S y que se encuentra cubierta por depósitos cuaternarios al sur del área de estudio; y una tercera falla, que sigue el plano axial del anticlinal Mercedes – Chocáyoc, con desplazamiento aparente del bloque este hacia el sur.

### **c) Geología local**

A nivel local, el área de estudio se encuentra representada principalmente por una secuencia de rocas de edades que van desde el Paleozoico interior al Terciario. La base de la secuencia consiste básicamente de rocas detríticas del Devónico y Pérmico de los grupos Cabanillas y Mitu respectivamente, las cuales infrayacen a las rocas carbonatadas del grupo Pucará de edad Triásico Superior – Jurásico Inferior. Se presentan las rocas detríticas de la Formación Pocobamba del Eoceno superior que suprayacen a la secuencia del grupo Pucará. La secuencia culmina con carbonatos impuros y sedimentos detríticos de la formación Calera de edad Eoceno Superior – Oligoceno.

La actividad volcánica en el área de estudio está relacionada con el complejo volcánico Marcapunta, del Mioceno Superior, el cual consiste en cuerpos de dacita porfirítica, brechas hidrotermales y piroclásticos dacíticos sobre una diatrema que corta rocas de los grupos Mitu y Pucará.

El contexto estructural, está caracterizado por la presencia de pliegues de carácter regional de dirección general NNO. El anticlinal denominado Huachuacaja que es la estructura principal en el área de estudio, y está relacionada a la formación de la quebrada del mismo nombre, con un eje alineado en dirección N-S, siguiendo el patrón estructural que domina la región. Asociado al plegamiento, se tienen fallas de orientación N-S y NO-SE, fracturamiento y estructuras kársticas en el flanco oeste del depósito de relaves Huachuacaja. Entre las fallas de importancia se tienen a las siguientes: falla longitudinal este y falla longitudinal oeste, las que

delimitan a las rocas calcáreas del grupo Pucará, que está relacionada con la falla Cerro de Pasco. También se tienen estructuras menores de orientación NO-SE, E-O, que tienen incidencia sobre las secuencias de los grupos Mitu y Pucará.

**a) Grupo Mitu (Pérmico superior – Triásico inferior)**

El grupo Mitu está compuesto principalmente por brechas de composición volcánico – sedimentarias con clastos de cuarcita en una matriz arenosa limosa.

En el área de estudio, este grupo aflora al norte, cubierto parcialmente por depósitos fluvioglaciares. También aflora en contacto con calizas y dolomitas brechadas del grupo Pucará, formando un sinclinal. De igual forma, se ubica de forma localizada y discontinua al sur y SO del tajo norte. Cerca de la quebrada Andacancha, las rocas del grupo Mitu están constituidas por una secuencia conformada por conglomerados polimícticos, con partículas y fragmentos subangulosos cementados por una matriz de arenisca de grano fino, de color rojo ladrillo, en estratos medios a gruesos, con estratificación sesgada, y con niveles de areniscas finas.

**b) Grupo Pucará (TsJi-pu)**

Este grupo aflora principalmente al oeste del área de estudio y se emplaza con tendencia NS. Se encuentra cubierto por los depósitos glaciares y fluvioglaciares. Está constituido por calizas y dolomitas con brechas en la base.

Hacia el norte, entre los cerros Puca Ingenio y Viscajaga, se encuentra fuertemente plegado, formando anticlinales y sinclinales de bajo ángulo, que se extienden hasta el Sur, hacia la margen izquierda del río San Juan. Asimismo, se presentan fallas normales con orientación NO-SE en la parte media de este grupo. Hacia el sur, el grupo Pucará corresponde a calizas indivisas que se evidencian hacia la margen izquierda del río San Juan. Esta secuencia, comienza con una brecha basal entre 10 m y 20 m de potencia, con clastos de filita y cuarzo, seguido por dolomitas con niveles de chert negro y niveles rojos que pueden representar superficies endurecidas.

• **Formación Aramachay (Ji-a):**

La formación Aramachay representa una subdivisión del grupo Pucará, está conformada por lutitas negras con intercalaciones de delgados estratos de caliza gris oscura, con contenidos de materia orgánica a bituminosa, en bancos regulares de 0,2 m a 1 m, con intercalaciones de margas.

En el área de estudio, esta formación aflora al oeste, específicamente al suroeste de la laguna Angascancha y al norte del cerro Llantashpunta. Hacia la base de esta unidad, se emplaza con tendencia N-S la falla Longitudinal Este, cortando la secuencia sedimentaria y originando erosión y reducción de la resistencia del macizo rocoso.

- **Miembro Shuco (Pe-sh):**

Esta unidad comprende una secuencia alternada de conglomerados calcáreos y vulcanoclastos, además de brechas sedimentarias con escasos lentes de limolitas y areniscas, la mayor parte de los clastos son de caliza y sílex de la formación Aramachay, con diámetros de 2 cm a 30 cm, que pueden llegar a 6 m. En el área de estudio, esta unidad aflora de manera superficial al norte, suprayaciendo a las rocas del grupo Cabanillas y cubierto parcialmente por depósitos lacustres.

**c) Formación Calera**

Los afloramientos de esta unidad están constituidos por tres miembros: Calera inferior, Calera medio y Calera superior. A continuación, se describen los tres miembros de la formación Calera.

- **Formación Calera inferior (Po-ca / Inf):**

Esta secuencia está conformada por margas rojas con bancos delgados de calizas margosas, además de sedimentos detríticos, paquetes gruesos y delgados de conglomerados del grupo Pucará, con una matriz calcárea intercalados con niveles de tobas riolíticas. Hacia el límite superior de la unidad, finaliza con una secuencia de calizas varvadas mudstone grises con poca influencia piroclástica. También presenta niveles volcanoclásticos de cenizas de grano fino a medio de tonalidad blanquecina, con biotitas y tobas cristalolíticas.

- **Formación Calera medio (Po-ca / md):**

La formación Calera medio alberga la mineralización de Colquijirca y está constituido principalmente por rocas carbonatadas como dolomías de tonalidades cremas, pardos y beige con intercalaciones delgadas y nódulos de *chert* y en menor grado calizas y margas, además de rocas silíceas representadas por *chert*. También, en menor proporción se presentan intercalaciones de estratos delgados de limoarcillitas y tobas. En el área de estudio, se localiza principalmente en el tajo norte y Smelter.

- **Formación Calera superior (Po-ca / sp):**

Esta conformada por una sucesión de calizas y margas grises con un nivel potente de toba gris, y capas delgadas de limoarcillitas y arcillitas. Los horizontes calcáreos son masivos, de colores grises y pardos, de texturas *mudstone* y *wackestone* con microestructuras de presión.

Los horizontes margosos y limoarcilíticos son de colores grises de diversas tonalidades y se intercalan en estratos delgados. Esta secuencia, se encuentra expuesta en la parte superficial, principalmente al Sur del tajo norte y en el sector de Smelter. Presenta una potencia entre 80 m y 100 m.

**d) Centro volcánico Marcapunta (Mioceno superior)**

Fue definida como diatrema por Noble, 1977. La litología asociada presenta brechas freatomagmáticas hacia los bordes de domo de dacita con ojos de cuarzo hialino visible y fenos de plagioclasas argilizadas. Estas brechas freatomagmáticas sobreyacen directamente sobre Calera inferior, y el miembro Calera medio ha sido desplazado por las lavas y domos producto del vulcanismo.

• **Volcánico Rumiallana (Nm-r):**

Estas rocas se encuentran en forma de domos y lavas dacíticas que gradan a cuarzo latitas, finamente estratificadas, cuya matriz es generalmente material volcánico no consolidados con una capa cementante de calcita; en los sectores adyacentes, principalmente en la ladera al sureste del cerro Marcapunta, están constituidos por piroclastos, tobas y lavas de color gris blanquecino.

El emplazamiento de este cuerpo volcánico es controlado por la falla longitudinal N-S, el que a su vez se relaciona con la mineralización del área de estudio. Se estima que la diatrema o cuello volcánico de Marcapunta tiene un diámetro inferior al complejo volcánico de Cerro de Pasco, pero se considera que su sistema mineralizado extendido entre San Gregorio y Colquijirca alcanzan 8 km en un eje N-S. La actividad de Marcapunta es datada en  $11,5 \pm 0,4$  Ma (Noble, D. y McKee E., 1981) de la edad Mioceno superior, y la actividad hidrotermal en  $10,8 \pm 0,3$  Ma.

• **Depósitos piroclásticos (Qcy):**

Estos depósitos corresponden a una serie de brechas polimícticas con elementos de caliza, cuarzo lechoso, filitas, areniscas en matriz de cuarzo fragmental. En el cerro Marcapunta, estos depósitos tipo base surge (Vidal, 1992) corresponden a una serie de lentes y cuerpos irregulares de geometría subhorizontal a subvertical y flujos piroclásticos, que marcan el inicio de diferentes episodios de domos dacíticos coalescentes.

En Marcapunta norte se ha identificado dos niveles, el primero cubre paleorelieves de la formación Calera, rellenando depresiones topográficas; el segundo, más delgado y menos expuesto, se emplaza en medio de domos dacíticos. En la parte central de Marcapunta sur, se

presentan con niveles de granulometría arenosa con pseudo estratificación o laminación gradada, emplazados también sobre domos dacíticos.

**e) Depósito de cobertura**

• **Depósitos glaciares (Q-gl):**

Estos depósitos se extienden ampliamente al noreste del área de estudio, sobre las laderas de ambos flancos de las quebradas, constituidos por gravas areno arcillosas y arena gravo arcillosa. Alcanzan espesores promedios de 10 m y en ocasiones pueden estar mezclados con materiales coluviales.

En las laderas del sector oeste del cerro Marcapunta, estos depósitos están compuestos predominantemente por grava arcillosa y arcillas arenosas de alta plasticidad. Las investigaciones mediante sondajes sobre estos depósitos indican que estos materiales alcanzan un espesor de hasta 40 m en los sectores bajos próximos al fondo de valle, y en promedio unos 20 m en sectores de mayor altitud.

• **Depósitos fluvioglaciares (Q-fg):**

Estos depósitos se distribuyen principalmente sobre los fondos de valle, cuya composición está conformada principalmente por gravas arenosas con finos, y arenas arcillo – limosas con gravas poco densas. En el sector norte de la quebrada Huachuacaja, estos depósitos alcanzan espesores de hasta 8 m y descansan sobre las areniscas del grupo Mitu.

• **Depósitos aluviales (Q-al):**

Corresponden a los materiales transportados y acumulados por las aguas de los principales flujos como los ríos San Juan, Ocshapampa, Andacancha y Colquijirca. Están conformados por arenas, gravas, cantos rodados, con algunos bolones y finos; generalmente mal gradados, de forma predominante subredondeadas a redondeadas y composición litológica en gran porcentaje por calizas, areniscas y poco porcentaje de rocas ígneas. Alcanzan varios metros de espesor y cerca de las quebradas y el río San Juan se hallan saturados. Los depósitos aluviales forman parte de la planicie aluvial del río San Juan desde Huaraucaca hasta San Gregorio, pueden ser utilizados como canteras de agregados.

• **Depósitos fluvioaluviales (Q-fa):**

Conformados por suelos provenientes de procesos de erosión, trasladados por corrientes fluviales permanentes. Están constituidos por clastos gravosos, con elementos de diferentes tamaño y naturaleza litológica, de formas subangulosas a subredondeadas, se emplazan

principalmente en las márgenes del río San Juan y Andacancha, tapizando depósitos aluviales con clastos redondeados.

- **Depósitos coluviales (Q-co):**

Constituyen los materiales que conforman los escombros de laderas antiguas y/o recientes, están conformados por una mezcla de fragmentos de rocas de diferente tamaño con o sin matriz de finos, yacen desde algo densos hasta sueltos, con partículas y granos de forma predominante angulosa. En el área de estudio se localizan puntualmente en algunos lugares de los flancos del cerro Marcapunta y partes superiores de la cadena de cerros.

- **Depósitos lacustres (Q-la):**

Estos materiales se componen principalmente de horizontes de arena gravosa, arena limosa, arcillas limo – gravosas y limos que en conjunto alcanzan una potencia variable entre 25 y 28 m. constituyen suelos de baja densidad, poco consistentes y deformables. Estos materiales están cubiertos por una delgada capa de suelo orgánico saturado de 3 a 5 m de espesor.

**f) Depósitos antrópicos**

- **Depósitos tecnógenos (Q-te)**

Corresponde a zonas de materiales acarreados por la actividad humana o actividades mineras, en el sector de mina se encuentran como botaderos de desmonte, depósitos de relaves, así como los materiales utilizados en la construcción de los accesos y rellenos.

**d) Geología estructural**

La zona de estudio está controlada estructuralmente por la falla longitudinal mayor reconocida cerca de Cerro de Pasco con una orientación de N165 y con buzamiento de 65°E donde coloca en contacto al Pucara oriental con la formación Pocobamba (Ángeles,1993), considerada una escama gruesa activa que controló la deposición desde el triásico (grupo Pucará), generando en el tiempo cabalgamiento, graven y *horst*. En los eventos tectónicos posteriores, el grupo Pucará fue levantado, erosionado y rellenado con depósitos de conos aluviales, fluviales y sedimentos lacustres calcáreos de la formación Pocobamba y Calera, sobreyaciendo al Mito en discordancia erosional.

Esta secuencia sedimentaria es afectada posteriormente por la tectónica comprensiva del Oligoceno superior y Mioceno inferior generando plegamientos y dando origen a los anticlinales y sinclinales asimétricos reconocidos en el Tajo Norte con tendencia NNW y con mayor compresión hacia el norte identificándose fallas inversas subparalelas a la estratificación

y fallas inversas con ligero sobre escurrimiento (falla Chocayoc). Así mismo, dentro de estas formaciones se tiene pequeños pliegues asimétricos y volcados.

En el informe elaborado por SNC Lavalin y SRK 2021, se presenta un listado de fallas que fueron incluidas en el modelamiento estructural, las cuales se presentan por sectores, esto puede observarse en la siguiente tabla.

**Tabla 2. Fallas identificadas por Lavalin ty SRK, 2021**

Falla	Descripción
Falla Chocayoc	La falla Chocayoc tiene un rumbo de tendencia andina (N5° - 15°O/ 75°SE), es reconocida con mapeo en superficie y sondajes. Esta falla es un conducto de mineralización principalmente de Zn – Pb y Ag, que logra mineralizar varias unidades litológicas (Calera superior, medio e inferior). Se han reconocido otras estructuras menores (14 fallas menores) que representan algunos lineamientos que limitan la mineralización de Zn y en otros casos favorecen la mineralización.
Falla Central	La falla Central presenta un rumbo E-O/ 80°N, probablemente esta falla controle el cuerpo subvolcánico dacítico en este sector.
Falla Unish 1, 2 y Juanita	Estas fallas se presentan en la parte central del centro volcánico Marcapunta, tienen un rumbo NO 5° a 8° SE/60°. No Presentan mayor influencia en la mineralización; sin embargo, la falla Unish podría ser parte del eje por donde ascendió el complejo volcánico Marcapunta.
Falla NW 1 (Principal Mercedes)	La falla NW1 coincide con el eje del sinclinal Principal – Mercedes. Sus mejores afloramientos se encuentran en el sector septentrional del tajo Norte, en donde el núcleo del sinclinal Principal – Mercedes está desplazado. La proyección al SE está cubierta por el deslizamiento ubicado en el sector occidental del tajo Norte, hasta llegar al sector sur donde se manifiesta por el fracturamiento en eje del mismo sinclinal. En tanto, la proyección al norte es incierta debido a que se encuentran los botaderos cubriendo la traza de la falla.
Falla NW 2 (La Pampa – La Llave)	La falla NW2 se puede observar en el sector SE del tajo, corta al flanco oriental del sinclinal Chocayoc – La Llave (flanco La Llave), y se proyecta hasta el sector septentrional del tajo Norte, tiene un buzamiento alto mayor a 75° SW pudiendo llegar a ser vertical. Los afloramientos de la falla se pueden observar con mayor facilidad o evidencia en los niveles inferiores del tajo, en donde se encuentran brechas de falla con más de 1 m de espesor, mientras que hacia la parte superior su traza es difícil de seguir y solo se pueden determinar fracturas en el sector sur y fracturas con óxidos de color blanco en el sector norte.
Falla NW 3 (La Pampa)	La falla NW 3 se encuentra en el flanco Este del tajo Norte, cortando al anticlinal La Llave. La Falla NW 3 se observa en el flanco Norte del tajo Norte y su proyección al SE es hacia el centro poblado Colquijirca. En superficie, su traza no

puede seguirse por mucha distancia, fue definida en base a la compensación del anticlinal La Pampa y el sinclinal Chocayoc – La Llave.

Falla Marcapunta Norte	La falla Marcapunta Norte se encuentra en la parte meridional del área de estudio, su traza fue definida por Sarmiento (2004). Su buzamiento por lo general está entre 70° a 80°N.
Falla 4052	Esta falla fue definida en base al cartografiado geológico del nivel 4052, en este se muestran fallas de dirección N 280° a 290° con un buzamiento promedio de 70° N.
Falla Smelter	La falla Smelter fue definida por Sarmiento (2004) sin indicar el buzamiento de esta. Se asigna un buzamiento superior a 80°N ya que no existe una falla en las labores subterráneas que tengan un buzamiento que coincida con ésta.

*Tomada de SNC Lavalin, 2021*

#### **4.1.2. Análisis económico del área minera**

##### **4.1.2.1. Generalidades**

Amphos 21 Consulting Perú S.A.C. (en adelante, Amphos 21) ha sido contratada por Sociedad Minera El Brocal (en adelante, SMEB) para llevar a cabo la actualización del estudio hidrogeológico de las labores subterráneas de la Unidad Minera Colquijirca como soporte al LOM de mina (LOM, life of mine por sus siglas en inglés).

La UM Colquijirca se ubica en el distrito de Tinyahuarco, provincia de Cerro de Pasco, departamento de Cerro de Pasco, sobre una altitud promedio de 4250 m s. n. m., tal como se muestra en la Figura 1. Esta unidad está conformada por operaciones mineras de tajo abierto (tajo norte), operaciones mineras subterráneas (Marcapunta norte y Marcapunta sur), plantas de procesos (Planta N°1 y Planta N°2), centrales hidroeléctricas de río Blanco y Jupayagra, depósito de relaves e instalaciones de servicios auxiliares, los principales componentes para la evaluación hidrogeológica se muestran en la Figura 2.

##### **4.1.2.2. Objetivos**

El presente estudio tiene como objetivo principal llevar a cabo la actualización del estudio hidrogeológico como soporte al desarrollo de las labores subterráneas en la UM Colquijirca.

En consecuencia, los objetivos específicos son los siguientes:

1. Revisar e integrar toda la información geológica, hidrológica e hidrogeológica disponible en la UM Colquijirca bajo el nuevo LOM que SMEB facilite.
2. Complementar el entendimiento hidrogeológico del sitio mediante la ejecución de investigaciones de campo, lo cual contempla el desarrollo de un mapeo hidrogeológico en

- superficie e interior mina, ejecución de perforaciones, construcción de piezómetros, ejecución de ensayos hidráulicos y muestreo hidroquímico.
3. Actualizar el esquema conceptual de funcionamiento hidrodinámico o comportamiento de flujo subterráneo en el entorno de las labores subterráneas.
  4. Actualizar un modelo numérico hidrogeológico con la finalidad de establecer una herramienta numérica robusta que permitirá representar las condiciones actuales del sitio y proporcione el soporte necesario a las evaluaciones predictivas asociadas al desarrollo y profundización de labores subterráneas (implementación LOM actualizado). Este modelo permitirá determinar o cuantificar el comportamiento del flujo de drenaje asociado con el avance de la mina subterránea.
  5. Determinar recomendaciones y riesgos relacionados a la interacción con el agua subterránea.

#### **4.1.2.3. Metodología de trabajo**

El presente informe fue elaborado a partir de la revisión, evaluación e integración de la información proporcionada por SMEB y del conocimiento geológico e hidrogeológico que Amphos 21 dispone de la UM Colquijirca, conocimiento obtenido de los diversos estudios previos realizados.

De esta manera, se han conceptualizado los procesos asociados con el comportamiento y manejo de los recursos hídricos, en el contexto de la operación; además, de entender las implicancias de la interacción de los componentes actuales y proyectados de la mina, con el sistema de flujo subterráneo.

Para el desarrollo de las evaluaciones, se definió un área de tal manera que incluya la red de monitoreo subterráneo, extensión y ubicación de los componentes de mina, principales cuerpos de agua, entre otros factores necesarios para la definición de un límite robusto el desarrollo de los modelos numéricos.

Sobre la base de todo el conocimiento hidrogeológico disponible, se procedió a elaborar el modelo conceptual de funcionamiento, lo que permite entender cómo se mueve el agua subterránea en todo el ámbito de la operación minera; además, permite conocer de manera cualitativa la interacción que existe entre los principales componentes de la mina con el sistema de flujo subterráneo, la influencia de estos, y los principales sentidos y vías preferenciales del flujo subterráneo.

El modelo conceptual es la base para el desarrollo de los modelos numéricos, los cuales tienen la capacidad de representar las condiciones actuales del sitio y a su vez ser el punto de

partida para el desarrollo de las evaluaciones o simulaciones predictivas, destinadas a entender el comportamiento de los componentes de mina, durante toda la vida útil.

Los modelos numéricos generados serán herramientas robustas que proporcionarán el soporte necesario al entendimiento del comportamiento futuro del área de estudio, soportar la evaluación de impactos y permitan establecer medidas de monitoreo o control.

#### **4.1.2.4. Declaración de responsabilidad (Disclaimer)**

El presente informe, ha sido elaborado por Amphos 21, para uso exclusivo de SMEB. El uso de la información, opiniones o conclusiones contenidas en el presente documento, por parte de terceros distintos a SMEB, es responsabilidad exclusiva de dichas partes.

La información y los análisis contenidos en el presente documento han sido realizados bajo el alcance solicitado por SMEB, a un nivel de detalle acorde con los tiempos requeridos y los objetivos de la labor asignada, y sobre la base del conocimiento adquirido a través de estudios antecedentes realizados por otros proporcionados por SMEB para la elaboración de este informe.

Los resultados presentados en este informe son consistentes con las metodologías de cálculo y simulaciones aplicadas, los mismos han sido revisados y validados bajo el rigor técnico del equipo de trabajo de Amphos 21, con amplia experiencia en estudios similares y estos a su vez han sido aceptados por SMEB. Al mejor saber y entender de Amphos 21, la información presentada en este informe es correcta dentro de las limitaciones especificadas en el mismo.

#### **4.1.2.5. Precipitación**

Para la caracterización de la precipitación mensual y anual del área de estudio se usó la base de datos analizada y tratada previamente, la cual cuenta con la data de 9 estaciones del periodo 1980-2019 (40 años). En la Tabla 2.1 se presenta la elevación y la precipitación media anual de cada estación.

**Tabla 3. Precipitación total anual de las estaciones más cercanas al área de estudio**

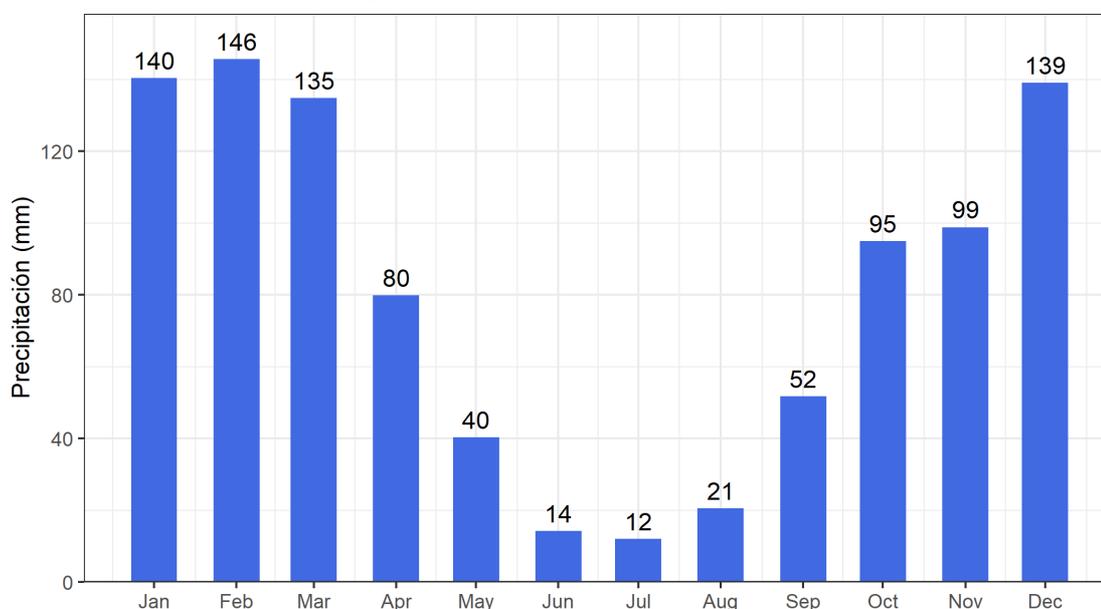
Estación	Elevación (m s. n. m.)	Precipitación media anual (mm)
Carhuacayan	4127	964
Carhuamayo	4150	785
Cerro de Pasco	4260	928
Huaraucaca	4153	772
Hueghue	4175	826

Laguna Surasaca	4400	998
Oyón	3641	541
Shelby	4132	839
Upamayo	4083	857

*Tomada de Amphos 21*

Para la estimación de las series de precipitación media en la zona de estudio y las microcuencas de interés, se han considerado las series de precipitación completadas de las estaciones regionales seleccionadas y la estación local, y se obtuvo una tasa de precipitación anual de 973 mm. Para tomar en cuenta la variabilidad espacial de la precipitación, muy relacionada a la accidentada orografía de la zona de interés y su alta elevación, se consideró el método de interpolación IDW con deriva externa (IED, por sus siglas en inglés), el cual tomacom variable auxiliar la elevación. Es así como los valores mensuales de las diferentes estaciones fueron interpolados espacialmente, y se calcularon las series de precipitación media para las microcuencas de interés y para la zona de estudio en general que presenta una precipitación anual media de 973 mm.

A partir de la serie asignada al área de estudio, se obtuvo la distribución temporal de la precipitación mensual, ver figura 7. De esta figura se observa que la precipitación del área de estudio muestra una estacionalidad, donde la temporada húmeda se presenta de diciembre a marzo durante la cual se tiene el 58 % de la precipitación total anual; una temporada seca de junio a agosto durante la cual se presenta solo el 5 % de la precipitación total anual; la temporada de transición de abril a mayo y de setiembre a noviembre, entre ambas temporadas se presenta el 37 % de la precipitación anual.



*Figura 7. Precipitación media mensual del área de estudio*

#### **4.1.2.6. Evaporación y evapotranspiración**

Para la caracterización de la evaporación del área de estudio se analizó la data de evaporación registrada en 7 estaciones regionales (Cajatambo, Oyón, Picoy, Surasaca Alto, Cerro de Pasco, Upamayo y Yanacancha) y en 1 estación local (Huaraucaca). Del análisis se pudo observar lo siguiente:

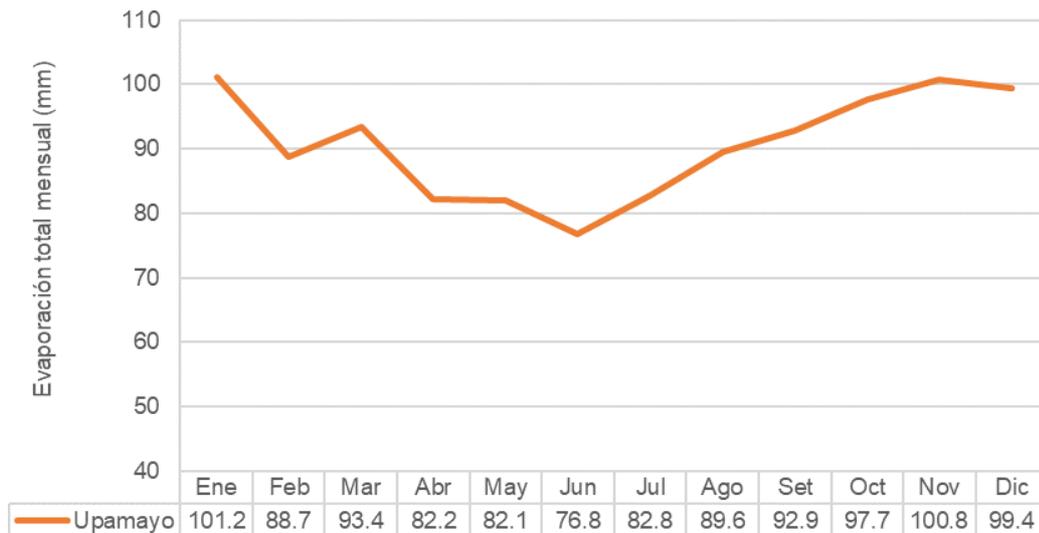
4.1.3. Las estaciones regionales más cercanas al área de estudio son Cerro de Pasco (2011-2016), Upamayo (1965-2015) y Yanacancha (2000-2006).

4.1.4. La única estación regional que presenta un registro largo de evaporación es la estación Upamayo (51 años).

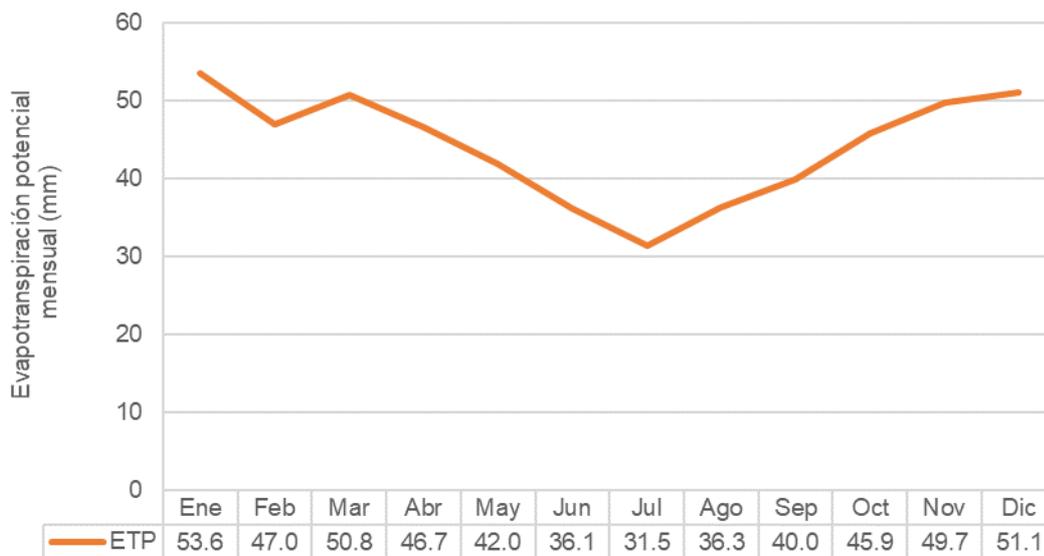
4.1.5. Con respecto a las estaciones locales, se observa que la data de la estación Huaraucaca presenta valores anuales muy por encima de los de otras estaciones y una gran variabilidad interanual, así como muchos valores inconsistentes (valores negativos y demasiado altos) por lo que se descartó su uso.

Por todo lo anterior, se considera que la estación Upamayo representaría mejor las condiciones de evaporación del área de estudio, teniendo así que la evaporación anual media es de 1088 mm y su distribución mensual se presenta en la figura 8. De esta figura se observa que la evaporación varía mensualmente entre 77 mm y 101 mm, presentándose con mayor intensidad entre los meses de agosto y marzo, mientras que valores mucho menores se observan entre abril y julio. Un comportamiento similar puede observarse en la variable de radiación solar, con la cual la evaporación está muy relacionada, dado que la radiación solar es una cuantificación de la energía proveída que permite realizar el proceso de evaporación.

Asimismo, la evapotranspiración potencial mensual fue calculada en base a las temperaturas medias asignadas mediante el método de Thornthwaite y se muestra en la figura 9, de donde se observan mayores tasas entre los meses de octubre y abril y menores tasas entre los meses de mayo y setiembre, observándose el valor mínimo en el mes de julio.



**Figura 8. Evaporación mensual en la estación Upamayo**



**Figura 9. Evapotranspiración potencial mensual**

La información geológica y estructural ha sido desarrollada por SNC-Lavalin (2021) y descrito en el capítulo 3 de la línea base. A continuación, se hace un resumen de la geología del sitio.

#### **4.1.7. Geología regional**

A nivel regional, el área de estudio se enmarca en la terminación septentrional de las altiplanicies, delimitada con el flanco oeste de la cordillera oriental, en zonas situadas en el cuadrángulo de Cerro de Pasco (Hoja 22-k) y sus cuadrantes a escala 1: 50 000 (Hojas 22-kI, 22-k II, 22-k III y 22-k IV).

La secuencia litoestratigráfica regional inicia con la deposición al norte del área de estudio, del grupo Cabanillas en el Paleozoico, conformado por lutitas pizarrosas negras con intercalaciones de areniscas cuarzosas en estratos delgados; seguido de las rocas del grupo Mitu;

grupo Pucará con las formaciones Chambará y Aramachay; formación Pocobamba representado por el miembro Shuco; y finalmente, por conglomerados, facies continentales de brechas y carbonatos de la Formación Calera del Oligoceno, que es la principal unidad que alberga la mineralización importante de la U.M. Colquijirca. Estas unidades son intruidas por el complejo volcánico Marcapunta del Mioceno, denominado como Domo Marcapunta.

Cabe señalar que, las rocas sedimentarias presentan una deposición continua, elongada y paralela a la cuenca andina, con un plegamiento asimétrico, formando anticlinales y sinclinales generado por la orogenia andina, y con un lineamiento de su eje de pliegue NO-SE, que se encuentran erosionadas, dejando expuestas las capas sedimentarias.

Tectónicamente, en el área de estudio existen tres fallas longitudinales denominadas: falla Huachuacaja, con desplazamiento aparente de rumbo; falla Cerro de Pasco, que corresponde a una falla inversa de rumbo N-S y que se encuentra cubierta por depósitos cuaternarios al sur del área de estudio; y una tercera falla, que sigue el plano axial del anticlinal Mercedes – Chocáyoc, con desplazamiento aparente del bloque este hacia el Sur.

#### **4.1.8. Geología local**

A nivel local, el área de estudio se encuentra representada principalmente por una secuencia de rocas de edades que van desde el Paleozoico inferior al Terciario. La base de la secuencia consiste básicamente de rocas detríticas del Devónico y Pérmico de los grupos Cabanillas y Mitu respectivamente, las cuales infrayacen a las rocas carbonatadas del Grupo Pucará de edad Triásico Superior – Jurásico Inferior. Se presentan las rocas detríticas de la formación Pocobamba del Eoceno superior que suprayacen a la secuencia del grupo Pucará. La secuencia culmina con carbonatos impuros y sedimentos detríticos de la formación Calera de edad Eoceno Superior - Oligoceno.

La actividad volcánica en el área de estudio está relacionada con el complejo volcánico Marcapunta, del Mioceno superior, el cual consiste en cuerpos de dacita porfirítica, brechas hidrotermales y piroclásticos dacíticos sobre una diatrema que corta rocas de los grupos Mitu y Pucará.

El contexto estructural, está caracterizado por la presencia de pliegues de carácter regional de dirección general NNO. El anticlinal denominado Huachuacaja que es la estructura principal en el área de estudio, y está relacionada a la formación de la quebrada del mismo nombre, con un eje alineado en dirección N-S, siguiendo el patrón estructural que domina la región. Asociado al plegamiento, se tienen fallas de orientación N-S y NO-SE, fracturamiento y

estructuras kársticas en el flanco oeste del depósito de relaves Huachuacaja. Entre las fallas de importancia se tienen a las siguientes: Falla longitudinal este y falla longitudinal oeste, las que delimitan a las rocas calcáreas del grupo Pucará, que está relacionada con la falla Cerro de Pasco. También se tienen estructuras menores de orientación NO-SE, E-O, que tienen incidencia sobre las secuencias de los grupos Mitu y Pucará.

A continuación, se presentan las unidades litoestratigráficas:

#### **4.1.8.1. Grupo Mitu (Pérmico superior – Triásico inferior)**

El grupo Mitu está compuesto principalmente por brechas de composición volcánico – sedimentarias con clastos de cuarcita en una matriz arenosa limosa.

En el área de estudio, este grupo aflora al norte, cubierto parcialmente por depósitos fluvioglaciares. También aflora en contacto con calizas y dolomitas brechadas del grupo Pucará, formando un sinclinal. De igual forma, se ubica de forma localizada y discontinua al sur y SO del tajo norte. Cerca de la quebrada Andacancha, las rocas del grupo Mitu están constituidas por una secuencia conformada por conglomerados polimícticos, con partículas y fragmentos subangulosos cementados por una matriz de arenisca de grano fino, de color rojo ladrillo, en estratos medios a gruesos, con estratificación sesgada, y con niveles de areniscas finas.

#### **4.1.8.2. Grupo Pucará (TsJi-pu)**

Este grupo aflora principalmente al oeste del área de estudio y se emplaza con tendencia N-S. Se encuentra cubierto por los depósitos glaciares y fluvioglaciares. Está constituido por calizas y dolomitas con brechas en la base.

Hacia el norte, entre los cerros Puca Ingenio y Viscajaga, se encuentra fuertemente plegado, formando anticlinales y sinclinales de bajo ángulo, que se extienden hasta el sur, hacia la margen izquierda del río San Juan. Asimismo, se presentan fallas normales con orientación NO-SE en la parte media de este grupo. Hacia el sur, el grupo Pucará corresponde a calizas indivisas que se evidencian hacia la margen izquierda del río San Juan. Esta secuencia, comienza con una brecha basal entre 10 m y 20 m de potencia, con clastos de filita y cuarzo, seguido por dolomitas con niveles de *chert* negro y niveles rojos que pueden representar superficies endurecidas.

- **Formación Aramachay (Ji-a)**

La formación Aramachay representa una subdivisión del grupo Pucará, está conformada por

lutitas negras con intercalaciones de delgados estratos de caliza gris oscura, con contenidos de materia orgánica a bituminosa, en bancos regulares de 0,2 m a 1 m, con intercalaciones de margas.

En el área de estudio, esta formación aflora al oeste, específicamente al suroeste de la laguna Angascancha y al norte del cerro Llantashpunta. Hacia la base de esta unidad, se emplaza con tendencia N-S la falla longitudinal este, cortando la secuencia sedimentaria y originando erosión y reducción de la resistencia del macizo rocoso.

- **Miembro Shuco (Pe-sh)**

Esta unidad comprende una secuencia alternada de conglomerados calcáreos y vulcanoclastos, además de brechas sedimentarias con escasos lentes de limolitas y areniscas, la mayor parte de los clastos son de caliza y sílex de la formación Aramachay, con diámetros de 2 cm a 30 cm, que pueden llegar a 6 m. En el área de estudio, esta unidad aflora de manera superficial al norte, suprayaciendo a las rocas del grupo Cabanillas y cubierto parcialmente por depósitos lacustres.

#### **4.1.8.3. Formación Calera**

Los afloramientos de esta unidad están constituidos por tres miembros: Calera inferior, Calera medio y Calera superior. A continuación, se describen los tres miembros de la Formación Calera.

- **Formación Calera Inferior (Po-ca/Inf)**

Esta secuencia está conformada por margas rojas con bancos delgados de calizas margosas, además de sedimentos detríticos, paquetes gruesos y delgados de conglomerados del grupo Pucará, con una matriz calcárea intercalados con niveles de tobas riolíticas. Hacia el límite superior de la unidad, finaliza con una secuencia de calizas varvadas mudstone grises con poca influencia piroclástica. También presenta niveles volcanoclásticos de cenizas de grano fino a medio de tonalidad blanquecina, con biotitas y tobas cristalolíticas.

- **Formación Calera medio (Po-ca/md)**

La formación Calera medio alberga la mineralización de Colquijirca y está constituido principalmente por rocas carbonatadas como dolomías de tonalidades cremas, pardos y beige con intercalaciones delgadas y nódulos de *chert* y en menor grado calizas y margas, además de rocas silíceas representadas por *chert*. También, en menor proporción se presentan intercalaciones de estratos delgados de limoarcillitas y tobas. En el área de estudio, se localiza principalmente en el

tajo norte y Smelter.

- **Formación Calera superior (Po-ca/sp)**

Está conformada por una sucesión de calizas y margas grises con un nivel potente de toba gris, y capas delgadas de limoarcillitas y arcillitas. Los horizontes calcáreos son masivos, de colores grises y pardos, de texturas mudstone y wackestone con microestructuras de presión. Los horizontes margosos y limoarcilíticos son de colores grises de diversas tonalidades y se intercalan en estratos delgados. Esta secuencia, se encuentra expuesta en la parte superficial, principalmente al Sur del tajo norte y en el sector de Smelter. Presenta una potencia entre 80m y 100 m.

#### **4.1.8.4. Centro volcánico Marcapunta (Mioceno superior)**

Fue definida como diatrema por Noble, 1977. La litología asociada presenta brechas freatomagmáticas hacia los bordes de domo de dacita con ojos de cuarzo hialino visible y fenos de plagioclasas argilizadas. Estas brechas freatomagmáticas sobreyacen directamente sobre Calera inferior, y el miembro Calera medio ha sido desplazado por las lavas y domos producto del vulcanismo.

- **Volcánico Rumiallana (Nm-r)**

Estas rocas se encuentran en forma de domos y lavas dacíticas que gradan a cuarzo latitas, finamente estratificadas, cuya matriz es generalmente material volcánico no consolidados con una capa cementante de calcita; en los sectores adyacentes, principalmente en la ladera al Sureste del cerro Marcapunta, están constituidos por piroclastos, tobas y lavas de color gris blanquecino.

El emplazamiento de este cuerpo volcánico es controlado por la falla longitudinal N-S, el que a su vez se relaciona con la mineralización del área de estudio. Se estima que la diatrema o cuello volcánico de Marcapunta tiene un diámetro inferior al complejo volcánico de Cerro de Pasco, pero se considera que su sistema mineralizado extendido entre San Gregorio y Colquijirca alcanzan 8 km en un eje N-S. La actividad de Marcapunta es datada en  $11,5 \pm 0,4$  Ma (Noble, D. y McKee E., 1981) de la edad Mioceno Superior, y la actividad hidrotermal en  $10,8 \pm 0,3$  Ma.

- **Depósitos piroclásticos (Qcy)**

Estos depósitos corresponden a una serie de brechas polimícticas con elementos de caliza, cuarzo lechoso, filitas, areniscas en matriz de cuarzo fragmental. En el cerro Marcapunta, estos depósitos tipo base surge (Vidal, 1992) corresponden a una serie de lentes y cuerpos irregulares

de geometría subhorizontal a subvertical y flujos piroclásticos, que marcan el inicio de diferentes episodios de domos dacíticos coalescentes.

En Marcapunta norte se ha identificado dos niveles: el primero cubre paleorelieves de la formación Calera, rellenando depresiones topográficas; el segundo, más delgado y menos expuesto, se emplaza en medio de domos dacíticos. En la parte central de Marcapunta sur, se presentan con niveles de granulometría arenosa con pseudo estratificación o laminación gradada, emplazados también sobre domos dacíticos.

#### **4.1.8.5. Depósitos de coberturas glaciares (Q-gl)**

Estos depósitos se extienden ampliamente al noreste del área de estudio, sobre las laderas de ambos flancos de las quebradas, constituidos por gravas arena arcillosas y arena grava arcillosa. Alcanzan espesores promedios de 10 m y en ocasiones pueden estar mezclados con materiales coluviales.

En las laderas del sector oeste del cerro Marcapunta, estos depósitos están compuestos predominantemente por grava arcillosa y arcillas arenosas de alta plasticidad. Las investigaciones mediante sondajes sobre estos depósitos indican que estos materiales alcanzan un espesor de hasta 40 m en los sectores bajos próximos al fondo de valle, y en promedio unos 20 m en sectores de mayor altitud.

- **Depósitos fluvioglaciares (Q-fg)**

Estos depósitos se distribuyen principalmente sobre los fondos de valle, cuya composición está conformada principalmente por gravas arenosas con finos, y arenas arcillo – limosas con gravas poco densas. En el sector norte de la quebrada Huachuacaja, estos depósitos alcanzan espesores de hasta 8 m y descansan sobre las areniscas del grupo Mitu.

- **Depósitos aluviales (Q-al)**

Corresponden a los materiales transportados y acumulados por las aguas de los principales flujos como los ríos San Juan, Ocshapampa, Andacancha y Colquijirca. Están conformados por arenas, gravas, cantos rodados, con algunos bolones y finos; generalmente mal gradados, de forma predominante subredondeadas a redondeadas y composición litológica en gran porcentaje por calizas, areniscas y poco porcentaje de rocas ígneas. Alcanzan varios metros de espesor y cerca de las quebradas y el río San Juan se hallan saturados. Los depósitos aluviales forman parte de la planicie aluvial del río San Juan desde Huaraucaca hasta San Gregorio, pueden ser utilizados como canteras de agregados.

- **Depósitos fluvioaluviales (Q-fa)**

Conformados por suelos provenientes de procesos de erosión, trasladados por corrientes fluviales permanentes. Están constituidos por clastos gravosos, con elementos de diferentes tamaño y naturaleza litológica, de formas subangulosas a subredondeadas, se emplazan principalmente en las márgenes del río San Juan y Andacancha, tapizando depósitos aluviales con clastos redondeados.

- **Depósitos coluviales (Q-co)**

Constituyen los materiales que conforman los escombros de laderas antiguas y/o recientes, están conformados por una mezcla de fragmentos de rocas de diferente tamaño con o sin matriz de finos, yacen desde algo densos hasta sueltos, con partículas y granos de forma predominante angulosa. En el área de estudio se localizan puntualmente en algunos lugares de los flancos del cerro Marcapunta y partes superiores de la cadena de cerros.

- **Depósitos lacustres (Q-la)**

Estos materiales se componen principalmente de horizontes de arena gravosa, arena limosa, arcillas limo – gravosas y limos que en conjunto alcanzan una potencia variable entre 25 y 28 m. Constituyen suelos de baja densidad, poco consistentes y deformables. Estos materiales están cubiertos por una delgada capa de suelo orgánico saturado de 3 a 5 m de espesor.

#### **4.1.8.6. Depósitos antrópicostecnógenos (Q-te)**

Corresponde a zonas de materiales acarreados por la actividad humana o actividades mineras, en el sector de mina se encuentran como botaderos de desmonte, depósitos de relaves, así como los materiales utilizados en la construcción de los accesos y rellenos.

#### **4.1.9. Geología estructural**

La zona de estudio está controlada estructuralmente por la falla longitudinal mayor reconocida cerca de Cerro de Pasco con una orientación de N165 y con buzamiento de 65°E donde coloca en contacto al Pucara oriental con la formación Pocobamba (Ángeles, 1993), considerada una escama gruesa activa que controló la deposición desde el triásico (grupo Pucará), generando en el tiempo cabalgamiento, graven y horst. En los eventos tectónicos posteriores, el grupo Pucará fue levantado, erosionado y rellenado con depósitos de conos aluviales, fluviales y sedimentos lacustres calcáreos de la formación Pocobamba y Calera, sobreyaciendo al Mito en discordancia erosional.

Esta secuencia sedimentaria es afectada posteriormente por la tectónica comprensiva del

Oligoceno superior y Mioceno inferior generando plegamientos y dando origen a los anticlinales y sinclinales asimétricos reconocidos en el Tajo Norte con tendencia NNW y con mayor compresión hacia el norte identificándose fallas inversas subparalelas a la estratificación y fallas inversas con ligero sobre escurrimiento (falla Chocayoc). Así mismo, dentro de estas formaciones se tiene pequeños pliegues asimétricos y volcados.

En el informe elaborado por SNC Lavalin y SRK 2021, se presenta un listado de fallas que fueron incluidas en el modelamiento estructural, las cuales se presentan por sectores, según la Tabla 3.1.

**Tabla 4. Fallas identificadas por Lavalin ty SRK, 2021**

Falla	Descripción
Falla Chocayoc	La falla Chocayoc tiene un rumbo de tendencia andina (N5° - 15°O/ 75°SE), es reconocida con mapeo en superficie y sondajes. Esta falla es un conducto de mineralización principalmente de Zn – Pb y Ag, que logra mineralizar varias unidades litológicas (Calera superior, medio e inferior). Se han reconocido otras estructuras menores (14 fallas menores) que representan algunos lineamientos que limitan la mineralización de Zn y en otros casos favorecen la mineralización.
Falla Central	La falla Central presenta un rumbo E-O/ 80°N, probablemente esta falla controle el cuerpo subvolcánico dacítico en este sector.
Falla Unish 1, 2 y Juanita	Estas fallas se presentan en la parte central del centro volcánico Marcapunta, tienen un rumbo NO 5° a 8° SE/60°. No Presentan mayor influencia en la mineralización; sin embargo, la falla Unish podría ser parte del eje por donde ascendió el complejo volcánico Marcapunta.
Falla NW 1 Principal Mercedes)	La falla NW1 coincide con el eje del sinclinal Principal – Mercedes. Sus mejores afloramientos se encuentran en el sector septentrional del tajo Norte, en donde el núcleo del sinclinal Principal – Mercedes está desplazado. La proyección al SE está cubierta por el deslizamiento ubicado en el sector occidental del tajo Norte, hasta llegar al sector sur donde se manifiesta por el fracturamiento en eje del mismo sinclinal. En tanto, la proyección al norte es incierta debido a que se encuentran los botaderos cubriendo la traza de la falla.
Falla NW 2 (La Pampa – La Llave)	La falla NW2 se puede observar en el sector SE del tajo, corta al flanco oriental del sinclinal Chocayoc – La Llave (flanco La Llave), y se proyecta hasta el sector septentrional del tajo Norte, tiene un buzamiento alto mayor a 75° SW pudiendo llegar a ser vertical. Los afloramientos de la falla se pueden observar con mayor facilidad o evidencia en los niveles inferiores del tajo, en donde se encuentran brechas de falla con más de 1 m de espesor, mientras que hacia la parte superior su traza es difícil de seguir y solo se pueden determinar fracturas en el sector sur y fracturas con óxidos de color blanco en el sector norte.
Falla NW 3 (La Pampa)	La falla NW 3 se encuentra en el flanco Este del tajo Norte, cortando al anticlinal La Llave. La Falla NW 3 se observa en el flanco Norte del tajo Norte y su proyección al SE es hacia el centro poblado Colquijirca. En superficie, su trazado puede seguirse por mucha distancia, fue definida en base a la compensación del anticlinal La Pampa y el sinclinal Chocayoc – La Llave.

Falla Marcapunta Norte	La falla Marcapunta Norte se encuentra en la parte meridional del área de estudio, su traza fue definida por Sarmiento (2004). Su buzamiento por lo general está entre 70° a 80°N.
Falla 4052	Esta falla fue definida en base al cartografiado geológico del nivel 4052, en este se muestran fallas de dirección N 280° a 290° con un buzamiento promedio de 70° N.
Falla Smelter	La falla Smelter fue definida por Sarmiento (2004) sin indicar el buzamiento de esta. Se asigna un buzamiento superior a 80°N ya que no existe una falla en las labores subterráneas que tengan un buzamiento que coincida con ésta.

#### *Tomada de SNC Lavalin 2021*

Las actividades de campo comprendieron en el monitoreo de piezómetros existentes, la supervisión de la perforaciones hidrogeológicas y construcción de piezómetros Casagrande y de cuerda vibrante en interior mina, así como la realización de un mapeo hidrogeológico y manejo de agua dentro de la mina. Los trabajos se llevaron a cabo durante los meses de julio, agosto y octubre del 2023. Para más detalle en el Anexo se adjunta el memorando técnico de campo.

- **Monitoreo de piezómetros en superficie**

Para la actualización de la información piezométrica, Amphos 21 ha tomado en cuenta la información histórica proporcionada por SMEB e información de las campañas de campo realizadas en setiembre del 2023 por Amphos 21, en las cuales se registraron información de niveles de agua. El registro de niveles se muestra en el Anexo A.2.

Se cuenta con un total de 47 piezómetros monitoreados, de los cuales 14 son de carácter multinivel y 22 son simples (un solo piezómetro por perforación). Del total de piezómetros 3 se encuentran obstruidos o inoperativos. Los piezómetros monitoreados presentan que presentan mayor énfasis son los del cerro Marcapunta, así como en depósito de relaves Huachuacaja en su margen izquierda.

A continuación, se describe los piezómetros a detalle:

- En el sector del cerro Marcapunta se encuentran 21 piezómetros, de los cuales 11 son simples y 5 son dobles, además 19 se encuentran operativos y 02 obstruidos.
- 4.1.6. En el sector del depósito de relaves de Huachuacaja se tiene registro de 13 piezómetros, 04 son dobles y 07 simples, todos operativos a excepción del PRH-09- 05A. Existe un piezómetro doble que no registra código, al cual se le asignó el código SC-A/B.
- 4.1.7. En interior mina se tiene instalado 4 piezómetros; en el nivel 3912 1 piezómetro Casagrande y dos sensores de cuerda vibrante y en el nivel 3922 un piezómetro Casagrande.
- 4.1.8. En resumen, del total de piezómetros se tiene 44 piezómetros con información

actualizada a setiembre de 2023, con algunos vacíos de información en algunos.

En la tabla 5 se muestra la ubicación y mediciones de los piezómetros monitoreados.

**Tabla 5. Características de los piezómetros monitoreados en superficie**

Código	Coordenadas UTM WGS84			Nivel de agua (m)
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m s. n. m.)	
PM H - 1	359047	8807164	4194	1.77
PM H - 2	359113	8807013	4192	4.83
PM SDH - 03	358696	8807646	4222	25.97
SDH - 01	359510	8807660	4237	8.29
PRH 09 - 03A	357960	8809437	4281	57.67
PRH 09 - 03B	357960	8809437	4281	Seco
PRH 09 - 05A	358380	8807793	4282	Inoperativo
PRH 09 - 05B	358380	8807793	4282	Seco
PH - 04A	358646	8807504	4267	Seco
PH - 04B	358646	8807504	4267	Seco
PM SDH - 18	359921	8809518	4229	16.16
GWI-07-11	361796	8807568	4283	9.32
PM SDH - 08	358528	8807177	4260	69.21
PZ2-432-07A	360096	8807043	4294	Seco
PZ2-432-07B	360096	8807043	4294	Seco
PZ5-448-07	360523	8807260	4387	Obstruido
PZ1-464-07 A	360228	8807424	4374	Seco
PZ1-464-07 B	360228	8807424	4374	Seco
PZ4-452-07 A	360241	8807282	4353	Seco
PZ4-452-07 B	360241	8807282	4353	Seco
PZ4-464-07A	360428	8807436	4410	Seco
PZ4-464-07B	360428	8807436	4410	Seco
PZ4-440-06	360327	8807144	4338	131.77
PZ1-428-07	360391	8806991	4329	225.23
PZ1-504-07A	360235	8807948	4394	> 200
PZ1-504-07B	360235	8807948	4394	> 200
HG-MN-1	359853	8808547	4308	98.75
HG-MN-2	360403	8809022	4332	131.77
HG-MS-1	360295	8805924	4196	Seco
HG-MS-2	359660	8806434	4190	4.94
HG-MS-3	359778	8807542	4271	11.18
SC-A	358127	8808562	4252	17.88
SC-B	358127	8808562	4252	16.98

Código	Coordenadas UTM WGS84			Nivel de agua (m)
	Este (m)	Norte (m)	Elevación (m s. n. m.)	
PZ2-480-07	360333	8807651	4385	Seco
GWI-07-12	360981	8808885	4358	Obstruido
PM-1 A/B	359390	8805287	4138	14.08
PM-2 A/B/C/D	359564	8805413	4137	8.52
PM-3 A/B	359146	8805416	4143	16.33
PM-4 A/B	359254	8805758	4139	12.78
PM-5 A/B	359030	8806044	4143	7.69
P-3	359140	8805439	4161	6.35
PZ-CN-3	360168	8810672	4295	42.17
PBN-3	361585	8811994	4274	seco
DDH-03-023*	361043	8808131	3922	Surgente
DDH-01-023*	361692	8808308	3912	Surgente
DDH-02A-023*	361692	8808207	3912	-
DDH-02B-023*	361692	8808248	3912	-

(\*) Piezómetro ubicado en interior mina

#### 4.2. Supervisión y construcción de piezómetros

Como parte de los trabajos de campo se llevaron a cabo la perforación de 3 sondajes diamantinos en los que se instrumentaron 02 piezómetros del tipo Casagrande y en un sondaje se instalaron 2 sensores de cuerda vibrante.

En el nivel 3922 se instaló el piezómetro Casagrande con código DDH-03-023, mientras que en el nivel 3912 se construyeron los piezómetros Casagrande DDH-01-023 y cuerdas vibrantes DDH-02-023 (A-profundo y B-somero). En la tabla 6 se muestra la ubicación y resumen de construcción de los piezómetros. A continuación, se mencionan los aspectos más importantes de cada sondaje y su implementación como piezómetro.

**Tabla 6. Resumen de sondajes perforados y piezómetros instalados**

Código	Coordenadas UTM (WGS 84)		Altitud (msnm)	Inclinación (°)	Azimut (°)	Prof. (m)	Diámetro (mm)	Fecha de ejecución	
	Este (m)	Norte (m)						Inicio	Fin
DDH-01-023	361692	8808308	3912	-90	-	180.0	96.1	13/07/23	25/07/23
DDH-02A-023	361692	8808207	3912	-60	180	195.0*	96.1	27/07/23	13/08/23
DDH-02B-023	361692	8808248	3912	-60	180	111.5*	96.1	27/07/23	13/08/23
DDH-03-023	361043	8808131	3922	-90	-	180.0	96.1	16/08/23	23/08/23

Nota (\*): Las profundidades son inclinadas; asimismo, las coordenadas son de los sensores en profundidad.

#### 4.2.1 Sondaje DDH-01-023

La litología atravesada corresponde a calizas, que se encuentran con un grado de fracturamiento medio a bajo, posteriormente se intercepta tramos de brecha y dacitas, finalmente se vuelve a interceptar brecha mineralizada hasta el fin del sondaje.

Los aspectos más relevantes considerados para la elaboración del diseño de instalación de piezómetro han sido los siguientes:

Nivel estático: El cual fue definido desde los 0.50 m de profundidad, considerando la surgencia de agua durante la perforación, además, se ha considerado los tramos de mayor aporte. El aporte de flujo de agua se obtuvo en los tramos de la caliza fracturada, registrando un caudal de hasta 1.5 L/s durante la perforación. La roca dacita y brecha el aporte es bajo a muy bajo, por el escaso a nulo fracturamiento.

En la figura 10 se muestra los tramos representativos del sondaje en mención. Los primeros 75 m corresponde a calizas fracturadas con tramos silicificados, de 75 a 92 m, tramo de brecha con clastos de caliza, de 92 a 125 m roca dacitas muy competentes y finalmente de 125 a 180m corresponde a brechas con tramos mineralizados.



*Figura 10. Registro de cores, representando los tramos interceptados durante la perforación DDH-01-023*

#### 4.2.2 Sondaje DDH-02-023

Desde el punto de vista geológico, el sondaje se encuentra cortando roca caliza lutácea y

niveles de dacitas con un alto grado de fracturamiento, sobre todo en los primeros 70 m, posteriormente se intercepta rocas de fracturamiento medio a bajo y a partir de 156 m se corta dacitas y brechas mineralizadas compactas. El mayor aporte de flujo de agua se obtuvo en los tramos de la caliza lutácea con niveles de dacitas intensamente fracturada, siendo la litología con mayor aporte por sus mismas condiciones hidráulicas, mientras que la roca dacitay brecha el aporte es bajo, por su bajo a mediano fracturamiento. En Figura 4.3 se muestra el registro fotografías de los testigos de perforación.

En función a los caudales medidos durante la perforación y de acuerdo con la información de logueo geológico, se ha diferenciado 2 unidades hidrogeológicas principales: la primera definida por intercalación de calizas lutáceas y dacitas intensamente fracturadas desde los 0a 97 m y la segunda unidad hidrogeológica conformada por dacitas grises moderadamente fracturadas y tobas compactas mineralizadas.

De acuerdo con los criterios para el diseño del piezómetro, se planificó la instalación de 2 sensores cuerda vibrante. El primer sensor se instaló a 195 m de profundidad inclinada; mientras que, el segundo sensor se instaló a 111.5 m, esto con el objetivo de caracterizar las 2 unidades hidrogeológicas.



*Figura 11. Registro de cores, representando los tramos interceptados durante la perforación DDH-02-023*

#### **4.2.3 Sondaje DDH-03-023**

Desde el punto de vista geológico, el sondaje se encuentra atravesando en su totalidad por dacita que se intercepta con tramos mineralizados de sulfuros y en menor proporción de

venillas de calcita. En el tramo de 155 m a 165 m se tiene presencia de una dacita silicificada siendo de una textura afanítica. El grado de fracturamiento es muy bajo, presentando valores de RQD mayos a 90 %. El mayor aporte de flujo de agua se obtuvo en los tramos finales de la perforación a partir de los 150 m, estos tramos aportan un caudal relativamente bajo de 0.02 L/s. En la figura 12 se evidencia los registros fotográficos de las litologías atravesadas.

Estructuras geológicas: se tuvo en cuenta las discontinuidades con mayor incidencia que fueron registradas en esta perforación como el grado de fracturamiento, así como los tramos mineralizados, esto fue evidenciado a partir de los 130 m en los tramos de inicio de surgencia de agua por las fracturas en la roca intrusiva. La profundidad final del sondaje fue definida en 180.00 m. Posterior a la instrumentación del piezómetro se registró un caudal de los 0.05 l/s.



**Figura 12. Registro de cores, representando los tramos interceptados durante la perforación DDH-**

Finalmente, en la figura 13 se muestra la monumentación de los piezómetros instalados. En anexos se muestra el memorando técnico de los trabajos de campo con informaciónde las

perforaciones, registros litológicos, ensayos hidráulicos y diseños constructivos de los piezómetros.



**Figura 13. Monumentación de piezómetros DDH-01-023, DDH-02A/B-023 y DDH-03-023**

### 4.3. Ensayos hidráulicos

Los ensayos de Lugeon se realizaron durante la perforación de los sondajes, los tramos se escogieron de acuerdo con la litología, grado de fracturamiento y aspectos estructurales como fallas, así como la implicancia del nivel freático o incrementos de agua durante la perforación. La tabla 7 muestra en resumen los valores de conductividad hidráulica obtenidos a través de la interpretación de los ensayos Lugeon.

**Tabla 7. Profundidades de los tramos de ensayo y valores de conductividad hidráulica**

Sondaje	Tramo superior (m)	tramo inferior (m)	Profundidad media (m)	Conductividad hidráulica (cm/d)	Conductividad hidráulica (m/d)	Litología
DDH-01-023	4.2	7.2	5.7	8.60E-06	7.43E-03	Caliza
	7.2	13.2	10.2	1.09E-05	9.45E-03	Caliza
	17.2	23.7	20.45	1.35E-04	1.17E-01	Caliza
	23.7	29.7	26.7	6.90E-05	5.96E-02	Caliza
	35.2	42	38.6	5.69E-04	4.91E-01	Caliza
	43.8	49.2	46.5	4.55E-04	3.93E-01	Caliza
	5	61.2	58.6	2.44E-04	2.11E-01	Caliza
	6					
	71.2	76.2	73.7	4.49E-04	3.88E-01	Brecha
	107	112.2	109.6	1.07E-05	9.21E-03	Intrusivo
114.7	121.2	117.95	1.27E-05	1.10E-02	Intrusivo	
138	145.2	141.6	6.49E-06	5.61E-03	Brecha	
161	173.7	167.35	4.57E-06	3.95E-03	Brecha	
DDH-02-023	2.4	7.3	4.9	9.14E-05	7.90E-02	Caliza lutácea
	24.9	30.1	27.5	8.33E-05	7.20E-02	Caliza lutácea
	98.9	104	101.5	*	*	Dacita
	131.4	136.4	133.9	1.74E-05	1.50E-02	dacita
	174.9	184.4	179.7	1.39E-05	1.20E-02	Toba
	21.9	34.5	28.2	2.47E-07	2.13E-04	Dacita

	44.5	49.5	47	3.54E-06	3.06E-03	Dacita
	56.4	70.5	63.45	1.81403E-05	0.015673253	Dacita
DDH-03-023	116.4	132	124.2	8.55E-07	7.39E-04	Dacita
	143.4	160.5	151.95	6.44E-07	5.57E-04	Dacita silicificada
	167.4	180	173.7	4.00E-06	3.46E-03	Dacita

(\*) Ensayo Lugeon fallido, fuga de agua

#### 4.4. Pozos

En la zona del tajo norte se pudo identificar 01 pozo instrumentado con su respectivo árbol de descarga, el PCN-07, mientras que los demás se encontraban tapados (ver tabla 8). De acuerdo con la última información recibida de SMEB, el pozo PCN-07 se encuentra operativo desde setiembre de 2020 hasta la actualidad, sin embargo, durante la campaña de campo se evidencio que el pozo se encuentra apagado (no se registró caudal de bombeo de dicho pozo).

**Tabla 8. Condición de los pozos de bombeo en el tajo**

Pozo	Coordenadas UTM WGS 84			Prof. actual (m)	Caudal (l/s)	Estado
	Este (m)	Norte (m)	Cota (m s. n. m.)			
PCN - 1	361266	8811181	4157	100	-	Obturado
PCN - 2	361304	8811155	4161	125	-	Obturado
PCN - 3	361228	8811227	4145	133	-	Obturado
PCN - 4	361284	8811197	4145	115	-	Obturado
PCN - 5	361364	8811125	4178	129	-	Obturado
PCN6	361343	8811292	4132	122	-	Obturado
PCN7	361301	8811400	4165	130	-	Operativo

#### 4.5. Mapeo hidrogeológico en interior mina

Con la finalidad de tener un mejor conocimiento del comportamiento hidrogeológico de las labores subterráneas, se realizó un mapeo hidrogeológico en interior mina, el cual considero mapeo de filtraciones, medición de caudales en cunetas, galerías y sondajes.

Los principales niveles con considerable aporte de agua subterránea son Nv 3912, Nv 3922 y Nv 3872 (ver tabla 9 y tabla 10); por otro lado, en los niveles superiores se puede observar aporte de agua en menor proporción por filtración en tajeos y chimeneas antiguas como son Rp 050W, Rp 9845E, en el Nv 4240, Rp1345 Nv 4185, Block 8450 del Nv 4092 y GL888 sector talleres. A continuación, se describe las filtraciones de cada nivel:

#### **4.5.1 Nivel 3922**

Actualmente el nivel 3922 presenta flujos de agua considerables, provenientes de la rampa Esperanza que fueron cuantificados en 23.8 L/s (ver figura 14), dicho flujo es el aporte de todas las filtraciones evidenciadas en la rampa, que estructuralmente corresponden a fracturas y fallas que atraviesan de forma transversal la traza del túnel, la litología corresponde a rocas dacíticas.

En la galería 1473S se evidencia filtración de agua en el piso, aportando un caudal de 19.4 L/s, sus propiedades fisicoquímicas registran un pH de 4 a 6 que fueron registrados en los meses de setiembre y octubre del 2023, la conductividad eléctrica se registró en 790 uS/cm y la temperatura de 18.2 °C.

En la galería 1490N se evidencia filtración del perno de anclaje el cual registra un caudal de 0.6 L/s sus parámetros fisicoquímicos registra un pH de 7 y una conductividad eléctrica de 741 uS/cm con una temperatura 17,5 °C, la filtración presenta un olor característico a azufre y forma precipitados de color gris claro en la pared del hastial.

El piezómetro Casagrande DDH-03-023 ubicado en la Vn 555E, presenta surgencia de agua con un caudal de 0.07 l/s, pH de 6.54, conductividad de 199.7 uS/cm y una temperatura de 16°C.

Por otro lado, según información del personal de SMEB mencionan que captan el agua de filtración en la ventana 1208N, que la utilizan para las perforaciones de dicho nivel, este flujo no pudo ser cuantificado, debido a que no hay acceso directo, en su trayecto se encuentra la poza Vn8580W.

#### **4.5.2 Nivel 3912**

En el sector del nivel 3912 se evidencia filtraciones en la ventana 8693E proveniente en mayor volumen del piezómetro Casagrande DDH-01-023 con un caudal de 2.3 L/s, y en menor proporción de los hastiales, corona y sondajes diamantinos haciendo en conjunto un caudal de 0.4 L/s.

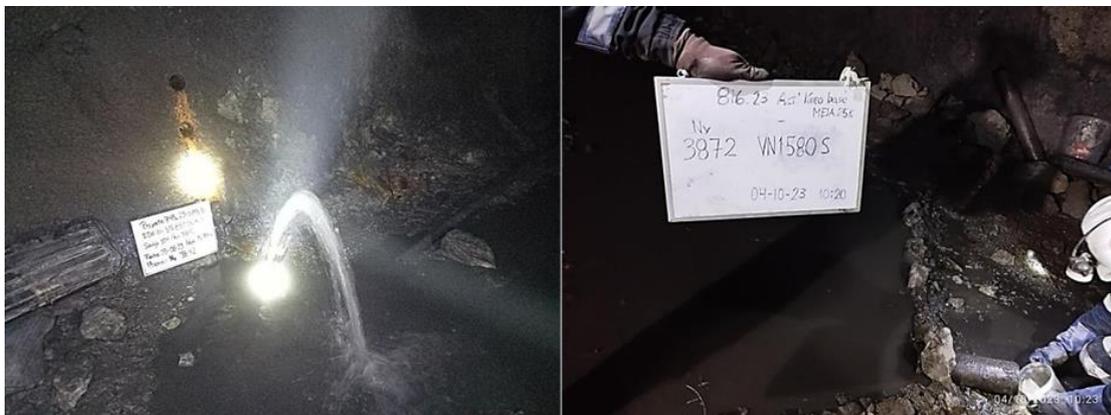
En la Vn 8668E se tiene filtración de la corona, proveniente de zona de falla con las siguientes características, caudal de 5 l/s, pH de 4.75, conductividad eléctrica de 204 uS/cm y temperatura de 18.46 °C. Por otro lado, en la ventana 1840S se evidencia surgencia de agua de sondaje diamantino con un caudal de 1.56 L/s y un pH de 6.18, conductividad eléctrica de 25 uS/cm y temperatura de 18.4 °C. Finalmente el caudal de todo el nivel registrado fue de 10L/s (ver figura 14).



**Figura 14.** Izquierda: aforo en rampa Esperanza que reúne filtraciones del nivel 3922. Derecha: filtraciones del nivel 3912

#### 4.5.3 Nivel 3872

Las filtraciones representativas corresponden a surgencias de agua de taladros diamantinos evidenciados en la ventana 8606E y W con un caudal total de 2.09 L/s. En la galería 1753N se tiene filtración del tajo con un caudal de 0.12 L/s, presenta un pH ácido de 2.63, conductividad eléctrica de 398 uS/cm y temperatura de 18.3 °C.



**Figura 15.** Izquierda: surgencia de agua de sondaje DDH en la Vn 8606W. Derecha: aforo de filtraciones en la Vn 1580S del nivel 3872

#### 4.5.4 Nivel 4185

En la rampa 1345 del nivel 4185 presenta filtración de agua proveniente de la corona y hastial, con un caudal de 0.28 L/s, estas aguas tienen un pH ácido de 3.3 y una conductividad de 3785 uS/cm con temperatura de 12.9 °C, la acumulación de los flujos de agua son direccionadas hacia la cuneta de la rampa 1345, acumulando dicho flujo en la poza 10 ubicada en el nivel 4032.



*Figura 16. Aforo de las filtraciones en la Rp 1345 nivel 4185*

#### 4.5.5 Nivel 4085

En el nivel 4085 se tiene 2 puntos de aforo que representan las filtraciones de las galerías 1035N y 1013N, no se pudo ingresar al punto exacto de las filtraciones debido a que son labores antiguas y se encuentran cerradas. La galería de mayor aporte es la 1035N, con un caudal de 0.25 L/s y un pH ácido de 3.15, conductividad eléctrica de 545 uS/cm. Por otro lado, la galería 1013N presenta un caudal de 0.18 l/s, pH de 6.06, conductividad eléctrica de 1706 uS/cm y una temperatura de 13.9 °C. En la Figura 4.11 se muestra ambos puntos de aforo.



*Figura 17. Izquierda: aforo en GL1013N nivel 4085. Derecha: filtraciones de la GL 1035N nivel 3912*

#### 4.5.6 Nivel 4055

En el nivel 4055 se evidencia flujo de agua a la salida del RB15, este presenta un caudal de 1 l/s, no se evidencia la filtración por encontrarse cerrado (punto de ventilación). Los parámetros fisicoquímicos registrados son pH de 6, conductividad eléctrica de 1502 uS/cm y temperatura de 14.3 °C.



**Tabla 9. Puntos de mapeo hidrogeológico en la primera campaña (julio – agosto 2023)**

Nivel	Punto de monitoreo	Fecha	Caudal (L/s)		
			Punto	Nivel	Mina
3872	CU-GL1693N-Nv3872	25/08/2023	3.34	1.30	52.47
	DDH-VN8606W_Nv3872	25/08/2023	1.30		
3912	FIL-01-3912	25/08/2023	0.18		
	FIL-02-G11940S-3912	25/08/2023	0.09		
	FIL-03-G11915S-3912	25/08/2023	0.04		
	SU-DDH-01-Nv3912	25/08/2023	2.30		
	CU-01-Vn8693E-3912	25/08/2023	2.70		
	CU-02-Vn8668E-3912*	25/08/2023	8.48		
	DDH-03-Nv3912	25/08/2023	0.08		
	DDH-02-Nv3912*	25/08/2023	0.29		
3922	FIL-3922-06	11/07/2023	0.06	40.44	

Nivel	Punto de monitoreo	Fecha	Caudal (L/s)			
			Punto	Nivel	Mina	
3922	FIL-3922-07	11/07/2023	0.33	40.44	52.47	
	FIL-3922-08	11/07/2023	0.40			
	FIL-3922-09	11/07/2023	2.93			
	FIL-3922-10	11/07/2023	0.15			
	FIL-3922-11	11/07/2023	0.09			
	FIL-3922-12	11/07/2023	0.10			
	FIL-3922-13	11/07/2023	0.17			
	FIL-3922-5	11/07/2023	1.53			
	FIL-3922-2	11/07/2023	0.10			
	Tope 3922 EZ	11/07/2023	3.00			
	CU-03-VN1653N-3922	27/08/2023	3.03			
	FIL-GL1490N-Nv3922	27/08/2023	0.57			
	CU-02-Nv3922-EZ	26/08/2023	20.85			
	CU-Rp990-Nv3922	26/08/2023	2.85			
	DDH-03-023	26/08/2023	0.04			
	CU-00_G11553S-Nv3922	27/08/2023	18.40			
	CU-GL1453S-Nv3922	27/08/2023	0.49			
	CU-02-GL1574S-Nv3922	27/08/2023	1.15			
	CU-04-8670W-Nv3922	29/08/2023	3.61			
	CU-05-Vn555E-Nv3922	29/08/2023	28.70			
	DDH-03-023	29/08/2023	0.07			
	CU-T947N-Rp990	27/08/2023	1.44			
	CU-GL1473N-Nv3922	27/08/2023	17.20			
	FL-GL1013N-Nv 4085	23/08/2023	0.21			0.54
	CA 888N-GL1079S	23/08/2023	0.12			
	4085	CU-GL888-Nv4085	23/08/2023			0.54
	4112	CU-Rp1345-Nv4112	23/08/2023			0.66
FL-Rp1345-Nv4185		23/08/2023	0.28			

	CU-Rp1345-Nv4185	23/08/2023	0.58	
4185	CU-Rp1345-Nv4185-1	23/08/2023	0.07	0.58
	Rp-050W-G19445	23/08/2023	0.08	
4220	CU-Rp050W-4220	23/08/2023	0.13	0.13
	CU-01-Rp050W-4220	23/08/2023	0.08	
4240	CH-01-Rp9845E-Nv4240	23/08/2023	0.02	0.02
4260	Nv 4260-Polvorin	23/08/2023	0.03	0.03

**Tabla 10. Puntos de mapeo hidrogeológico en la segunda campaña (octubre 2023)**

Nivel	Punto de monitoreo	Fecha	Caudal (L/s)		
			Punto	Nivel	Mina
3872	CU-GL1693N-Nv3872	4/10/2023	3.79	2.34	
	DDH-VN8606W_Nv3872	4/10/2023	0.12		
	FIL-G11753N-3872	4/10/2023	0.12		
	FIL-G11602S-3872	4/10/2023	0.84		
	FIL-Vn8606E-3872	4/10/2023	0.51		
	DDH-Vn8606E-3872	4/10/2023	0.12		
	CU-Vn1580S-3872	4/10/2023	1.38		
3912	SU-DDH-01-Nv3912	4/10/2023	1.96	10.04	
	CU-01-Vn8693E-3912	4/10/2023	2.96		
	CU-Vn8693E-3912	4/10/2023	0.90		
	CU-02-Vn8668E-3912	4/10/2023	8.46		
	DDH-03-Nv3912	4/10/2023	0.02		
	DDH-02-Nv3912	4/10/2023	0.04		
	DDH-Vn1840S-3912	4/10/2023	1.56		
3922	CU-03-VN1653N-3922	5/10/2023	22.69	46.55	61.01
	FIL-GL1490N-Nv3922	5/10/2023	0.49		
	CU-02-Nv3922-EZ	5/10/2023	23.79		
	CU-Rp990-Nv3922	5/10/2023	4.28		
	DDH-03-023	4/10/2023	0.07		
	CU-02-GL1574S-Nv3922	5/10/2023	20.75		
	CU-04-8670W-Nv3922	4/10/2023	7.78		
	CU-05-Vn555E-Nv3922	4/10/2023	31.75		
	DDH-03-023	4/10/2023	0.07		
	CU-T947N-Rp990	5/10/2023	2.61		
CU-GL1473S-Nv3922	5/10/2023	19.40			
4032	CU-Nv4032-Rp1345	5/10/2023	2.38	-	
4055	CU-RB15-Nv4055	5/10/2023	1.02	1.02	
4085	FL-GL1013N-Nv 4085	5/10/2023	0.18	0.25	
	CU-G11035N-4085	5/10/2023	0.25		
4092	DDH-FIL-GL722N-Nv4092	5/10/2023	0.35	0.46	
	FIL-GL742N-Nv4092	5/10/2023	0.08		
	FIL-02-GL742N-Nv4092	5/10/2023	0.03		
4185	FL-Rp1345-Nv4185	5/10/2023	0.22	0.22	
4220	CU-Rp050W-4220	5/10/2023	0.13	0.13	

## **4.6 Manejo de agua en interior mina**

El sistema de drenaje implementado en el interior de la mina cumple con la finalidad de minimizar el flujo de agua subterránea emergente y circulante en las zonas de explotación. Este sistema se encarga de la captación, conducción y extracción de dichas aguas hacia la superficie, siguiendo el procedimiento detallado en los siguientes párrafos.

En interior mina se cuenta con diversas estaciones de sistemas de bombeo podemos describir en flujos de ingreso y salida.

### **4.6.1 Flujos de ingreso**

La fuente de ingreso de agua para las operaciones mineras proviene del tajo, siendo el lugar desde donde se bombea al tanque SD-9, estas aguas son utilizadas para los equipos de perforación, lavaderos de vehículos pesados y livianos, así como para la zona de talleres.

El caudal de agua que ingresa según información del cliente es de 25 l/s, en campo no se evidencia flujómetro u otro equipo de medición que registre los flujos de forma continua, más por el contrario se realiza lecturas puntuales con sensores magnéticos.

A partir del tanque SD-9 en la superficie se direcciona el flujo de agua hacia interior de la mina, específicamente hacia las zonas de profundización, zona intermedia, tanque 4055, tanque Rp990, tanque Rp Gemela y el lavadero de equipos.

En la zona de profundización, el ingreso de agua se produce a través de la chimenea SD-9. Esta agua desciende por gravedad a través de tuberías hasta llegar al tanque ubicado en la rampa 1345. Desde este punto, se realiza la distribución del agua por tuberías hacia los niveles 3922, 3892 y 3872.

Conceptualmente, se describe el sistema de suministro de agua desde la superficie hacia diferentes áreas de la operación minera. Se mencionan puntos específicos de origen y rutas de distribución, lo cual es fundamental para asegurar un flujo constante y controlado de agua hacia las zonas donde es requerida. En la figura 20 se describe el circuito de abastecimiento de agua para las operaciones.



*Figura 20. Circuito de agua de ingreso a Interior mina Tomada de SMEB*

#### 4.6.2 Flujos de salida

En el nivel 3872, se canalizan los flujos de agua provenientes de filtraciones y del agua de perforación. Estos flujos son bombeados hacia una poza situada al final de la rampa 1462E. Desde este punto, se procede a bombear el agua hacia la poza en el nivel 3912, para luego continuar hacia el nivel 3960 (consultar figura 20).

En el nivel 3922, encontramos las pozas Vn 8580W y la poza VN1586N. La poza 8580W se encarga de acumular los flujos provenientes de la rampa Esperanza II, piezómetro Casagrande DDH-03-023 y de la rampa 990. Posteriormente, estos flujos son bombeados hacia la poza principal en el nivel 4055. Por otro lado, la poza 1586N acumula los flujos del rebosadero de la poza 8580, así como las filtraciones de la rampa 1390S y el agua de perforación. El agua contenida en la poza 1586N es bombeada hacia la poza ubicada en el nivel 3960, para luego ser direccionada hacia la poza principal 934S en el nivel 4055 (ver figura 20).

En el nivel 3922, se identifican filtraciones que no fue posible abordar. Según la información proporcionada por el cliente, se determina que estas filtraciones se originan en la ventana 1208N con caudal superior a los 10 l/s. Es relevante destacar que dichas filtraciones representan una fuente de agua que es captada y destinada al abastecimiento de los equipos de perforación, tanto en el nivel 3922 como en el nivel 3892.

En cuanto a los flujos de agua provenientes de la rampa 538, que actualmente están siendo recuperados, se bombean hacia la Poza 3 MKPS, localizada en el nivel 4075. Posteriormente, son direccionados hacia la Poza 2, situada en el nivel 4100. Desde la Poza 2 en el nivel 4100, se bombea hacia la Poza 1 ubicada en la superficie, en las proximidades de la bocamina sur (ver figura 20).

El nivel 4220 presenta filtraciones en la rampa 050W de los hastiales, así como en tajos antiguos. Estos flujos son derivados a través de un sondaje DDH que sirve como conexión hacia el nivel inferior 4180. Los flujos de agua acumulados en el nivel 4180 son bombeados hacia la poza Lumbreras; finalmente, se procede a bombear hacia la superficie, específicamente a la relavera Huachuacaja.

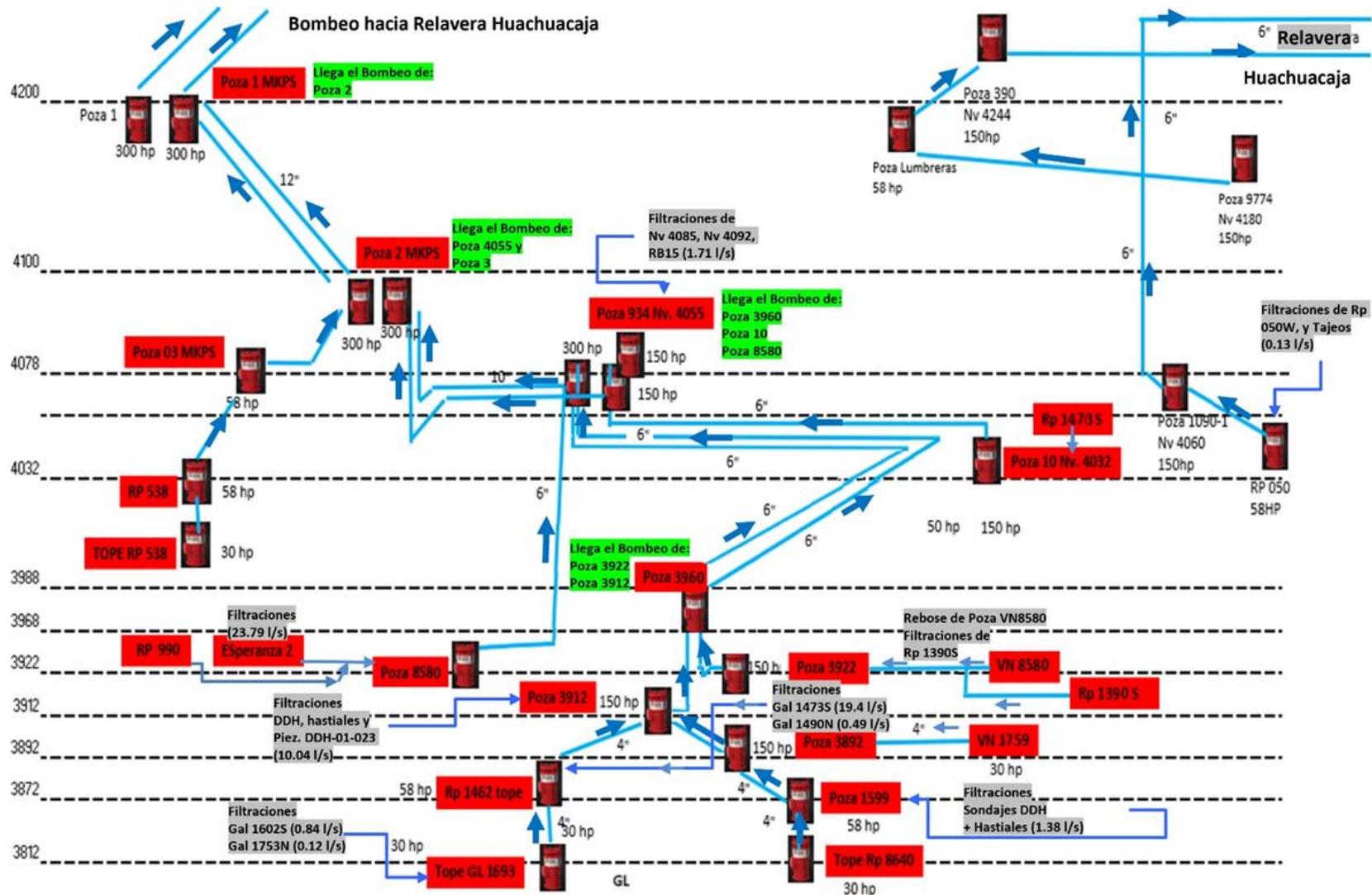


Figura 21. Unifilar del manejo de agua en interior mina

### **5.1.1 Parámetros hidráulicos**

En el ítem 3, se han identificado y descrito las diferentes formaciones geológicas, así como su síntesis y composición litológica. En este apartado dicha información se dota de carácter hidrogeológico, es decir, las formaciones geológicas se discretizan y agrupan en función de su relación con el agua subterránea.

La información relacionada con los parámetros hidráulicos de los materiales ha sido obtenida de la información existente en estudios anteriores (GWI 2008; MWH 2009, 2010, 2012; Golder, 2010; Hydro Geo, 2017; Amphos 21, 2020 y Amphos 21, 2023). Se cuenta con pruebas de tipo Lefranc (carga variable y constante), pruebas de Lugeon, pruebas granulométricas, Resing Head, pruebas de infiltración, Falling Head, Carga ascendente, carga descendente, Slug test y pruebas de bombeo.

La revisión de los datos de los ensayos hidráulicos aportó información relevante del comportamiento hidrodinámico del macizo rocoso. Las pruebas hidráulicas ejecutadas sirven de insumo importante para la determinación de los parámetros hidráulicos de cada una de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio.

### **5.1.2 Conductividad hidráulica**

Para la caracterización hidrogeológica de los diferentes materiales que afloran en la UM Colquijirca y entorno se compilaron diversos ensayos hidráulicos obtenidos de los siguientes estudios:

- GWI (2008) Estudio Hidrogeológico Global Mina Colquijirca Informa Final. Preparado para: Sociedad Minera El Brocal. Lima, Perú. Comprendió 133 ensayos hidráulicos (Carga ascendente, carga descendente, Rising Head, Falling Head y granulometría).
- MWH Perú S.A. (2009). Investigación Hidrogeológica Huaracaca para Remediación del Río San Juan). Comprendió con la ejecución de 38 pruebas hidráulicos bajo el método de Falling Head.
- MWH Perú S.A. (2010). Investigación Hidrogeológica Cárstica del Valle de Huachacaja. Se desarrolló 204 ensayos hidráulicos bajo la metodología de, carga ascendente, carga descendente y carga constante.
- Golder Associates Perú S.A. (2010). Evaluación Hidrogeológica del Área del Depósito de Relaves Huachuacaja - Estudio de Ingeniería Básica del Depósito de Relaves Huachuacaja – Mina Colquijirca. Preparado para: Sociedad Minera El Brocal. Lima, Perú. Se realizó 125 ensayos hidráulicos (Lugeon, Lefranc de carga variable y Lefranc de carga constante).
- MWH Perú S.A. (2012). Instalación de Piezómetros en Área de Relavera Huaracaca

Informe Final. Preparado para: Sociedad Minera El Brocal. Lima, Perú. Se realizaron 69 pruebas hidráulicas usando la metodología de carga ascendente y cargadescendente.

- Hydro-Geo (2017). Estudio Hidrogeológico de la Mina Marcapunta Norte – Sur / Fase I: Modelo Conceptual. Preparado para: Sociedad Minera El Brocal. Lima, Perú. Se llevó a cabo 50 ensayos hidráulicos bajo la metodología de (Lefranc de carga variable, Lefranc de carga constante y Air Lift)
- Campaña de campo realizada por Amphos 21 en el 2019
- Campaña de campo realizada por Amphos 21 en julio-setiembre de 2023, en la que se realizó la supervisión de 3 sondajes diamantinos con ejecución de ensayos hidráulicos y construcción de piezómetros.

Se cuenta con 21 valores de conductividad hidráulica obtenidos recientemente en los pozos y piezómetros existentes, distribuidos en rocas de del grupo Pucará, Mitu y Miembro Calera, estas pruebas hidráulicas fueron descritas en el MET-021.

En la tabla 11 se resumen los valores de permeabilidad de las diferentes unidades geológicas, mediante diferentes ensayos, los valores corresponden a la media geométrica.

**Tabla 11. Resumen de valores de permeabilidad en macizo rocoso**

Ensayo	Media Geométrica de valores de permeabilidad en m/d			
	Grupo Mitu	Grupo Pucará	Miembro Calera	Volcánicos en intrusivos
LFCC	3.34E-02	2.37E-02		7.40E-03
LFCV	1.8E-02	2.08E-02		2.07E-02
Carga ascendente	5.5E-02	7.02E-03	1.24E-01	1.10E-03
Carga descendente	3.0E-02	2.10E-02		2.73E-03
Lugeon	5.0E-03	4.43E-02		8.59E-03
Promedio	2.84E-02	2.34E-02	1.24E-01	8.11E-03

Para realizar un análisis descriptivo de la conductividad hidráulica obtenida en las diferentes formaciones geológicas, se ha agrupado toda la información disponible para cada litología. Los resultados de este análisis se describen a continuación.

Los valores de conductividad hidráulica para los materiales que conforman los depósitos cuaternarios (depósito aluvial, morrénicos y fluvioglacial) se encuentran en el orden de 1.08E-02 m/d a 1.50E+01 m/d. Este amplio rango de la conductividad obedece a la composición heterogénea de este depósito (alternancia de tramos permeables como arena y grava y tramos impermeables como por ejemplo limos y arcillas). El espesor promedio definido para este depósito es de aproximadamente 35 metros y es registrado en los piezómetros

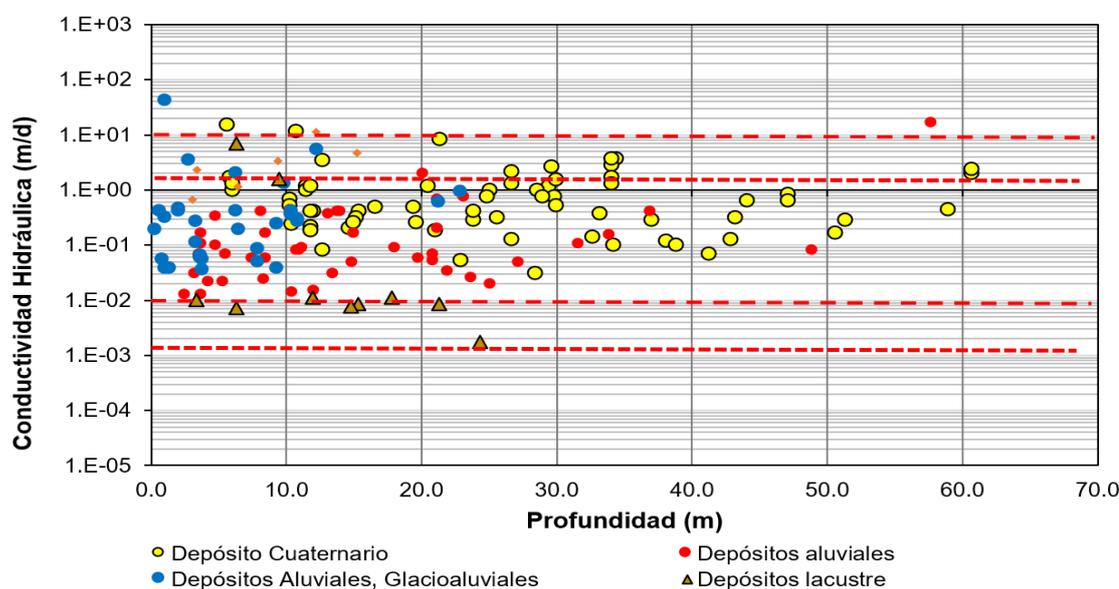
ubicados en su mayoría alrededor del depósito de relaves Huachaucaja. Los depósitos lacustres son los que presentan valores de permeabilidad más bajas.

En la figura 22 se muestra la representación gráfica de los valores de conductividad versus la profundidad. Los valores más bajos son representados por los materiales más finos (arcilla y limos). En términos generales el rango de permeabilidad no disminuye considerablemente con la profundidad.

En la tabla 12 se resume la media geométrica de valores de permeabilidad correspondiente a los depósitos cuaternarios, en la cual se observa que los depósitos lacustres presentan las permeabilidades más bajas.

**Tabla 12. Resumen de valores de permeabilidad en depósitos cuaternarios**

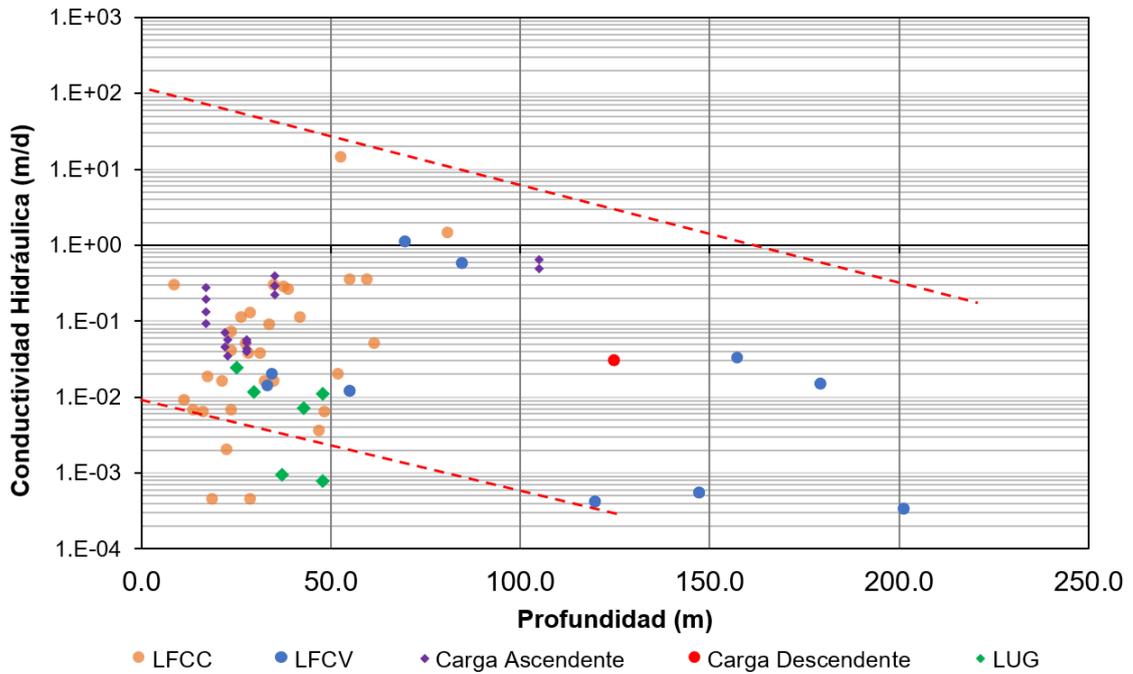
Depósito cuaternario	Permeabilidad (m/d) Media geométrica
Depósitos cuaternarios	5.38E-01
Depósito aluvial, glacioaluvial	2.83E-01
Depósito aluvial	4.31E-01
Depósito de morrena	2.58E+00
Depósito lacustre	7.67E-03
Promedio	7.67E-01



**Figura 22. Conductividad hidráulica vs profundidad de los medios no consolidados (cuaternarios)**

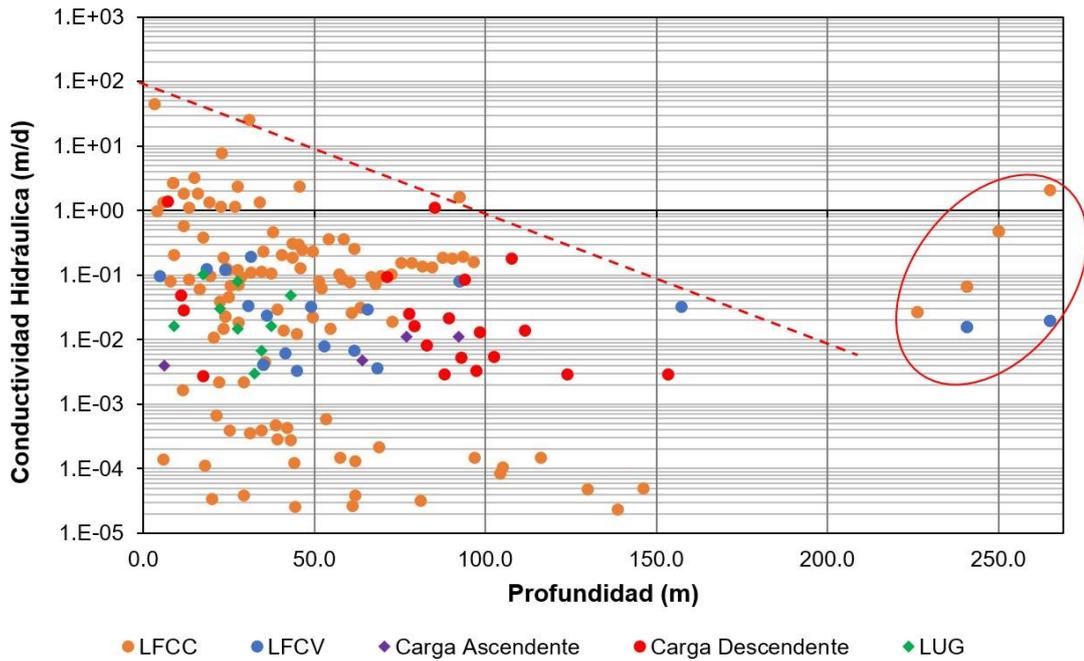
Las formaciones geológicas que principalmente afloran en el sitio y en la cual se cuentan con registros de ensayos hidráulicos son el grupo Mitu, Pucara, Miembro Calera, los intrusivos dacita porfirítica y volcánicos de la formación Rumillana. La descripción de los rangos de conductividad hidráulica estimados para formación se describe a continuación:

El grupo Mitu consiste en areniscas, conglomerados y brechas volcano-sedimentarias. Los ensayos realizados en estos materiales llegan hasta la profundidad de 200 metros aproximadamente y muestran un amplio rango de conductividad hidráulica. Se observa una correlación entre la permeabilidad y la profundidad, dicho grupo se encuentra en un orden de permeabilidad de  $1.38 \text{ E}+00$  hasta  $3.35\text{E}-04 \text{ m/d}$ . En la Figura 5.2 se evidencia lo descrito.



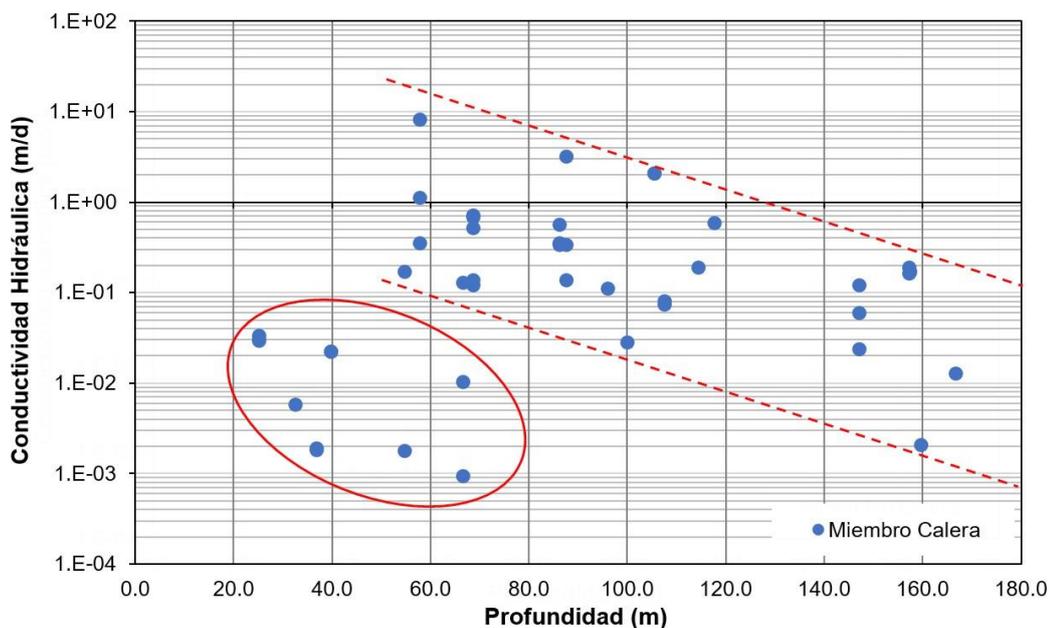
**Figura 23. Conductividad hidráulica vs profundidad del grupo Mitu**

El grupo Pucará está constituido por dolomitas, calizas mudstone nodulares e intercalada con calcarenitas correspondientes a las (Fm. Chambará, Pucará Occidental). Presenta estratos de medianos a gruesos y las pruebas hidráulicas interpretadas en esta litología abarcan una profundidad de 250 metros aproximadamente. En general, se observa una disminución de valores de la conductividad hidráulica a mayor profundidad. Los valores se encuentran en el rango de  $4.12\text{E}-03$  a  $3.18\text{E}+00 \text{ m/d}$ . Sin embargo, existe un conjunto de datos a profundidades de 250 m que presentan permeabilidades que difieren de esta correlación y corresponden con tramos fracturados asociados con estructuras principales. En la figura 22 se muestra el comportamiento de la conductividad hidráulica a profundidad del grupo Pucará.



**Figura 24. Conductividad hidráulica vs profundidad del grupo Pucará**

El Miembro Calera, de la Formación Pocobamba, está compuesto por conglomerados con clastos angulosos provenientes de Grupo Pucará, intercalado con limos, lutitas y delgados niveles de riolitas. Muestra un rango de conductividad hidráulica de  $2.07E-03$  a  $8.21E+00$  m/d hasta la profundidad de 170 metros aproximadamente. Sin embargo, existe un conjunto de datos con menor permeabilidad a los que se les asocia a tramos fracturados que han sido rellenados con materiales menos permeables o rocas menos fracturadas o competentes. En la figura 25 se puede ver el comportamiento de la conductividad hidráulica a profundidad del miembro Calera.



**Figura 25. Conductividad hidráulica vs profundidad del miembro Calera**

El volcánico Rumiallana está constituido por fragmentos angulosos y subangulosos de caliza, filitas, chert y brechas. Debido a la alteración de los intrusivos y dacitas porfiríticas se observa una ligera tendencia a disminuir los valores de permeabilidad a medida que incrementa la profundidad, los ensayos alcanzaron los 250 m de profundidad y muestran un rango de conductividad entre  $5.18E-04$  y  $1.30E-02$  m/d.

En la figura 26 se muestra la correlación de la conductividad hidráulica y la profundidad del volcánico Rumiallana, dacita porfirítica.

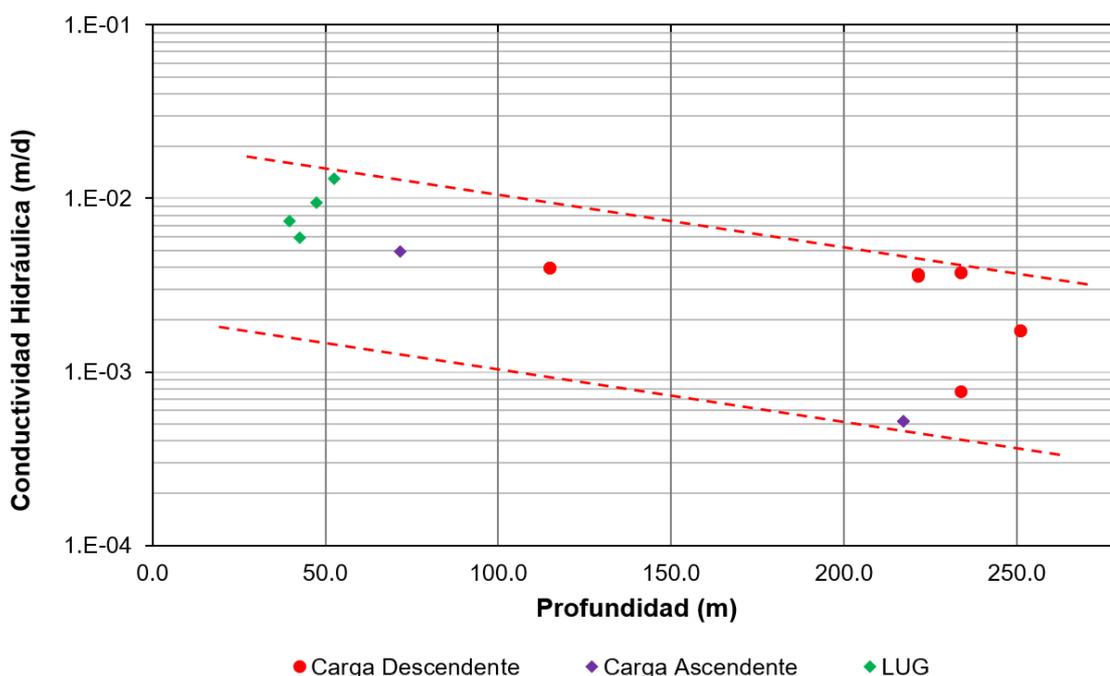


Figura 26. Conductividad hidráulica vs profundidad de rocas volcánicas e intrusivas

### 5.1.3 Coeficiente de almacenamiento

Sobre la base de las pruebas de bombeo realizadas por Amphos 21, 2020, se calculó el coeficiente de almacenamiento específico y son detallados en el 492\_18-MET- 021. En dicho documento se resume que el coeficiente de almacenamiento específico resultado de la prueba de bombeo a caudal constante, para el pozo PCN-01 se encuentra de  $1.05E-5$  a  $1.17E-5$ , el pozo PCN-03 se encuentra en el orden  $2.23E-5$  a  $4.04E-4$  m<sup>-1</sup> y en la prueba de bombeo a caudal escalonado para el pozo PCN-03 se encuentra de  $7.38E-4$  a  $1.91E-3$  m<sup>-1</sup>, estos coeficientes de almacenamiento están asociados principalmente a litologías de dolomitas y calizas presentes en el tajo norte, tal como se presenta en la tabla 13.

**Tabla 13. Resumen de parámetros hidráulicos obtenidos de las pruebas de bombeo**

Punto de observación	Información utilizada	T (m <sup>2</sup> /día)	K (cm/s)	K (m/día)	Ss (m-1)	Formulación empleada
PCN-03	Caudal constante	5.22E+01	4.03E-04	3.48E-01	-	Theis acuífero confinado
		7.08E+01	5.46E-04	4.72E-01	-	Theis acuífero Libre
		1.34E+02	6.55E-04	5.66E-01	4.04E-04	Barker - acuífero Fracturado
PCN-01	Caudal constante	8.42E+01	6.50E-04	5.61E-01	2.23E-05	Moench
		4.34E+02	3.35E-03	2.89E+00	1.17E-05	Barker - acuífero Fracturado

## CONCLUSIONES

1. En términos generales, el funcionamiento hidrogeológico en la zona se adapta a la topografía produciéndose la mayor parte de la recarga en las zonas más elevadas y las descargas en las zonas de valle asociadas a las principales quebradas en las que se disponen los componentes, Huachuacaja, Ocshapampa y San Juan, todas ellas tributarias del río Yanachuala chico. El movimiento del flujo subterráneo se asocia a las principales fallas y discontinuidades (comportamiento en medio fracturado).
2. El drenaje de la mina subterránea el año 2023 es de 67 L/s en temporada seca y en temporada húmeda no se tiene un registro actualizado de los flujos. Por otro lado, el registro de flujos desde el 2018 a 2020, proporcionados por SMEB representan caudales de bombeo, mas no el flujo proveniente del drenaje de las labores subterráneas, por lo que no es conveniente usar dichos flujos para el modelamiento numérico.
3. Sobre la base del conocimiento del inventario de fuentes de agua (piezómetros, manantiales, pozos y quebradas), se logró evidenciar la correlación que existe entre el comportamiento de los niveles de agua subterránea con la topografía, lo que permitió estimar la superficie piezométrica para el área de estudio y evidenciar los principales sentidos de flujo subterráneo y la influencia que tienen los componentes de mina sobre el recurso hídrico subterráneo.
4. El drenaje de la mina subterránea genera un cono de descenso muy focalizado al desarrollo de las labores, a consecuencia principalmente de la baja conductividad hidráulica (permeabilidad) del macizo rocoso en el cual se emplaza la mina.

## **RECOMENDACIONES**

1. Con la finalidad de tener cuantificado los principales flujos de mina: flujo de filtraciones del macizo rocoso, flujos de entrada, entre otros, se recomienda implementar sistemas de medición con caudalímetros en las principales salidas de drenaje del flujo subterráneo.
2. Se recomienda aprovechar los sondajes perforados para la instrumentación hidrogeológica en interior mina, esto permitirá fortalecer el entendimiento y mejorar la conceptualización del movimiento del agua subterránea.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ATAROFF, M. y SÁNCHEZ, L. Precipitación, intercepción y escorrentía en cuatro ambientes de la cuenca media del río El Valle, estado de Táchira, Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 2015, 41 (1), 11 - 30.
2. IMA. *Estudio de demanda hídrica actual y futura en las regiones de Cusco y Apurímac en el marco del Programa de Adaptación al Cambio Climático PACC - Fase I. Apurímac* : Instituto de Manejo de Agua y Medio Ambiente, 2018.
3. ACOSTA, L. y OCHOA, B. *Memorias del taller de reflexión: iniciativa regional de monitoreo hidrológico de ecosistemas andinos*. [En línea] Cuenca, Ecuador, 2010. [Fecha de consulta: 14 de abril del 2014] [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://interclima.minam.gob.pe/IMG/pdf/Mesa\\_04\\_-\\_Luis\\_Acosta\\_CONDESAN\\_-\\_Iniciativa\\_Regional\\_de\\_Monitoreo\\_Hidrologico\\_de\\_Ecosistemas\\_Andinos.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://interclima.minam.gob.pe/IMG/pdf/Mesa_04_-_Luis_Acosta_CONDESAN_-_Iniciativa_Regional_de_Monitoreo_Hidrologico_de_Ecosistemas_Andinos.pdf)
4. iMHEA. *Guía metodológica para el monitoreo hidrológico de ecosistemas andinos*. Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos, 2013.
5. CHÁVEZ, Juan y GARCÍA, Edwin. Análisis geomecánico y diseño de estabilidad física e hidrológica de labores mineras subterráneas en Santillana, Ayacucho 2020. Tesis (Título de Ingeniero de Minas). Cajamarca, Perú : Universidad Privada del Norte, 2021, 78 pp.
6. QUINTANA, Marita. Estudio hidrológico e hidrogeológico de la microcuenca Hércules de la Compañía Minera Lincuna S.A. - Huaraz. Tesis (Título de Ingeniero Industrial). Cerro de Pasco, Perú : Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, 2021, 135 pp.
7. HURTADO, Olimber. Simulación del impacto de la variabilidad climática sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca del lago Chinchaycocha - Junín. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Tarma, Perú : Universidad Católica Sedes Sapientiae, 2022, 168 pp.
8. CHANCA, Ahoshi y SOTO, Gisela. Análisis del comportamiento del balance hídrico superficial de la Sub Cuenca Ichu. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Huancavelica, Perú : Universidad Nacional de Huancavelica, 2022.
9. HUAMANI, Federico. Análisis de precipitación del periodo de 1981-2014 mediante la metodología de Downscaling de precipitación en la UH-Yauli para realizar predicciones climáticas futuras. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Lima, Perú : Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2022.
10. MATUS, Adania. *Análisis del comportamiento hidrológico de obras de cosecha de agua por escorrentía superficial de tipo reservorio, sobre la microcuenca Quebrada Sucia, corredor seco de Nicaragua*. Turrialba, Costa Rica : Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 2023.

11. CORBAT, María. Relación geomorfología-hidrología del Valle de Antinaco - Los Colorados, Sierras Pampeanas y Sistema de Famatina, provincia de La Rioja. Tesis (Título de Doctor en Ciencias Naturales). Buenos Aires, Argentina : Universidad Nacional de la Plata, 2022, 398 pp.
12. ASPRILLA, Geidy. Análisis multitemporal de las características geomorfológicas de la Cuenca Río Quito presionada por actividad minera. Tesis (Título de Especialista en Información Geográfica). Colombia : Universidad de Manizales, 2020, 73 pp.
13. LUTZ, Ley. Minería y seguridad hídrica en el noroeste de México: un análisis de doble exposición. *México : Revista Región y Sociedad*, 2020, 32, 1 - 30.
14. SOLANO, Fabián. Análisis del comportamiento ante metales pesados en bacterias aisladas de relaves mineros zacatecanos. Tesis (Maestro en Ciencia y Tecnología Química). México : Universidad Autónoma de Zacatecas, 2021, 86 pp.
15. CHEREQUE Moran, Wendor. *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil y minas*. Lima, Perú : CONCYTEC, 1980.
16. CERVANTES, Z. y Bustinza, U. *Sistemas de afianzamiento hídrico en microcuencas altoandinas del sur del Perú: una tecnología ancestral para la seguridad hídrica en tiempos de cambio climático*. Lima : s.n., 2014.
17. SÁNCHEZ, Hugo, REYES, Carlos y MEJÍA, Katia. *Manual de términos de investigación científica, tecnológica y humanística*. Lima, Perú : Universidad Ricardo Palma, 2018.
18. OSEDA, D. *Metodología de la Investigación*. Perú : Pirámide, 2008.
19. HERNÁNDEZ, R., FERNÁNDEZ, C. y BAPTISTA, P. *Metodología de la investigación*. México : McGraw Hill Education, 2014.
20. CAMPBELL, Donald y STANLEY, Julian. *Diseños experimentales y cuasiexperimentales en la investigación social*. Buenos Aires, Argentina : Amorrortu Editores, 1995.

## **ANEXOS**

**Anexo 1**  
**Matriz de Consistencia**

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>General:</p> <p>¿Cuál es la relación entre los factores y el comportamiento hidrológico en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal?</p>	<p>General:</p> <p>Determinar la relación entre los factores y el comportamiento hidrológico en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.</p>	<p>General:</p> <p>Existe una relación directa y significativa entre los factores y el comportamiento hidrológico en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.</p>		
<p>Específicas:</p> <p>1. ¿Cómo es el comportamiento de la precipitación pluvial en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal?</p> <p>2. ¿Cómo es el comportamiento del caudal en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal?</p> <p>3. ¿Cuáles son las características fisiográficas más importantes en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal?</p>	<p>Específicas:</p> <p>1. Describir el comportamiento de la precipitación pluvial en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.</p> <p>2. Describir el comportamiento del caudal en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.</p> <p>3. Determinar las características fisiográficas más importantes en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.</p>	<p>Específicas:</p> <p>1. Existen diferencias significativas en el comportamiento de la precipitación pluvial en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.</p> <p>2. Existen diferencias significativas en el comportamiento del caudal en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal.</p> <p>3. Las características fisiográficas más importantes en la Unidad Minera Colquijirca El Brocal corresponden a una cuenca pequeña subterránea.</p>	<p>Variable independiente: Factores hidrológicos</p> <p>Variable dependiente: Comportamiento hidrológico</p>	<p>Tipo: Aplicativo</p> <p>Nivel: Correlacional - Explicativo</p> <p>Diseño: No experimental</p> <p>Población: Unidad Minera Colquijirca El Brocal</p> <p>Instrumento: Fichas de observación</p>

## Anexo 2

### Matriz de operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente: Factores hidrológicos	“Son los factores que determina la naturaleza de descarga de los ríos o escorrenría superficial, los factores pueden ser agrupados en precipitación pluvial y las características fisiográficas de la unidad” (3).	“La precipitación pluvial se mide en mm, se denomina a toda el agua meteórica que cae en la superficie de tierra, tanto de forma líquida y sólida” (3).	Precipitación pluvial  Características fisiográficas	Duración de las precipitaciones Intensidad de las precipitaciones Precipitación promedio Área de la hidrológica subterránea Perímetro del hidrológico subterráneo Pendiente del hidrológico subterráneo Curva hipsométrica Pendiente general del curso principal del dren
Variable dependiente: Comportamiento hidrológico	“Se rige, además de sus características fisiográficas, por algunos procesos del ciclo hidrológico del agua, tales como: evapotranspiración, tipos de suelo y subsuelo y vegetación, entre muchos otros” (4).	“Es la cantidad de agua expresada en volumen (libros o m3) que circula en un lugar de un río (sección) por unidad de tiempo (horas o segundos)” (4).	Comportamiento del caudal	Caudal de escorrenría superficial Caudal específico

### Anexo 3

#### Matriz de operacionalización del instrumento

Variables	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Variable independiente: Factores hidrológicos	Precipitación pluvial	Duración de las precipitaciones	Ficha de observación
		Intensidad de las precipitaciones	Libreta de Campo
		Precipitación promedio	Libreta de Campo
	Características fisiográficas	Área de la hidrológica subterránea	Ficha de observación
		Perímetro del hidrológico subterráneo	Ficha de observación
		Pendiente del hidrológico subterráneo	Libreta de Campo
		Curva hipsométrica	Libreta de Campo
		Pendiente general del curso principal del dren	Libreta de Campo
Variable dependiente: Comportamiento hidrológico	Comportamiento del caudal	Caudal de escorrentía superficial	
		Caudal específico	





**Ficha de observación de aforo volumétrico**

<b>Indicador</b>	<b>Columna de Agua (cm)</b>	<b>Año</b>	<b>Meses</b>	<b>Caudal (l/s)</b>
<b>Caudal</b>				

Anexo 5  
Planos de diseño

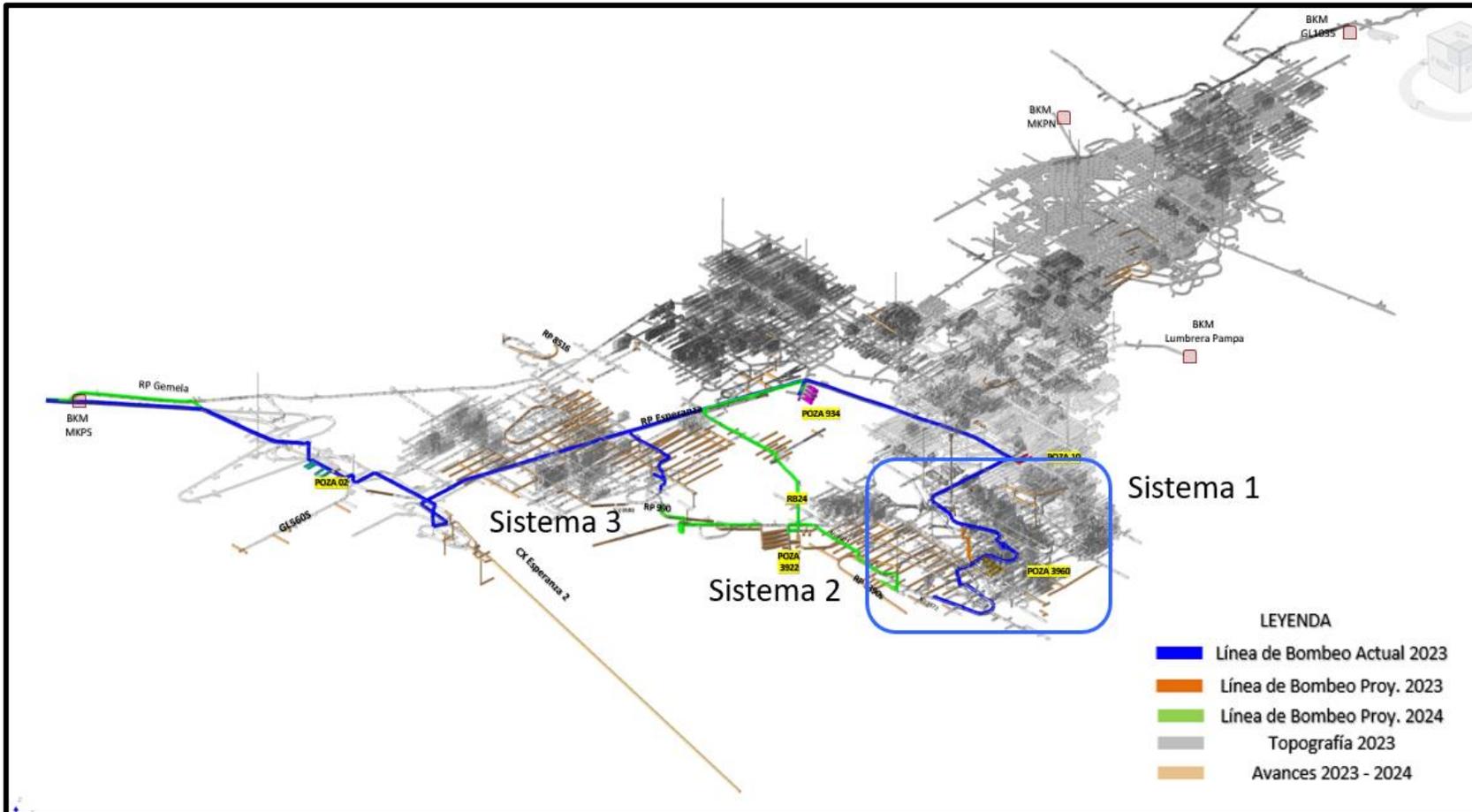
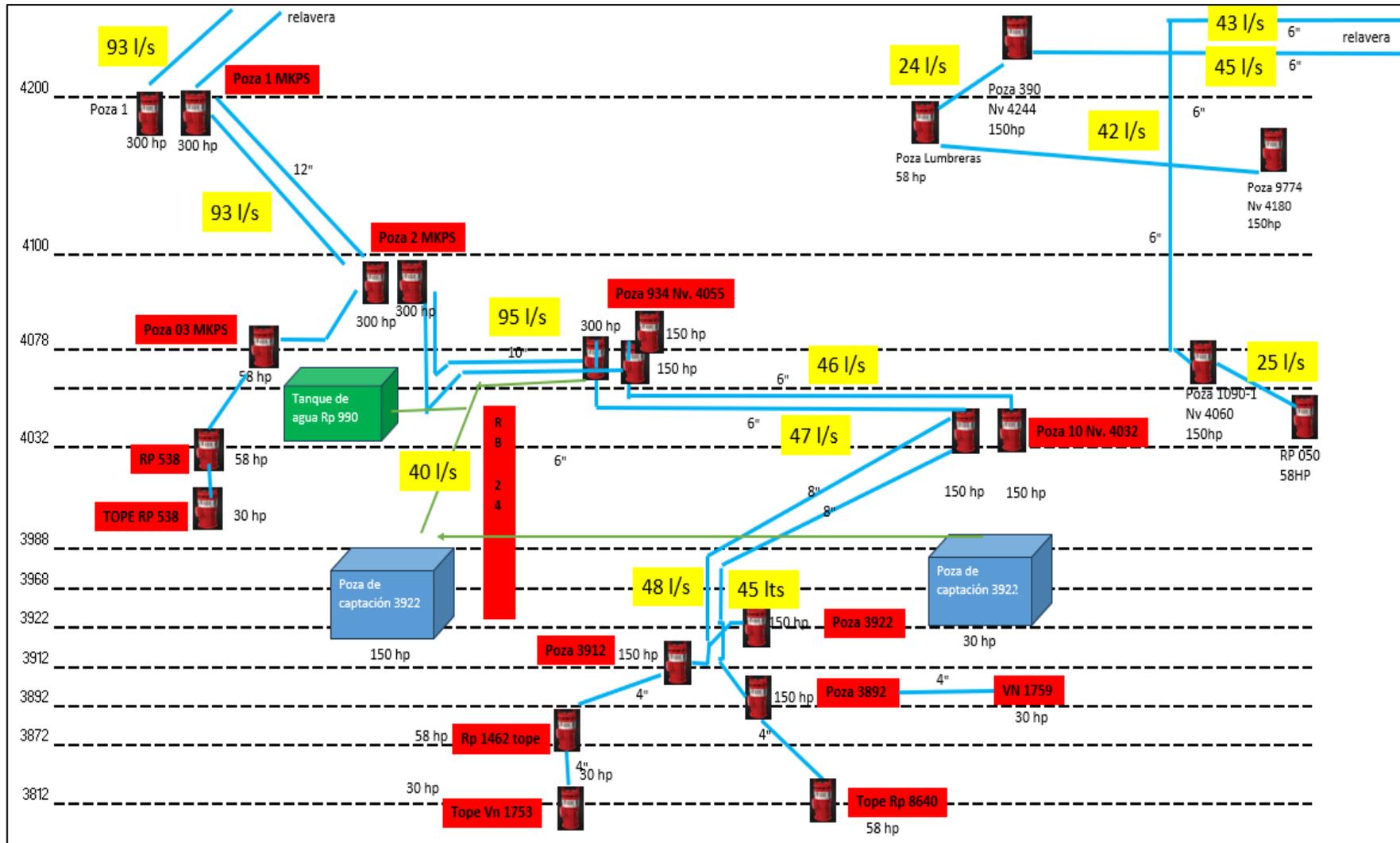


Figura 27. Esquema de sistema de bombeo.  
Extraído de la Sociedad Minera El Brocal S.A.A.



*Figura 28. Circuito agua de perforación.  
Extraído de la Sociedad Minera El Brocal S.A.A.*



*Figura 29. Esquema de sistema de bombeo - captación de agua limpia.  
Extraído de la Sociedad Minera El Brocal S.A.*