

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua para
incrementar la producción en mina subterránea aurífera**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Junnior Andrei Quezada Paucar

 [0009-0005-7597-3557](https://orcid.org/0009-0005-7597-3557)

Asesor

MSc. José Antonio Corimanya Mauricio

 [0000-0003-1078-4155](https://orcid.org/0000-0003-1078-4155)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Quezada Paucar [1]
Referencia/Reference	[1] J. Quezada Paucar, <i>“Mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua para incrementar la producción en mina subterránea aurífera”</i> [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Quezada, 2025)
Referencia/Reference	Quezada, J. (2025). <i>Mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua para incrementar la producción en mina subterránea aurífera</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres, Jose Luis Quezada y Maria Nicida Paucar por su apoyo incondicional y motivación para seguir siempre adelante, su ejemplo de lucha y persistencia ha sido el impulso que ha permitido seguir siempre adelante sin desmayar, hasta el logro de mis objetivos y metas.

Agradecimientos

Expreso mi profundo agradecimiento al Ingeniero, MSc. José Antonio Corimanya Mauricio, asesor de la presente tesis, por sus valiosas orientaciones técnicas y metodológicas. Su guía experta y rigurosa fueron esenciales para la culminación exitosa de este informe y la sistematización del presente trabajo de investigación.

Asimismo, extendiendo mi sincero agradecimiento al Ing. Henry Zambrana, especialista de esta tesis, por sus importantes aportaciones y conocimientos que enriquecieron significativamente el desarrollo de este proyecto.

Deseo expresar mi especial gratitud al Ing. Marcelo Santillana y al Ing. Anthony Ortega, quienes me brindaron la valiosa oportunidad de desarrollar mis habilidades en Compañía Minera Poderosa, experiencia que ha sido fundamental para alcanzar este logro y presentar la presente tesis.

En mi trayectoria profesional, agradezco al Ing. Pavel Oropeza por su invaluable orientación durante mis prácticas profesionales en una mina a tajo abierto, sentando bases importantes para mi desarrollo.

Finalmente agradecer al Ing. Javier Paredes, jefe de servicios mina, ya que, gracias a su soporte y conocimientos operativos sirvieron de ayuda para elaborar el presente trabajo de investigación.

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo general: Proponer el mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua para incrementar la producción en una mina subterránea aurífera. Para lograr este propósito se desarrolló una investigación de enfoque cuantitativo, explicativo propositivo, empleando un diseño de contrastación descriptivo propositivo. Se tuvo como unidad de análisis el sistema de aire comprimido y agua utilizado en las operaciones mineras. Esto incluye todos los sistemas que operan en las diferentes fases de la extracción y transporte del mineral en la Compañía Minera Poderosa, que son esenciales para el funcionamiento de equipos como Jumbos, Bolters y otras maquinarias operativas en la mina. Los resultados se presentaron empleando la estadística descriptiva a través de tablas y figuras estadísticas. Luego de analizar la situación inicial se elaboró una propuesta de mejora de los sistemas de aire comprimido y agua, concluyéndose que la propuesta de mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua representa una solución técnica viable y necesaria para incrementar la producción en una mina subterránea aurífera. La implementación de compresoras adicionales, el control de fugas y la optimización del sistema hidráulico permiten garantizar un suministro continuo, eficiente y seguro de recursos críticos para la operación minera. Estas mejoras fortalecen la estabilidad operativa, reducen tiempos improductivos y contribuyen directamente al cumplimiento de los volúmenes proyectados de producción.

Palabras clave — Producción, sistema de agua, sistema de aire comprimido, compresora.

Abstract

The general objective of this study was to propose improvements to the compressed air and water system to increase production in an underground gold mine. To achieve this objective, a quantitative, explanatory, and propositional research approach was developed, employing a propositional descriptive-contrast design. The unit of analysis was the compressed air and water system used in mining operations. This includes all systems operating in the different phases of mineral extraction and transportation at Compañía Minera Poderosa, which are essential for the operation of equipment such as jumbos, bolters, and other machinery operating in the mine. The results were presented using descriptive statistics through tables and figures. After analyzing the initial situation, a proposal for improving the compressed air and water systems was developed, concluding that the proposed improvement of the compressed air and water system represents a viable and necessary technical solution to increase production in an underground gold mine. The implementation of additional compressors, leak control, and hydraulic system optimization ensure a continuous, efficient, and secure supply of critical resources for the mining operation. These improvements strengthen operational stability, reduce downtime, and directly contribute to meeting projected production volumes.

Keywords — Production, water system, compressed air system, compressor.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xv
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.1.1 Unidad de estudio	1
1.1.2 Ubicación	1
1.1.3 Accesibilidad	2
1.1.4 Historia	4
1.1.5 Ubicación y accesibilidad	5
1.1.6 Clima	5
1.1.7 Topografía, elevación y vegetación	6
1.1.8 Geología regional	7
1.1.9 Geología local	7
1.2. Caracterización geológica	8
1.2.1 Depósito aluvial (Q-al)	8
1.2.2 Depósitos fluvioglaciares (Qp-gl)	8
1.2.3 Formación Chota (ksP-cho)	9
1.2.4 Grupo Pulluicana (Ks-pu)	9
1.2.5 Formación Chúlec – Pariatambo (Ki-chu,pt)	9
1.2.6 Grupo Goyllariquizga (Ki-g)	10
1.2.7 Grupo Pucará	10
1.2.8 Formación Aramachay (Ji-a)	11
1.2.9 Formación Chambará (Ts-ch)	11
1.2.10 Grupo Mitu (PeT-m)	11
1.2.11 Grupo Copacabana (PEc-c)	11

1.2.12	El batolito de Pataz (C-tn/gd).....	12
1.2.13	Intrusivos ígneos	12
1.2.14	Estructuras	19
1.2.15	Sistemas de vetas	20
1.2.16	Recurso energético	21
1.2.17	Producción y leyes de cabeza	22
1.2.18	Costo de minado y BECOOF.....	22
1.2.19	Recursos y reservas	23
1.2.20	Método de explotación	23
1.2.21	Ciclo de minado.....	24
1.2.22	Geomecánica	25
1.2.23	Equipos	25
1.2.24	Infraestructura	26
1.2.25	Servicios auxiliares.....	27
1.2.26	Planta metalúrgica.....	28
1.3	Planteamiento de la realidad problemática	30
1.3.1	Problema general	32
1.3.2	Problemas específicos	32
1.4	Objetivos	32
1.4.1	Objetivo general	32
1.4.2	Objetivos específicos.....	32
1.5	Hipótesis	33
1.5.1	Hipótesis general.....	33
1.5.2	Hipótesis específica.....	33
1.6	Variables	33
1.6.1	Variable dependiente.....	33
1.6.2	Variables independientes	33
1.7	Indicadores.....	33

1.7.1	Indicador de la variable dependiente	33
1.7.2	Indicadores de las variables independientes	34
1.8	Antecedentes referenciales	34
1.8.1	Antecedentes internacionales.....	35
1.8.2	Antecedentes nacionales	36
1.8.3	Antecedentes locales	37
1.9	Metodología de la investigación.....	38
1.9.1	Según el enfoque	38
1.9.2	Según su naturaleza.....	38
1.9.3	Según el alcance.....	39
1.9.4	Según el diseño de la investigación.....	39
	Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	40
2.1.	Marco teórico.....	40
2.1.1	Sistema de aire comprimido y agua en la minería	40
2.1.2	La producción en una empresa minera.....	42
2.2	Marco conceptual	43
2.2.1	Aire comprimido	43
2.2.2	Compresores.....	44
2.2.3	Sistema de distribución	44
2.2.4	Calidad del aire	44
2.2.5	Eficiencia energética	44
2.2.6	Presión de trabajo	44
2.2.7	Agua industrial.....	44
2.2.8	Sistemas de filtración	44
2.2.9	Automatización.....	44
	Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	45
3.1	Recolección de datos	45
3.1.1	Cálculos de aire comprimido	45

3.2	Unidad de análisis	48
3.3	Plan de recolección y elaboración de datos.....	49
3.3.1	Técnica de recolección de datos	49
3.3.2	Instrumento de recolección de datos	49
3.4	Etapas de investigación.....	49
3.5	Matriz de consistencia	49
3.6.	Hipótesis de investigación	50
3.6.1.	Hipótesis general.....	50
3.6.2.	Hipótesis específicas.....	50
3.7	Variables del estudio	50
3.7.1	Variable dependiente.....	50
3.7.2	Variable independiente.....	50
3.7.3	Operacionalización de variables	50
3.8	Diagnóstico situacional.....	52
3.8.1	Breve descripción de la empresa y sus procesos	52
3.8.2	Nivel de la producción de la Compañía Minera Poderosa, en mina subterránea	
	aurífera.....	53
3.8.3	Análisis del sistema de aire comprimido	58
3.8.4	Análisis del sistema de agua	69
3.9	Propuesta de mejora	72
3.9.1	Propuesta de Mejora del Sistema de Aire Comprimido.....	72
3.9.2	Propuesta de mejora del sistema de agua.....	77
	Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados	81
4.1	Discusión del objetivo específico 1	81
4.2	Discusión del objetivo específico 2	82
4.3	Discusión del objetivo específico 3	84
4.4	Discusión de Resultados – Objetivo General.....	85
	Conclusiones	88

Recomendaciones	89
Referencias bibliográficas	90
Anexos	93

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Accesibilidad a la zona de estudio	5
Tabla 2 : Operacionalización de variables.....	51
Tabla 3 : Programa de producción para el 2024 de la UEA Libertad.....	54
Tabla 4 : Proyección del programa de producción para el 2025 de la UEA Libertad	56
Tabla 5 : Tabla comparativa de la producción en la UEA Libertad entre los años 2024 y 2025.....	58
Tabla 6 : Características de la Compresora KAISHAN KRSP2 300 (Zona Alta).....	58
Tabla 7 : Características de la Compresora SULLAIR TS32 – 300 (Zona Baja).....	59
Tabla 8 : Factores de simultaneidad en comparación al nivel del mar	59
Tabla 9 : Horas operativas promedio por mes de compresoras NV2520.....	60
Tabla 10: Horas operativas promedio por mes de compresoras NV3100.....	60
Tabla 11: Horas de trabajo mensual de la compresora.....	60
Tabla 12: Cálculo del factor de simultaneidad a 2520 msnm	64
Tabla 13: Caudal requerido de compresoras de zona baja (2024 -2025)	64
Tabla 14: Balance del trabajo de las compresoras del nivel 2520, hasta el nivel 2860 (2024-2025)	65
Tabla 15: Comparación del requerimiento de aire comprimido (caudal), zona baja de Santa María, años 2024 y año 2025.....	65
Tabla 16: Cálculo del factor de simultaneidad a 3100 msnm	66
Tabla 17: Caudal requerido de compresoras de zona alta (2024 -2025)	67
Tabla 18: Balance del trabajo de las compresoras del NV3100, que atienden parte alta (2024-2025)	67
Tabla 19: Comparación requerimiento aire comprimido (caudal), zona alta de Santa María, años 2024 y 2025	68
Tabla 20: Consumo mensual de energía de compresoras (kWh).....	69
Tabla 21: Costos de consumo promedio por mes (\$/kWh-mes).....	69

Tabla 22: Balance de caudales - agua, parte alta	69
Tabla 23: Ingresos y caudal del agua, parte alta.....	70
Tabla 24: Balance de caudales - agua, parte baja	70
Tabla 25: Ingresos y caudal del agua, parte alta.....	70
Tabla 26: Balance de caudales – agua	71
Tabla 27: Costo de tuberías de 2” y 4”	71
Tabla 28: Costo de instalación de tuberías de 2” y 4”	71
Tabla 29: Ahorro energético por caída de presión – Proyecto RC 59.....	74
Tabla 30: Ahorro energético por caída de presión – Proyecto RC 58.....	75

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Mapa de ubicación de la zona de estudio Compañía Minera Poderosa	1
Figura 2 : Cía. Minera Poderosa, unidad “Santa María” – Pataz	2
Figura 3 : Planta Santa María de la Cía. Minera Poderosa, unidad “Santa María” – Pataz	3
Figura 4 : Explotación subterránea de la Cía. Minera Poderosa, unidad “Santa María” – Pataz.....	3
Figura 5 : Primeras exploraciones del potencial de Pataz	4
Figura 6 : Ubicación del área de Santa María	6
Figura 7 : Foto área de Pataz	7
Figura 8 : Unidades litológicas de la quebrada Frances.....	14
Figura 9 : Mapa Geológico local U.M. Santa María.....	16
Figura 10: Mapa geológico de la región de Pataz, mostrando las principales unidades litológicas y asentamientos mineros.....	17
Figura 11: Diferentes unidades geológicas	18
Figura 12: Columna estratigráfica regional.....	19
Figura 13: Plano vista planta Casa Compresora NV 2520	61
Figura 14: Diagrama de las compresoras NV 2500.....	62
Figura 15: Plano vista planta Casa Compresora NV 3100	63
Figura 16: Diagrama de las compresoras NV 3100.....	63

Introducción

La minería subterránea aurífera es una actividad compleja que depende en gran medida de sistemas de soporte como el aire comprimido y el agua industrial, esenciales para procesos como perforación, limpieza, ventilación y transporte de mineral. La eficiencia de estos sistemas influye directamente en la continuidad operativa y en los niveles de producción. Sin embargo, muchas operaciones enfrentan limitaciones técnicas y deficiencias en el mantenimiento o diseño de estos sistemas, lo que genera pérdidas energéticas, caídas de presión, interrupciones y sobre costos. Esta investigación aborda la necesidad de optimizar estos sistemas en una mina subterránea aurífera de la sierra norte del Perú, con el propósito de incrementar la producción y mejorar la eficiencia global del proceso minero.

El presente estudio se enfoca en diagnosticar el estado actual del sistema de aire comprimido y agua, identificar los principales problemas que afectan su rendimiento, y proponer mejoras técnicas viables para maximizar su operatividad. A través de un enfoque aplicado, se busca demostrar que, con una adecuada gestión de estos recursos, es posible aumentar la productividad sin necesidad de grandes expansiones de infraestructura. Este trabajo de tesis está estructurado en capítulos que desarrollan progresivamente la problemática, los fundamentos teóricos, la metodología aplicada y los resultados obtenidos, culminando con conclusiones prácticas y recomendaciones útiles tanto para la gerencia como para el personal operativo.

En este orden de ideas se aprecia en el Capítulo I: Parte introductoria del trabajo. Presenta el contexto general de la investigación, la caracterización geológica de la mina, la descripción de la problemática, formulación del problema general y específicos, así como los objetivos, hipótesis, variables, indicadores y antecedentes del estudio. También se describe la metodología utilizada para abordar la investigación.

Capítulo II: Marcos teórico y conceptual. Desarrolla la fundamentación teórica que sustenta la investigación. Se abordan conceptos clave sobre los sistemas de aire

comprimido y agua en minería, así como su influencia en la producción minera. Además, se incluye un marco conceptual que define términos técnicos y variables involucradas en el estudio.

Capítulo III: Desarrollo del trabajo de investigación: Describe las técnicas de recolección de datos, los cálculos técnicos relacionados con el sistema de aire comprimido, la unidad de análisis, el plan de recolección de datos, las etapas del estudio y la matriz de consistencia que guía la coherencia del trabajo.

Asimismo las Hipótesis y operacionalización de variables: Presenta la hipótesis general y las hipótesis específicas, así como la descripción detallada de las variables dependientes e independientes, y cómo fueron operacionalizadas para ser medidas dentro del estudio.

También el Diagnóstico y propuesta de mejora: Contiene el diagnóstico técnico de los sistemas actuales de aire comprimido y agua en la mina estudiada, incluyendo sus deficiencias. Se plantean propuestas de mejora técnica orientadas a corregir estas falencias, optimizando su funcionamiento y contribuyendo al aumento de la producción.

Capítulo IV – Análisis y discusión de resultados: Se analizan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de las mejoras propuestas, comparándolos con estudios previos y con los fundamentos teóricos. Se valida si las mejoras impactaron positivamente en la producción y eficiencia de la mina.

En las conclusiones del estudio se sintetizan los hallazgos del estudio en relación con los objetivos propuestos, destacando la efectividad de las mejoras implementadas y los beneficios obtenidos.

Sí mismo se brindan sugerencias prácticas dirigidas tanto a la gerencia como al personal operativo de la mina, para mantener e incluso seguir mejorando los sistemas optimizados, asegurando su sostenibilidad en el tiempo.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

El estudio se desarrolló en la Cía. Minera Poderosa de la unidad Santa María”, ubicado en el distrito de Pataz, Provincia y Departamento de La Libertad”,

1.1.1 Unidad de estudio

La Unidad Minera Santa María es una de las tres unidades de producción de la Compañía Minera Poderosa, ubicada en el distrito de Pataz, provincia de La Libertad, Perú. Esta unidad se dedica a la extracción y procesamiento de oro mediante minería subterránea.

1.1.2 Ubicación

Distrito de Pataz, provincia de La Libertad, a aproximadamente 320 km de Trujillo, entre los 1,250 y 3,000 metros sobre el nivel del mar (ProActivo, 2022).

Figura 1

Mapa de ubicación de la zona de estudio Compañía Minera Poderosa, Pataz, La Libertad – Perú



Fuente: Coba (2017).

1.1.3 Accesibilidad

El acceso a la unidad minera se puede realizar por vía terrestre, aunque las condiciones de las carreteras pueden ser desafiantes debido a su geografía montañosa. En la localidad de Chagual, cercana a la unidad, se encuentra el Aeródromo de Chagual, un aeropuerto privado de la Compañía Minera Poderosa que ofrece vuelos desde Lima y Trujillo, facilitando el acceso aéreo a la zona.

Figura 2:

Cía. Minera Poderosa, unidad “Santa María” – Pataz



Fuente: https://www.rumbominero.com/peru/noticias/mineria/poderosa-capacidad-santa-maria-1000-tmd/?utm_source=chatgpt.com

- **Planta de beneficio:** La planta Santa María tiene una capacidad operativa de 1,000 toneladas de mineral por día, tras una ampliación que involucró una inversión de aproximadamente 243 millones de dólares. Esta ampliación incluyó la construcción de nuevas instalaciones y la mejora de las existentes, así como la construcción de un nuevo depósito de relaves en la zona de Hualanga.

Figura 3

Planta Santa María de la Cía. Minera Poderosa, unidad “Santa María” – Pataz



Fuente: https://proactivo.com.pe/planta-santa-maria-de-poderosa-cumple-25-anos/?utm_source=chatgpt.com

- **Operaciones:** La minería se realiza mediante explotación subterránea, y el mineral extraído se procesa en la planta de beneficio Santa María. La empresa ha considerado integrar las plantas de Santa María y Maraón en el Batolito de Pataz a través de un tramo (Cortada 500), lo que facilitaría el traslado de unidades de transporte, personal y bienes.

Figura 4

Explotación subterránea de la Cía. Minera Poderosa, unidad “Santa María” – Pataz



Fuente: <https://www.poderosa.com.pe/operaciones/introduccion>

1.1.4 Historia

La Unidad Minera Santa María, ubicada en el distrito de Pataz, provincia de La Libertad, forma parte de la Compañía Minera Poderosa, una empresa peruana dedicada a la explotación y procesamiento de oro. Su historia se remonta a la década de 1970, cuando se realizaron estudios geológicos en la zona, identificando su potencial aurífero (Poderosa, 2025). En 1980, se constituyó legalmente la compañía, y en 1982, se inició la construcción de la planta de beneficio Santa María, que comenzó a operar en 1997 con una capacidad de 200 toneladas por día (TPD).

Figura 5

Primeras exploraciones del potencial de Pataz



Fuente: <https://www.poderosa.com.pe/operaciones/introduccion>

A lo largo de los años, la planta ha experimentado diversas ampliaciones. En 2019, se completó una ampliación que permitió aumentar su capacidad de procesamiento a 800 TPD, con una inversión aproximada de 243 millones de dólares. Esta inversión incluyó la construcción, operación y mantenimiento, así como el cierre de mina. En términos de producción, en 2022, la Compañía Minera Poderosa produjo 300.662 onzas de oro y 191.898 onzas de plata.

En resumen, la Unidad Minera Santa María ha sido clave en el desarrollo de la minería aurífera en la región de Pataz, contribuyendo significativamente a la producción de oro en el país.

1.1.5 Ubicación y accesibilidad

La unidad Santa María está situada en el departamento de La Libertad, en la provincia de Pataz y en el distrito de Pataz. Su ubicación geográfica se encuentra entre las coordenadas UTM del sistema geográfico mundial (WGS 84 - Zona 18 Sur) E-212 500 m, N-9 136 000 m y E-218 000 m, N 9 142 500 m, con una altitud que oscila entre 1 950 y 4 300 metros sobre el nivel del mar. Hidrológicamente, las microcuencas terminan en la quebrada Hualanga, la cual es afluente del río Marañón.

Para llegar a la zona del proyecto se dispone de dos rutas: Vía aérea - terrestre: Comienza en Trujillo desde el Aeropuerto Internacional Carlos Martínez de Pinillos hasta el Aeródromo de Chagual situado en el distrito de Pataz, y prosigue por la ruta Chagual - Santa María, con un periodo de viaje de 1 hora. Vía terrestre: Desde Trujillo hasta Huamachuco, continuando hasta Santa María, con un trayecto de 14 horas en vehículo particular.

Tabla 1

Accesibilidad a la zona de estudio

TRAMO	DISTANCIA (KM)	TIPO DE VÍA	TIEMPO (HORAS)
Lima – Trujillo	560.0	Asfaltada	9.00
Trujillo - Vijus	332.0	Vía carrozable	12.00

Fuente: Elaboración propia.

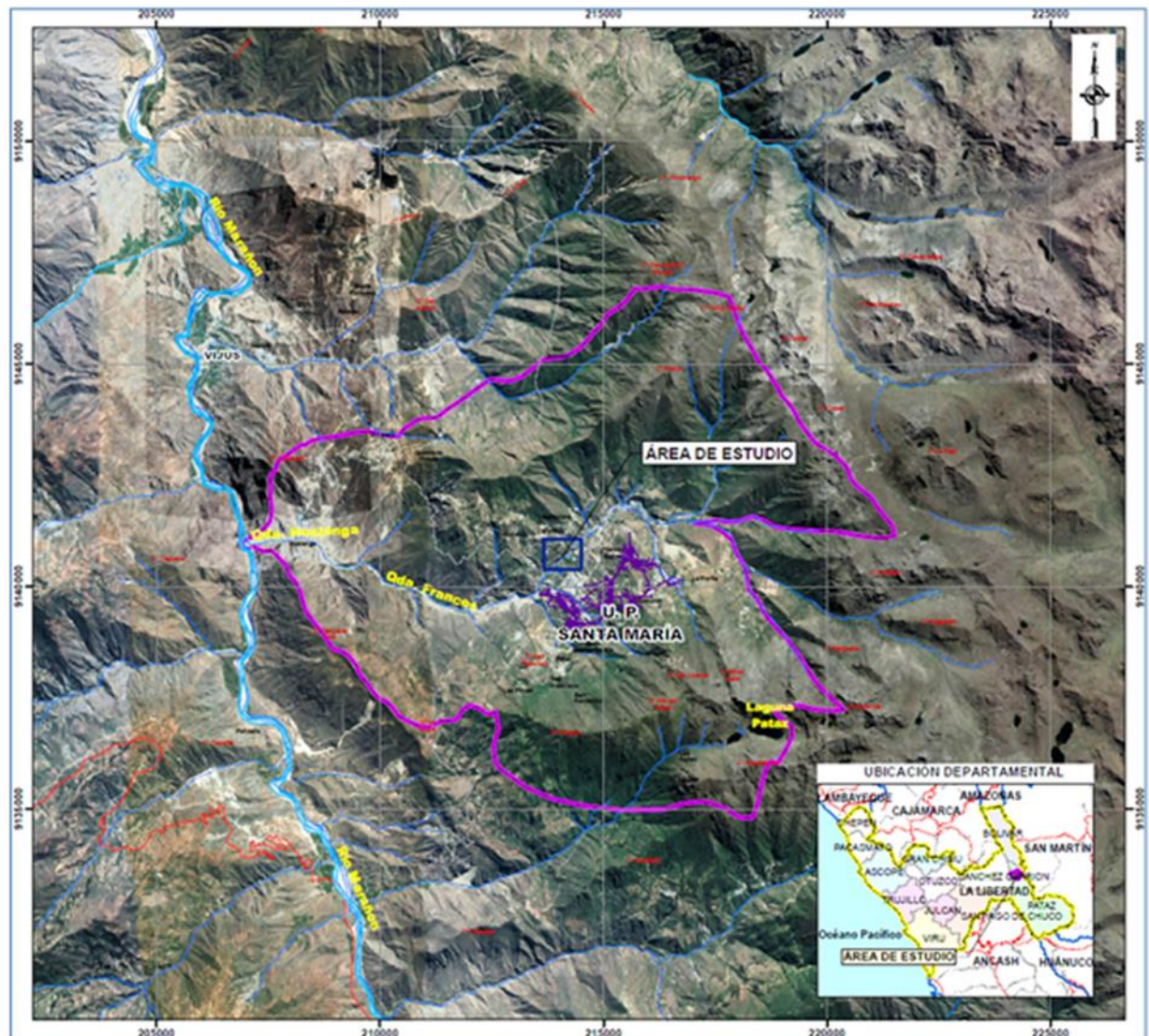
1.1.6 Clima

La Unidad Minera Santa María de la Compañía Minera Poderosa, ubicada en el distrito de Pataz, provincia de La Libertad, se encuentra entre los 1,250 y 3,000 m.s.n.m., en una zona de clima variado por su altitud. Predomina un clima templado-frío con temperaturas anuales entre 7 °C y 17 °C, y precipitaciones que superan los 200 mm. La zona experimenta tres estaciones marcadas: lluvias intensas de noviembre a abril, un periodo seco con heladas de mayo a agosto, y lluvias moderadas de septiembre a octubre.

Estas condiciones hacen que el clima sea fresco, con frecuentes neblinas y variaciones térmicas notables durante el día.

Figura 6

Ubicación del área de Santa María



Fuente: Elaboración propia.

1.1.7 Topografía, elevación y vegetación

La Unidad Minera Santa María de la Compañía Minera Poderosa está ubicada en una región montañosa del distrito de Pataz, en la vertiente oriental de los Andes, con una altitud que varía entre los 1,250 y 3,000 m.s.n.m. Su topografía es accidentada, con pendientes pronunciadas, cañones y quebradas profundas. La vegetación corresponde a la serranía esteparia, predominando matorrales, arbustos y bosques secos dispersos,

adaptados a un clima semiárido con escasa precipitación y grandes variaciones térmicas, propios de las condiciones extremas de la sierra norte del Perú.

Figura 7

Foto área de Pataz



Fuente: <https://www.minube.com/fotos/pataz-c309579>

1.1.8 Geología regional

La geología regional del área de la Unidad Minera Santa María, en Pataz (La Libertad), pertenece a la faja metalogénica Pataz-Buldibuyo, dentro de la Cordillera Oriental del norte peruano. Está dominada por el batolito de Pataz, compuesto por rocas intrusivas como granodioritas, monzogranitos y dioritas, que están asociadas a una intensa actividad tectónica. La mineralización aurífera se presenta en vetas de bajo ángulo con cuarzo, pirita, galena, esfalerita y oro (electrum), acompañadas de alteraciones filicas cerca de las vetas y propilíticas en zonas más distales, lo que indica una génesis relacionada a procesos hidrotermales en un ambiente geológicamente activo.

1.1.9 Geología local

La geología local de la Unidad Minera Santa María, ubicada en el distrito de Pataz (La Libertad), se caracteriza por una compleja estructura geológica asociada al batolito de Pataz. Este batolito está compuesto principalmente por rocas granodioríticas y

monzograníticas, con presencia de tonalitas, dioritas y microdioritas. La mineralización aurífera se presenta en vetas de tipo tensional de bajo ángulo, como la Veta Esperanza, que muestra una geometría irregular y una mineralogía compuesta por cuarzo, pirita, galena, esfalerita y oro (electrum). La alteración predominante es la fílica en las rocas de contacto con las vetas, mientras que hacia los bordes externos se observa alteración propilítica. Esta configuración geológica es resultado de procesos tectónicos y magmáticos que han influido en la formación y distribución de los recursos minerales en la zona.

1.2. Caracterización geológica

1.2.1 Depósito aluvial (Q-al)

Son producto de la meteorización y erosión de afloramientos de roca y suelo que fueron trasladados por las corrientes de ríos permanentes hacia la parte baja y depositados en forma de terrazas. Los cursos de agua fueron erosionando el lecho y las terrazas aluviales. Está constituida por grava arenosa y grava areno-limosa, mal graduadas, no consolidadas, con fragmentos redondeadas a sub redondeadas, bolones y clastos en matriz arenosa. Se emplazan principalmente en la quebrada Potosí, Chigualen, Los Alisos, Frances y Hualanga con un espesor aproximado de 10 a 20 m. 3.2.2 Depósito coluvial (Q-co) Constituidos por materiales de diferente tamaño desde arenas hasta bloques de rocas intrusivas (granitos, tonalitas y granodioritas) y volcánicas conformadas por andesitas englobadas en una matriz arenosa con gravas angulosas a sub-angulosas, mal clasificadas. Se han formado por la alteración y desintegración de rocas de las laderas superiores adyacentes por la acción de la gravedad, predomina en las zonas de Santa María y Patatz.

1.2.2 Depósitos fluvio-glaciares (Qp-gl)

Los depósitos fluvio-glaciares se restringen a la faja de las alta cumbres del área principalmente hacia el Noreste, la que tiene pequeñas morrenas glaciares compuesto por fragmentos de rocas a lo largo del cauce de la quebrada Chirimachay. Consiste en amplia extensión de grava y arena de origen fluvio-glaciario, formando un extenso manto sobre el

cual se ha desarrollado un drenaje irregular que carece de un patrón definido. Se estima que los depósitos alcanzan un grosor máximo de 20 m, aproximadamente.

1.2.3 Formación Chota (*ksP-cho*)

Secuencia continental rojiza púrpura constituida hacia la base por areniscas gris violáceas a gris rojizas pasando a gris amarillentas y verdosas, de grano fino a medio, intercalada con niveles pelíticos gris violáceos. Las areniscas se presentan en estratos medianos a gruesos, de 50 cm a 1 m de espesor, tabulares, con estratificación sesgada, micáceos, compactos, que disminuyen hacia la parte superior aumentando a su vez las limoarcillitas. La formación Chota sigue el mismo patrón de distribución que presentan el resto de materiales mesozoicos. En el área de estudio aflora al Suroeste en el cerro la Colpa, como una gruesa franja que se extiende siguiendo una dirección aproximada NO-SE.

1.2.4 Grupo Pulluicana (*Ks-pu*)

Se encuentra suprayaciendo concordante a la formación Chúlec-Pariatambo e infrayaciendo en forma discordante a la formación Chota, su exposición generalmente se localiza en el centro del país, se ha podido observar un afloramiento resaltante en la carretera a Llaupa y en el borde occidental de la laguna Pías, donde se observa conformando un eje de anticlinal y sinclinal abierto, ambos flancos se encuentran totalmente fallados, se presentan generalmente con escarpas muy fuertes. También ha sido posible observarlas al Oeste de San Fernando y Suroeste de Quichibamba constituyendo escarpas muy fuertes. La litología consiste de una secuencia de calizas en estratos medios a gruesos de tonalidad crema, la superficie de exposición tiene estratificación ondulada irregular. Por su posición estratigráfica se le considera del cretáceo superior, de medio ambiente deposicional marino de cierta profundidad. Localmente aflora al Suroeste del área de estudio.

1.2.5 Formación Chúlec – Pariatambo (*Ki-chu,pt*)

Fue estudiada por Wilson y Reyes (1964), sus afloramientos más resaltantes se encuentran al este de la laguna Pías y en la margen izquierda del río Retamas en la parte

baja de la presa Alpamarca, se expone suprayaciendo al Grupo Goyllarisquizga e infrayaciendo a la formación Pulluicana, en concordancia a la formación Chúlec. Por consideraciones litológicas no fue sido posible separarlos en formaciones individuales, se trata de una secuencia delgada constituida principalmente por calizas de tonalidades gris claras a cremas, intercaladas con algunos niveles delgados de margas de tonalidades grises a gris verdosas cuya erosión y meteorización ha permitido la conformación de sus granos en forma subesferoidal y una fracturación de tipo subconcoide irregular. Por su posición estratigráfica se le asigna edad Albiano Superior del Cretáceo Inferior. Estas rocas afloran hacia el Oeste por el cerro Campa Orco.

1.2.6 Grupo Goyllarisquizga (Ki-g)

Suprayace al Grupo Pucará en discordancia angular e infrayace a la formación Chúlec Pariatambo en discordancia erosional, sus afloramientos más resaltantes se localizan al este de la laguna Pías, en la margen izquierda del río Parcoy - Retamas, se caracteriza por sus capas y estratos gruesos de areniscas, su topografía es de escarpes de erosión, se observan secuencias completas en el norte y centro del país conformando las formaciones Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat, sin embargo en la zona la secuencia es incompleta. Su litología consta principalmente de areniscas cuarzosas, de colores marrón rojizas a blanco rojizas, intercaladas con lutitas de tonalidades grises a pardo grisáceas, las calizas son de tonalidades gris oscuras, se presentan en estratos delgados. Se le atribuye edad Neocomiano -Albiano Inferior del Cretáceo Inferior. Localmente afloran al Este del área de estudio.

1.2.7 Grupo Pucará

Comprendida por un conjunto de facies calcáreas entre calizas, calizas dolomíticas, areniscas de grano fino, pizarras limosas, chert, además de intercalaciones de tobas grises. Estas facies reposan en marcada discordancia sobre el grupo Mitu, las cuales a su vez se encuentran divididas en tres formaciones: Chambará, Aramachay y Condorsinga. Estas rocas afloran al Suroeste de la zona de estudio en ambas márgenes del río Marañón.

1.2.8 Formación Aramachay (Ji-a)

La unidad superior es típicamente una caliza negra y fétida, en capas delgadas y con intercalaciones de lutita negra, mientras que la sílice no es tan abundante y aparece como lentes delgados y oscuros en los planos de estratificación, su potencia aproximada es 300 m. Esta formación aflora en la zona de Hualanga.

1.2.9 Formación Chambará (Ts-ch)

Se caracteriza por su estratificación masiva, su color gris claro y alto contenido de sílice blanco, con una potencia aproximada de 140 m.; esta formación aflora a ambos márgenes de la quebrada Hualanga

1.2.10 Grupo Mitu (PeT-m)

Afloran principalmente al Suroeste de la zona de estudio, la litología consiste en una serie de lavas andesíticas porfiríticas y principalmente niveles de arenisca, limolita y conglomerado, rojo oscuros bien estratificados en capas delgadas a medianas; así como una secuencia de conglomerado macizo, rojo oscuro, compuesto de elementos gruesos, por intemperismo da un color casi negro. Se le considera como un depósito continental por la ausencia de horizontes marinos y su litología relevante, la abundancia de conglomerados cuyos clastos presentan fragmentos gruesos y mal seleccionados, indican un transporte corto y cercano a las zonas de aportación. Por las dataciones radiométricas y su posición estratigráfica se le asigna una edad Pérmico Superior – Triásico. Se correlaciona con el Grupo Mitu del centro del Perú.

1.2.11 Grupo Copacabana (PEc-c)

Se caracteriza por afloramientos de caliza grisácea, localmente arenosa, estratificada en capas delgadas entre las cuales son comunes las intercalaciones de lutitas negras y limolitas. La caliza es de grano fino a mediano y localmente contiene fragmentos triturados de fósiles; y la caliza arenosa contiene granos redondeados de cuarzo que alcanza más de 1 mm. de diámetro, en algunas capas los granos clásticos parecen “flotar” en la matriz calcárea. Aunque las rocas del grupo Copacabana tienen un color gris claro cuando están frescos, por el intemperismo cambian a un tono más oscuro hasta casi negro.

Se extiende como una franja delgada y aflora al Suroeste del área de estudio en ambos márgenes del río Marañón. El contacto superior del grupo Copacabana es una pequeña discordancia encima de la cual se encuentran los sedimentos clásticos del grupo Mitu.

1.2.12 El batolito de Pataz (C-tn/gd)

El Batolito de Pataz, la principal roca huésped de las vetas auríferas, es parte de un cinturón intrusivo gigante calco-alkalino, el cual se extiende desde los 6° hasta los 11° 30'S a lo largo de la Cordillera Oriental. Este cuerpo intruye el basamento metamórfico pre-Siluriano a lo largo de un sistema de fracturas de rumbo NNW. La granodiorita y el monzogranito que son los constituyentes dominantes de la intrusión contienen numerosos enclaves de microdiorita y xenolitos del basamento metamorfizados. Los diques félsicos y lamprófidos representan respectivamente fundidos peraluminosos e hipabisales del sistema. Los diques félsicos bajo la forma de aplitas o stocks de granito rosado de grano fino ocurren en la parte apical del batolito, tanto como abundantes aplitas delgadas o como pequeños stocks de granito rosado con núcleos de pegmatita. Los lamprófidos fueron inyectados subsecuentes a las aplitas y a los stocks de granito con un rumbo N-S y buzamiento hacia el E, y ocurren en asociación espacial con los filones auríferos.

1.2.13 Intrusivos ígneos

1.2.13.1 Diorita (C-di). Afloramientos reducidos de dioritas se pueden observar en algunos sectores, presentándose geotécnicamente más resistentes; así como también pequeños stocks de Adamelita. Se presentan como emplazamientos menores de dirección N-S, como los observados en la zona de quebrada Honda y al Sureste de Paraíso.

1.2.13.2 Tonalita- Granodiorita (Cm-di/tn/gd). Roca grisácea de grano mediano a grueso, compuesta fundamentalmente por cristales de hornblenda negra, plagioclasa blanca y cuarzo. Respecto a la edad de la granodiorita se sabe que ésta se emplazó posteriormente al Precambriano pero antes del Terciario medio o superior. En base de su similitud litológica con los batolitos post-orogénicos de otras regiones andinas se supone que es un intrusivo del Terciario inferior. Lo cierto es que no muestra ninguna evidencia de haber sufrido una fuerte compresión, y el hecho de que se encuentra en contacto con rocas

cretáceas no metamorizadas se explica por fallamiento posterior. En el área se presenta como una gruesa franja de dirección NO-NE, del poblado Santa María.

1.2.13.3 Monzogranito (C-mgr). Es un cuerpo intrusivo color rosado, de grano medio, cortados por pequeños diques de composición andesítica y diorítica, presenta vetillas y vetas de calcita, la textura de la roca es holocristalina, hipidiomórfica, con mayor porcentaje de ortosa, con igual contenido de cuarzo y plagioclasa, como minerales accesorios se expone la magnetita, apatita y circón. Estos cuerpos plutónicos son tardíos y se asocian diques aplíticos y ocasionalmente pegmatitas. Es frecuente la presencia de vetillas y vetas de calcita, la textura es holocristalina - hipidiomórfica, con contenido mineralógico del 35 - 55% de ortosa, 25-45 % de cuarzo, 20-40% de plagioclasa, minerales accesorios de magnetita, apatita y circón.

1.2.13.4 Sienogranito (C-sgr). Tiene una dirección NO-SE, son rocas feldespáticas alcalinas y cuarzo; Plagioclasa aparece en cantidades menores. Su textura es macrocristalina - equigranular. Su aspecto general es el tono rojizo por la apariencia del Feldespato Alcalino

1.2.13.5 Formación Lavasen (Cm-l). Está constituido por bancos masivos de piroclastos grisáceos, la litología predominante es tufo dacítico a riolítico y en menor proporción brechas y tufos andesíticos, se estima un espesor máximo de 1,500 m. El tope de esta unidad ha sido intensamente erosionado, pero en la base aflora ampliamente en el flanco oriental del río Marañón. Los piroclastos sobreyacen a una superficie erosionada metamórfica del complejo Marañón y la granodiorita del batolito de Pataz. El volcánico Lavasen se observa en bancos grueso generalmente están casi horizontales con buzamiento de 30°, pero en este caso se trata de coladas volcánicas. Morfológicamente presenta farallones y escarpas, los bancos macizos dan lugar a pendientes bien fuertes, tal como se observa en zonas altas al Este de las quebradas Santa María y la Quinta. Acorde con su edad y correlación representa una etapa del volcanismo cenozoico.

Figura 8

Unidades litológicas de la quebrada Frances



Fuente: Elaboración propia.

1.2.13.6 Formación Tres Lagunas (DsCm-tl). Se encuentra suprayaciendo al Complejo del Maraón y formación Contaya en discordancia angular e infrayaciendo al Grupo Ambo y al volcánico Lavasen en discordancia erosional, sus afloramientos más relevantes se localizan en los valles glaciares de Tres Lagunas, Laguna Llacuabamba y Laguna Blanca; sin embargo, localmente aflora principalmente al Sur de la U.P. Santa María, en las partes altas en los cerros San Lorenzo, Alto Pircas y Chepen. Su litología está compuesta de derrames lávicos de color gris verdosos, laminadas, afaníticas, se intercalan con lavas de estructura almohadillada, sus afloramientos son de manera discontinua, están configurando formas y estructuras de lavas en almohadillas y flujos de lavas afaníticas, la textura es esencialmente diabásica y ofítica, contiene piroxenos tipo augita que están alterados a clorita, se expone asimismo diópsido e hiperstena, en proporciones muy bajas contiene plagioclasas que se alteran a clorita, epidota, clorita y carbonato, los principales minerales accesorios son la clorita, epidota y carbonato, minerales opacos, cuarzo y arcillas.

En la quebrada Castilla de Llacuabamba presenta espesor promedio de 600 m.

Por su posición estratigráfica se le asigna edad Carbonífero Inferior del Paleozoico Superior.

1.2.13.7 Formación Macno (CaO-ma). Estas rocas metamórficas afloran en la zona de Pataz y Cedro, con dirección NE-SW; consiste en afloramientos discontinuos de esquistos y filitas verdosas, gneis, esquistos micáceos, metasedimentos y lentes de cuarzo blanco. Se le atribuye una edad del Ordovícico.

1.2.13.8 El complejo Marañón (NP-cm-esq,fil). El complejo Marañón es una continuación de los paraesquistos y paragneisses polideformados del Proterozoico Superior al Cambriano Inferior. Se estima un espesor de aproximadamente 1 000 m, de espesor de filitas grises con menores intercalaciones de esquistos micáceos y grafiticos, está caracterizada por un metamorfismo regional de esquistos verdes a anfibolitas de bajo grado, con cuatro estadios de deformación superimpuesta (Schreiber, 1989), los cuales probablemente ocurrieron durante el Cambriano Temprano a Medio.

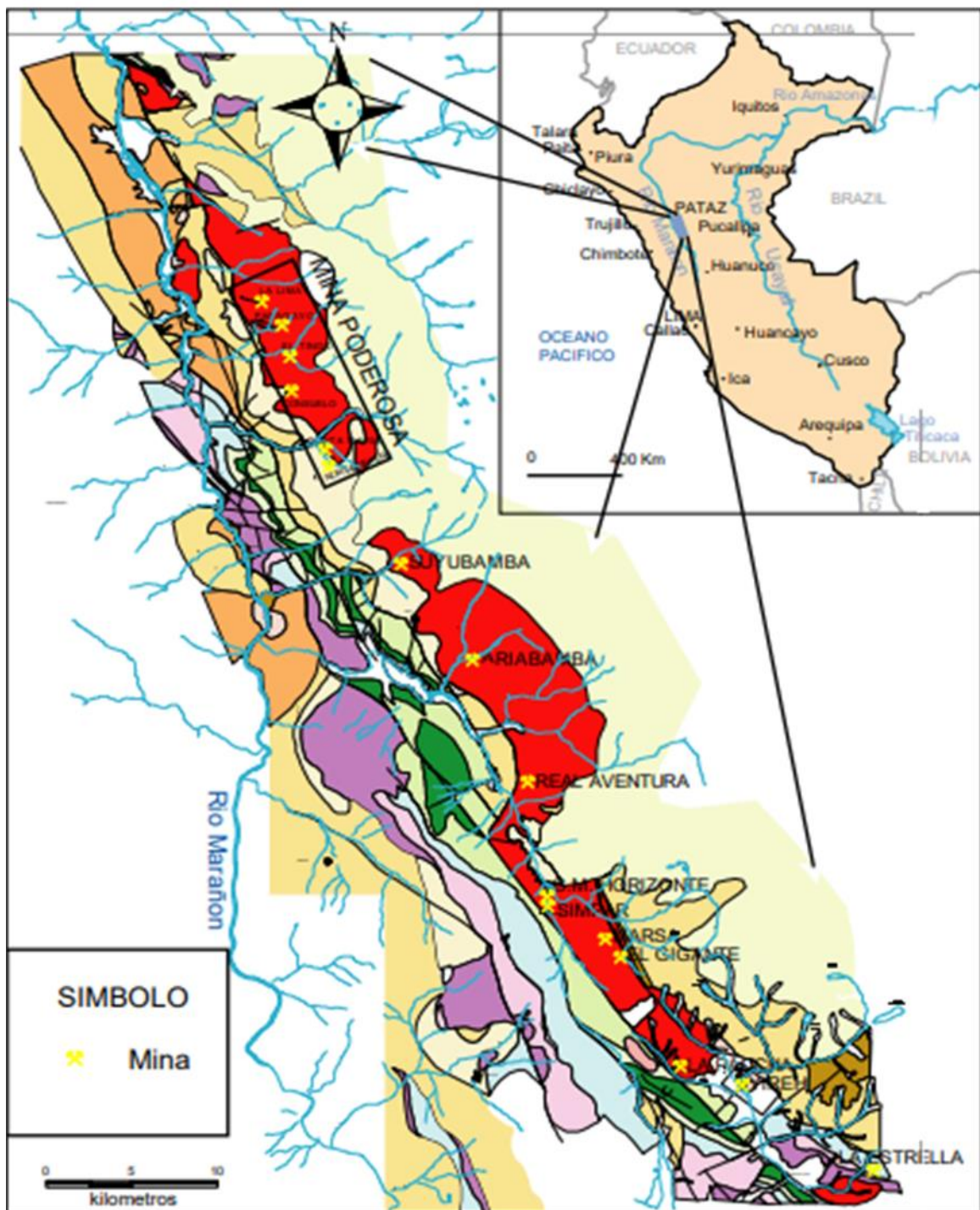
Localmente se exponen principalmente al Noreste del DR Hualanga y en las zonas de Estrella, Livias y Asnapampa; y están formadas por un complejo metamórfico donde se distinguen tres unidades, la unidad inferior consiste en mica esquistos, sobre la cual aflora una filita negra y localmente una meta-andesita verdosa. Las intercalaciones esquistosas dentro de la meta-andesita, sugieren que estratigráficamente ésta viene entre mica-esquisto y la filita.

Mapa Geológico local U.M. Santa María



Figura 10

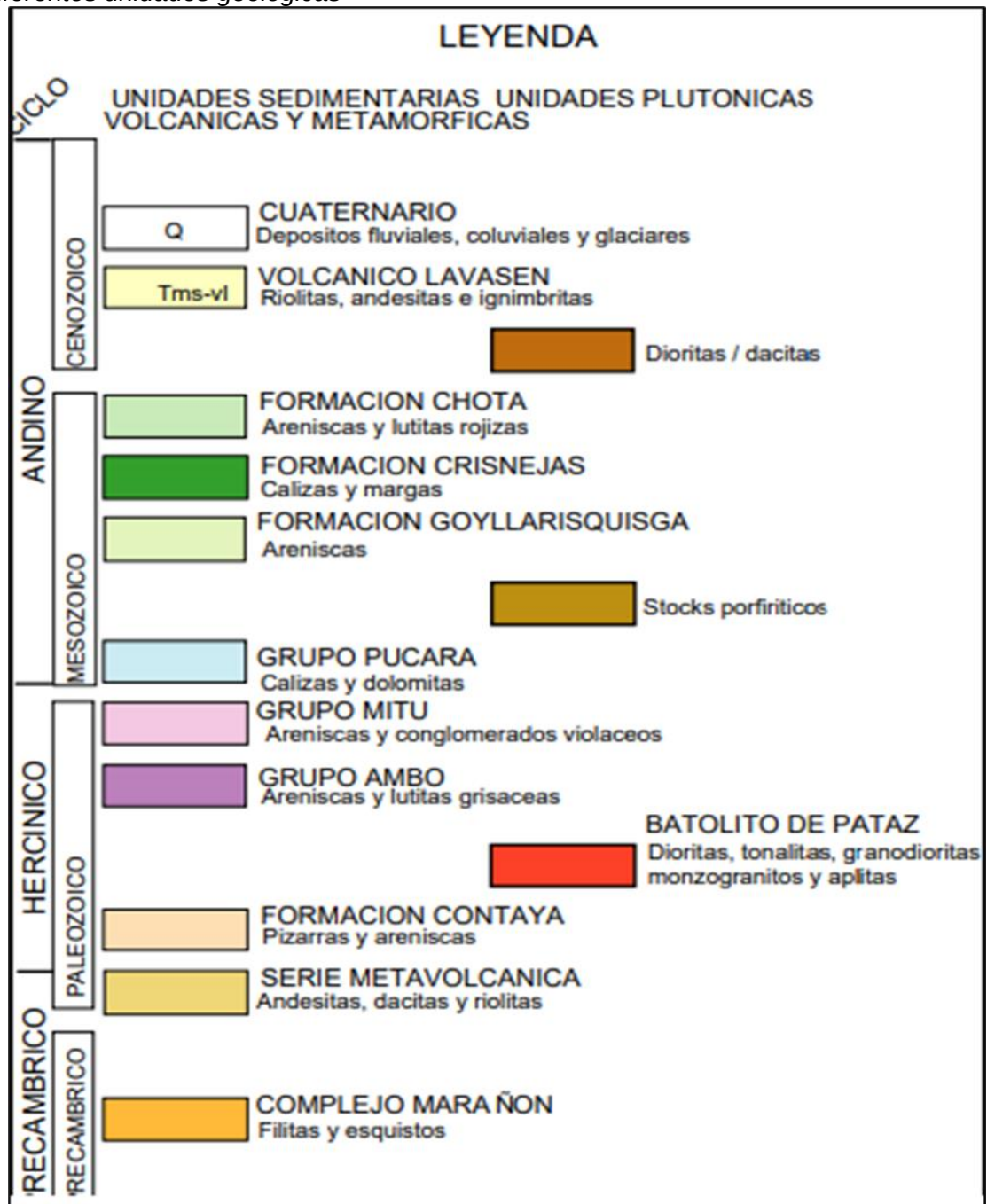
Mapa geológico de la región de Pataz, mostrando las principales unidades litológicas y asientos mineros



Fuente: Oré (2006).

Figura 11

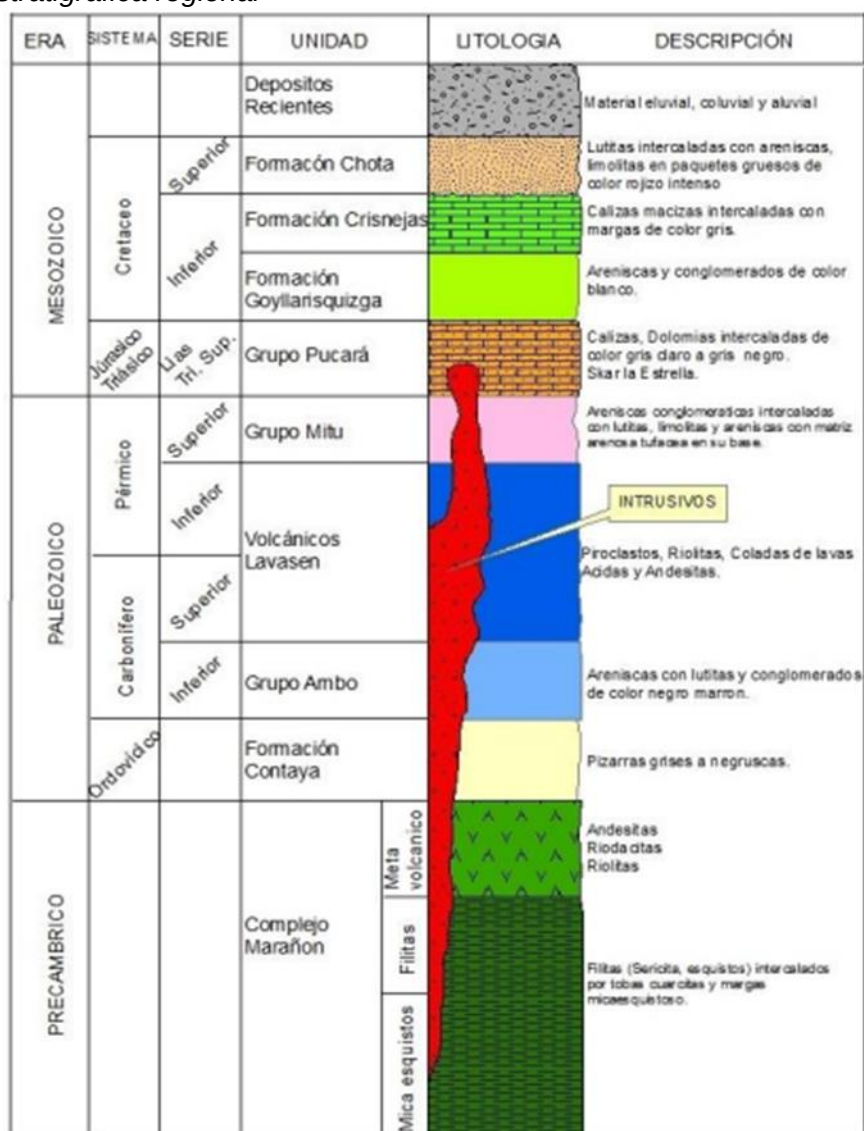
Diferentes unidades geológicas



Fuente: Oré (2006)

Figura 12

Columna estratigráfica regional



Fuente: Calderón (2017). Extraído de: <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5f8523e7-f60d-4117-8d23-b911ec1ee712/content>

1.2.14 Estructuras

La Unidad Minera Santa María de la Compañía Minera Poderosa, ubicada en el distrito de Pataz, provincia de La Libertad, presenta una compleja estructura geológica asociada al Batolito de Pataz, un cuerpo intrusivo de forma lenticular y alargada que se extiende por aproximadamente 80 km de largo y 6 km de ancho en sus zonas más amplias. Este batolito está compuesto principalmente por granodiorita, diorita y monzogranito, y se encuentra emplazado en la Cordillera Nororiental de los Andes peruanos. La mineralización aurífera en la zona se presenta en vetas de tipo tensional de bajo ángulo,

como la Veta Esperanza, que muestra una geometría irregular y una mineralogía compuesta por cuarzo, pirita, galena, esfalerita y oro (electrum). Estas vetas se encuentran entre dos vetas de alto ángulo (mayores a 45°) con rumbo N-S a NW-SE y buzamiento al E-W y S-W. La alteración predominante en las rocas de contacto con las vetas es la fílica, mientras que hacia los bordes externos se observa alteración propilítica. Esta configuración estructural es resultado de procesos tectónicos y magmáticos que han influido en la formación y distribución de los recursos minerales en la zona.

1.2.15 Sistemas de vetas

La Unidad Minera Santa María de la Compañía Minera Poderosa, ubicada en el distrito de Pataz (La Libertad), explora actualmente 16 vetas auríferas activas, que forman parte de un sistema mineralizado más amplio en la región. Estas vetas, de tipo filoniano, se presentan principalmente como vetas de cuarzo con sulfuros, asociadas al Batolito de Pataz, un cuerpo intrusivo de forma lenticular y alargada que se extiende aproximadamente 80 km de largo y 6 km de ancho en sus zonas más amplias .

Las vetas en Santa María suelen tener un rumbo N-NW y un buzamiento que varía entre 0° y 35°. La mineralización se encuentra en "ore shoots" o clavos mineralizados, con espesores que varían desde unos pocos centímetros hasta más de 6 metros, siendo las porciones más voluminosas y ricas en oro las más económicamente rentables (Coba, 2017).

En términos de composición mineralógica, las vetas muestran una secuencia paragenética que incluye cuarzo, pirita, galena, esfalerita, calcopirita y oro en forma de electrum (una aleación de oro y plata), con una ley promedio de 34.54 g Au/Tm, aunque se han reportado valores erráticos más altos en algunas zonas .

Este sistema de vetas se encuentra en una región geológicamente activa, asociada a fallamientos y plegamientos regionales, que han favorecido la formación de vetas de cuarzo y sulfuros con diseminación de oro, contribuyendo significativamente a la producción aurífera histórica del Batolito de Pataz .

1.2.16 Recurso energético

El recurso energético de la Unidad Santa María de la Compañía Minera Poderosa, ubicada en el distrito de Pataz, provincia y departamento de La Libertad, es un componente esencial para sus operaciones mineras. Esta unidad minera se encuentra a aproximadamente 320 km de la ciudad de Trujillo, a una altitud que varía entre los 1,250 y 3,000 metros sobre el nivel del mar .

Debido a su ubicación remota, Santa María enfrenta desafíos en el suministro eléctrico. Se conecta a una red de 60 kV operada por Hidrandina, la cual tiene limitaciones en la cantidad de energía disponible. Esto ha llevado a la minera a implementar soluciones innovadoras para garantizar un suministro energético confiable y sostenible

1.2.16.1 Estrategia energética y sostenibilidad. Con el objetivo de reducir sus emisiones de carbono y avanzar hacia una matriz energética más limpia, Minera Poderosa ha establecido metas ambiciosas. Para el año 2030, planea alcanzar una matriz eléctrica 100% renovable, eliminando las emisiones de carbono de alcance 1 y 2. En 2023, aproximadamente el 86% de su consumo eléctrico provino de fuentes renovables, y se espera que esta proporción aumente en los próximos años

1.2.16.2 Proyectos energéticos en curso. La compañía ha implementado varios proyectos para mejorar su autosuficiencia energética:

- **Sistema de Almacenamiento de Energía con Baterías (BESS):**

Instalado en octubre de 2023, este sistema utiliza baterías de litio para almacenar electricidad durante las horas de bajo consumo y liberarla durante las horas de alto consumo, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles y mejorando la eficiencia energética (Minerandina, 2024).

- **Energía Solar Fotovoltaica:**

Se ha instalado un sistema solar con baterías en el aeródromo Chagual de la unidad minera, operando de manera independiente las 24 horas del día. Además, se ha implementado un sistema piloto en un campamento, y se planea construir una central solar fotovoltaica de 7 MW en el próximo año.

- **Infraestructura de Transmisión:**

En mayo de 2024, se inauguró una línea de transmisión interna de 60 kV, mejorando el voltaje y reduciendo las pérdidas de energía, lo que disminuye el consumo de petróleo y optimiza la eficiencia operativa.

1.2.16.3 Desafíos y seguridad energética. La infraestructura energética de la minera ha sido objeto de ataques, con al menos 15 torres de alta tensión destruidas en los últimos cuatro años, principalmente por grupos vinculados a la minería ilegal. Estos incidentes han interrumpido temporalmente el suministro eléctrico, pero los planes de contingencia han permitido restablecer la energía rápidamente

1.2.17 Producción y leyes de cabeza

La Compañía, ha experimentado un crecimiento significativo en su producción de oro. En 1997, la empresa tenía como objetivo producir 240,000 onzas anuales, partiendo de una producción de 60,000 onzas. Actualmente, la producción anual bordea las 300,000 onzas.

La planta de beneficio Santa María, que cumple 25 años de operación, ha incrementado su capacidad de procesamiento de 600 a 800 toneladas por día, con planes de alcanzar 1,000 toneladas diarias en el futuro . Además, la empresa ha invertido más de US\$ 250 millones hasta 2029 en el desarrollo de la planta y en trabajos de exploración en el batolito aurífero de Pataz (Ecomin, 2022)

En cuanto a la ley de cabeza, la empresa ha logrado mantener una ley promedio de 6 gramos por tonelada, lo que es considerado un buen rendimiento para operaciones subterráneas de oro en la región .

1.2.18 Costo de minado y BECOOF

Según un estudio de tesis de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, la Compañía Minera Poderosa, en su Unidad Santa María, implementó el método Long Wall Mining en la explotación de la veta San Vicente. Este cambio permitió reducir el costo de minado de \$22.30 por tonelada métrica (TM) con el método Open Stope a \$15.85

por TM con Long Wall Mining. Además, la productividad aumentó de 791.82 TM/mes a 1,187.72 TM/mes, y la eficiencia minera mejoró de 4.4 TM/tarea a 6.6 TM/tarea. La dilución también disminuyó del 22.84% al 16.84% gracias a la implementación del nuevo método (Ccarita, 2016).

En cuanto al BECOOF (Break Even Cash Operating Ore Feed), no se encontraron datos específicos en las fuentes disponibles. Este indicador es crucial para determinar el punto de equilibrio operativo, es decir, el nivel de producción necesario para cubrir los costos operativos sin generar pérdidas.

1.2.19 Recursos y reservas

La Compañía Minera, ha experimentado un crecimiento significativo en sus recursos y reservas minerales. Al cierre del cuarto trimestre de 2023, los recursos de mineral aumentaron a 1.6 millones de toneladas métricas, lo que representa un incremento del 9.3% en comparación con el mismo periodo del año anterior. Este aumento se atribuye a intensas actividades de perforación diamantina y avances en los trabajos en la unidad productiva Maraño y el yacimiento Santa María

En términos de reservas, la empresa proyecta alcanzar 1 millón de onzas de oro en reservas dentro de los próximos cuatro años. Para 2027, se estima que la producción anual de oro será de aproximadamente 292 mil onzas, respaldada por un plan de exploración que abarca las unidades Santa María, Maraño, Palca y Montañitas .

Estas cifras reflejan el compromiso de Minera Poderosa con la expansión y sostenibilidad de sus operaciones en la región del Batolito de Pataz, un área reconocida por su rica mineralización aurífera

1.2.20 Método de explotación

Se emplea principalmente métodos de explotación subterránea debido a la naturaleza de sus vetas de oro de alta ley. Uno de los métodos más utilizados es el “Overhand Cut and Fill” (corte y relleno ascendente), especialmente en zonas de vetas angostas, lo que permite mantener la estabilidad del macizo rocoso y recuperar altas leyes con mínima dilución.

Además, para mejorar la eficiencia y reducir costos, en la UP Santa María, se ha implementado el método Long Wall Mining, el cual ha demostrado ser más productivo y económico, reduciendo costos de minado de \$22.30 a \$15.85 por tonelada, y mejorando significativamente la productividad y la eficiencia del personal.

Estos métodos se adaptan a las características geológicas del batolito de Pataz, permitiendo a Poderosa optimizar la recuperación del mineral en sus operaciones subterráneas.

1.2.21 Ciclo de minado

El ciclo de minado en la Unidad Santa María de la Compañía Minera Poderosa, ubicada en el distrito de Pataz, región La Libertad, se desarrolla mediante un proceso subterráneo que abarca desde la extracción del mineral hasta su procesamiento en la planta de beneficio. La relación mineral-desmante es de 1:1, es decir, por cada tonelada de mineral extraído, se remueve una tonelada de material estéril, el cual se utiliza en la planta de relleno hidráulico como material de relleno .

El sostenimiento de las labores mineras se realiza con pernos de anclaje, malla electrosoldada, cuadros de madera, cimbras de acero y concreto lanzado, dependiendo de las características geomecánicas del macizo rocoso . La maquinaria utilizada es de menor tamaño en comparación con la minería a cielo abierto, adaptándose a las limitaciones de las galerías y otras labores subterráneas.

Una vez extraído, el mineral es transportado a la Planta de Beneficio Santa María I, que tiene una capacidad operativa de 1,000 toneladas métricas diarias (TMD), según lo aprobado en la modificación del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) . En la planta, el oro se recupera mediante el proceso de lixiviación con cianuro o cianuración directa, alcanzando recuperaciones superiores al 92%. El oro disuelto se precipita a través del proceso Merrill-Crowe y se funde para obtener barras de doré, que luego son exportadas a refinerías internacionales para su procesamiento.

Este ciclo de minado subterráneo permite a Minera Poderosa mantener una producción eficiente y sostenible de oro en la región del Batolito de Pataz.

1.2.22 Geomecánica

La Compañía Minera Poderosa, en su Unidad Santa María ubicada en el distrito de Pataz (La Libertad), implementa un enfoque geomecánico integral para garantizar la estabilidad y seguridad de sus operaciones subterráneas. Este enfoque se basa en la caracterización detallada del macizo rocoso, utilizando parámetros como RQD, RMR, GSI y Q de Barton, obteniendo clasificaciones de roca de calidad regular tipo III-A. Con esta información, se determina el tipo de sostenimiento adecuado, que incluye pernos sistemáticos espaciados a 1.0 m, malla electrosoldada y shotcrete con un espesor de 80 mm, para prevenir el deslizamiento de cuñas y el desprendimiento de roca debido a vibraciones por voladuras y otros factores. Además, se ha desarrollado un sistema de mapeo geomecánico basado en sismicidad inducida, utilizando software como Wavevis y Seismic Analyzer, para monitorear y actualizar planos de labores, optimizando el uso de sostenimientos y mejorando la seguridad en las operaciones (Castillo, 2022).

1.2.23 Equipos

La Unidad Santa María de la Compañía Minera Poderosa, ubicada en el distrito de Pataz, La Libertad, emplea una variedad de equipos especializados para sus operaciones subterráneas y de procesamiento de mineral. Entre los equipos utilizados en la mina se encuentran:

- Locomotoras
- Palas neumáticas
- Scooptrams
- Dumpers
- Jumbos
- Scalers
- Bolters

Estos equipos son fundamentales para las actividades de avance y explotación en la mina, contribuyendo a la eficiencia y seguridad de las operaciones.

En la planta de beneficio Santa María I, que procesa el mineral extraído, se han implementado mejoras tecnológicas para optimizar el procesamiento. Por ejemplo, se ha instalado una chancadora HPGR (High Pressure Grinding Rolls) para la etapa de chancado terciario, lo que permite trabajar con minerales de alta humedad sin necesidad de secado previo.

Además, en el ámbito de la seguridad y eficiencia operativa, se ha implementado un sistema de tolvas metálicas para la descarga de material, lo que ha permitido reducir riesgos, costos y mejorar la vida útil de los equipos. Este sistema ha sido reconocido como una de las mejores prácticas en seguridad minera.

Estos esfuerzos reflejan el compromiso de Minera Poderosa con la innovación y la mejora continua en sus operaciones.

1.2.24 Infraestructura

La Unidad Santa María de la Compañía Minera Poderosa, ubicada en el distrito de Pataz, provincia de La Libertad, cuenta con una infraestructura integral que sustenta sus operaciones mineras y su compromiso con el desarrollo regional.

Planta de beneficio Santa María I

Esta planta procesa el mineral extraído mediante un proceso de lixiviación con cianuro, alcanzando una capacidad operativa de 1,000 toneladas métricas diarias (TMD). La ampliación de la planta, iniciada en diciembre de 2018, implicó una inversión de aproximadamente 243 millones de dólares, destinados a la construcción, operación, mantenimiento y cierre de mina. La planta pasó de procesar 600 a 800 TMD en una primera etapa, con planes de alcanzar las 1,000 TMD en el futuro.

Aeródromo de Chagual

Ubicado al norte de Chagual, en el distrito de Pataz, este aeropuerto privado fue construido por Minera Poderosa en 1982 e inaugurado en 1983. Ofrece servicios de transporte aéreo de pasajeros y carga, facilitando la conexión con ciudades como Lima y Trujillo a través de aerolíneas como Atsa Airlines y Aeroprop.

Infraestructura eléctrica

La unidad minera depende de la línea de transmisión LT 6050 de 60 kV para su suministro eléctrico. Sin embargo, en mayo de 2024, esta infraestructura fue objeto de un atentado que afectó las operaciones de la mina, incluyendo las de Santa María y Marañón .

Proyectos sociales y de Infraestructura

Minera Poderosa ha financiado proyectos de infraestructura en la región, como la ampliación de los servicios de agua potable y alcantarillado en cinco anexos de la Comunidad Campesina La Victoria, en el distrito de Tayabamba. Este proyecto, ejecutado mediante el mecanismo de Obras por Impuestos, beneficia directamente a 687 familias y tiene una inversión aproximada de S/ 19.6 millones

Esta infraestructura integral refleja el compromiso de Minera Poderosa con la eficiencia operativa y el desarrollo sostenible en la región.

1.2.25 Servicios auxiliares

La Compañía Minera Poderosa, proporciona una variedad de servicios auxiliares esenciales para el buen funcionamiento de sus operaciones mineras. Entre los principales servicios y estructuras auxiliares se incluyen:

- **Servicios de transporte y logística:**

Minera Poderosa cuenta con una infraestructura de transporte eficiente que incluye el uso de aeronaves para el traslado de personal y suministros, principalmente a través del Aeródromo de Chagual, ubicado cerca de la mina. Este aeródromo facilita la conexión con ciudades como Lima y Trujillo, mejorando la logística y reduciendo los tiempos de traslado de personal y material crítico.

- **Servicios eléctricos:**

La unidad minera depende de una línea de transmisión de 60 kV (LT 6050) para el suministro de energía eléctrica. Esta infraestructura es esencial para las operaciones de extracción y procesamiento, aunque en ocasiones se ha visto afectada por incidentes como atentados que interrumpen el servicio eléctrico.

- **Agua potable y saneamiento:**

Como parte de su compromiso con la comunidad local, la compañía ha financiado proyectos de agua potable y alcantarillado en las comunidades cercanas. A través del mecanismo de Obras por Impuestos, ha invertido en la ampliación de estos servicios en el distrito de Tayabamba, beneficiando a miles de familias.

- **Salud y seguridad:**

La compañía ofrece servicios médicos y de seguridad tanto a su personal como a la comunidad. Existen centros médicos en el área de operaciones que proporcionan atención primaria de salud y gestionan situaciones de emergencia. Además, se implementan sistemas avanzados de geomecánica y monitoreo sísmológico para garantizar la seguridad en las labores subterráneas.

- **Infraestructura para el personal:**

Minera Poderosa también ofrece servicios de alojamiento, alimentación y transporte para sus trabajadores, asegurando condiciones de vida adecuadas durante las operaciones. Las instalaciones están diseñadas para maximizar la eficiencia y la seguridad de los empleados.

Estos servicios auxiliares son fundamentales para el éxito de las operaciones de la unidad Santa María, permitiendo un funcionamiento continuo, seguro y eficiente.

1.2.26 Planta metalúrgica

La Planta de Beneficio Santa María I de la Compañía Minera Poderosa, ubicada en el distrito de Pataz, provincia de La Libertad, es una instalación clave en el procesamiento de mineral aurífero proveniente del Batolito de Pataz. Esta planta ha experimentado una serie de ampliaciones significativas para aumentar su capacidad de tratamiento y mejorar la eficiencia en la recuperación de oro.

Capacidad de procesamiento

Inicialmente, la planta tenía una capacidad de procesamiento de 600 toneladas por día (TPD). Sin embargo, en 2019 se inició un proyecto de ampliación con una inversión aproximada de 243 millones de dólares, que incluyó la construcción de nuevos equipos y

la optimización de los existentes. Como resultado, la capacidad de procesamiento aumentó a 800 TPD . Posteriormente, en 2022, la planta alcanzó una capacidad de 1,000 TPD, consolidándose como una de las principales instalaciones de procesamiento de oro en la región

Proceso metalúrgico

El proceso de beneficio en la planta se basa en la lixiviación con cianuro, un método ampliamente utilizado en la minería aurífera para extraer el oro del mineral. Este proceso implica la disolución del oro en una solución de cianuro, seguida de la recuperación del metal precioso mediante técnicas como el proceso Merrill-Crowe .

Infraestructura y componentes

La planta cuenta con una serie de componentes esenciales para su operación, incluyendo:

- Tanques de lixiviación: donde se lleva a cabo la disolución del oro.
- Agitadores: para asegurar una mezcla homogénea de la pulpa de mineral y la solución de cianuro.
- Espesadores: utilizados para concentrar la pulpa y separar el agua del material sólido.
- Filtros y bombas: para el manejo eficiente de líquidos y sólidos durante el proceso.
- Sistema de recuperación de oro: que incluye el proceso Merrill-Crowe para precipitar y refinar el oro disuelto.

Compromiso con la sostenibilidad

La Compañía Minera Poderosa ha demostrado un compromiso con la sostenibilidad y el desarrollo local mediante la implementación de proyectos de infraestructura y servicios en las comunidades cercanas. Esto incluye la financiación de obras de agua potable y saneamiento a través del mecanismo de Obras por Impuestos, beneficiando a miles de familias en el distrito de Tayabamba.

En resumen, la Planta de Beneficio Santa María I es una instalación moderna y eficiente que juega un papel crucial en la producción de oro de la Compañía Minera Poderosa, contribuyendo significativamente a la economía local y regional.

1.3 Planteamiento de la realidad problemática

La minería desempeña un papel ambiguo para la sociedad. Se ha vuelto indispensable para el modelo de crecimiento económico que se persigue actualmente en las sociedades industrializadas basadas en los minerales. Luckeneder et al. (2021), agregan que es una de las actividades humanas más peligrosas desde el punto de vista ambiental y social. Sus consecuencias nocivas para el medio ambiente y su asociación catalizadora con los conflictos sociales han sido analizadas en diversos estudios.

En este contexto es sustancial señalar que acorde a lo anotado por Igogo et al. (2021) la minería es una de las industrias con mayor consumo de energía en todo el mundo, así mismo, las actividades mineras ejercen presión sobre todos los ecosistemas, pero que se pueden identificar ciertas características superficiales que se consideran señal de vulnerabilidad particular relacionados como los biomas terrestres, áreas protegidas y escasez de agua, recurso que ha generado diversos conflictos sociales.

En este sentido, en los últimos 15 años se ha avanzado en la promoción de la sostenibilidad en el sector minero. Sin embargo, los conflictos entre mineros y comunidades siguen aumentando. Si bien las causas de los conflictos suelen ser complejas y están interrelacionadas, el agua es un desencadenante frecuente de tensiones entre mineros y comunidades. Los recursos minerales suelen encontrarse en zonas de escasez de agua y en regiones susceptibles al cambio climático . Además, la minería requiere volúmenes sustanciales de agua para sus operaciones (Fraser, 2021).

Esta afectación al medio ambiente y los recursos indispensables para la población han sido objeto de estudio, por ese motivo se ha encontrado que desde principios del siglo XXI, la escasez de energía, la contaminación del aire y el cambio climático, junto con el desarrollo económico sostenido y rápido y el progreso social, han otorgado mayor importancia a las fuentes de energía eficientes con bajo impacto ambiental (Zang & Zhen,

2018). En la actualidad según Ponomarenko et al. (2021), el paradigma del desarrollo sostenible (DS) ha sido comprendido por la mayoría de los países desarrollados y en desarrollo. Sin embargo, aún se discute qué tipo de contribución hacen los recursos no renovables al DS de los países cuyas economías dependen en gran medida de su disponibilidad, calidad y demanda del mercado, y se desarrollan con base en el uso eficiente y racional de los recursos minerales.

En el caso de nuestro continente, si bien en los últimos años algunos proveedores de América Latina han hecho contribuciones importantes a la innovación en la industria minera, la mayoría no ha podido hacerlo. En estudios previos se han identificado varias barreras: desde la falta de espacios de prueba para prototipos hasta cuestiones más amplias, como actitudes empresariales conservadoras, gobernanza jerárquica de la cadena de valor y canales de comunicación limitados entre las empresas mineras y los proveedores (Calzada, 2022). Así mismo, estas innovaciones deben orientarse al uso racional del agua y según la opinión de Bazaluk et al. (2022) el empleo de fuentes de energía no tradicionales y renovables, es extremadamente importante en la actualidad.

En este orden de ideas debido a la energía y recursos hídrico que demanda la actividad minera, es necesario optimizar los sistemas de agua y entre las tecnologías de almacenamiento de energía, el almacenamiento de energía por aire comprimido (CAES) se destaca como una de las más adecuadas para grandes volúmenes, junto con el PHES. CAES es una tecnología madura que almacena energía eléctrica como aire a alta presión y luego genera electricidad mediante la expansión de ese aire cuando es necesario. Ofrece ventajas como alta confiabilidad, bajos costos de almacenamiento, diseño flexible y un impacto ambiental mínimo. La integración de CAES con energía renovable se considera una de las soluciones más prometedoras para enfrentar los desafíos de la energía renovable .

Por su parte Reza et al. (2021), subrayan que el almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES), debido a su baja limitación geográfica, alta confiabilidad e impacto ambiental insignificante, ha atraído la atención en los últimos años, hibridándose

con diferentes tipos de energías renovables. De igual manera se resalta la importancia de emplear óptimamente el agua, surgiendo el estudio actual con la interrogante siguiente:

1.3.1 Problema general

¿Cómo influye la propuesta de mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua en el incremento de la producción en las minas subterráneas auríferas?

1.3.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es la situación actual y necesidades de producción de una mina subterránea aurífera?
- ¿Qué deficiencias técnicas y operativas afectan el rendimiento del sistema actual de aire comprimido de una mina subterránea aurífera?
- ¿Qué mejoras técnicas pueden implementarse en el sistema de agua para optimizar el proceso de producción?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Proponer el mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua para incrementar la producción en una mina subterránea aurífera.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar el nivel de producción en una mina subterránea aurífera, estimando el incremento potencial en la producción minera asociado a la implementación de las mejoras en los sistemas de aire comprimido y agua.
- Diseñar una propuesta técnica para la incorporación de compresoras que optimicen el suministro de aire, adaptados a las condiciones operativas y geográficas de la mina.
- Diseñar una propuesta técnica para mejora de los sistemas hidráulicos que optimicen el suministro de agua, adaptados a las condiciones operativas y geográficas de la mina.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

El mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua influirá positivamente en el incremento de la producción en la mina subterránea aurífera.

1.5.2 Hipótesis específica

- La mejora simultánea en los sistemas de aire comprimido y agua, al asegurar un suministro confiable y eficiente, incrementará la disponibilidad operativa de los equipos y reducirá tiempos muertos, resultando en un aumento del nivel de producción minera durante el año 2025.
- La incorporación de una compresora adicional en la Zona Alta de la Unidad Santa María reducirá el déficit de aire comprimido, lo que permitirá aumentar la disponibilidad operativa de los equipos neumáticos de perforación y, en consecuencia, incrementará el avance mensual en labores mineras durante el periodo 2025.
- La optimización del sistema de suministro y distribución de agua en la mina subterránea permitirá una mejora en la gestión de polvo y el enfriamiento de equipos, reduciendo paradas no programadas y aumentando la seguridad operacional, lo que se traducirá en un incremento en la producción minera durante 2025.

1.6 Variables

1.6.1 Variable dependiente

Producción en mina subterránea aurífera

1.6.2 Variables independientes

- Sistema de aire comprimido
- Sistema de agua

1.7 Indicadores

1.7.1 Indicador de la variable dependiente

Incremento de la producción en la mina subterránea aurífera

Indicadores:

- Toneladas métricas procesadas por día (TMD)
- Onzas de oro recuperadas por mes (oz/mes)
- Metros de avance por frente de trabajo (m/mes)
- Número de ciclos de perforación-explosión-ventilación realizados (ciclos/día)
- Índice de productividad por turno o por trabajador (TMD/trabajador)

1.7.2 Indicadores de las variables independientes**Sistema de aire comprimido****Indicadores:**

- Presión promedio del sistema de aire comprimido (psi o bar)
- Caudal de aire comprimido disponible en puntos de trabajo (m³/min)
- Horas de disponibilidad del sistema (horas/día)
- Número de paradas por fallas en el sistema de aire (eventos/mes)
- Consumo energético del sistema de compresores (kWh/mes)
- Eficiencia del sistema de compresión (% de aprovechamiento del aire generado)

Sistema de agua**Indicadores:**

- Caudal de agua disponible en los frentes de trabajo (L/min o m³/h)
- Presión del agua en los puntos de uso (bar o psi)
- Tiempo promedio de corte de agua por fallas (horas/mes)
- Número de interrupciones en el suministro (eventos/mes)
- Porcentaje de disponibilidad del sistema de agua (%)
- Eficiencia del sistema de bombeo o distribución de agua (%)

1.8 Antecedentes referenciales

La minería en Perú es un pilar fundamental de la economía, representando una importante fuente de ingresos y empleo. En particular, las operaciones mineras en zonas como Pataz, que se caracterizan por su difícil acceso y características geológicas

complejas, requieren de un uso eficiente de los recursos y sistemas de apoyo, como el aire comprimido y el agua, para garantizar la eficiencia de los procesos productivos.

1.8.1 Antecedentes internacionales

Antecedente internacional 1

A nivel internacional, la eficiencia en los sistemas de aire comprimido y agua en minería también ha sido objeto de múltiples investigaciones. Según un informe publicado en el International Journal of Mining and Mineral Processing (Smith et al., 2021), el aire comprimido juega un papel crucial en el transporte de minerales, la operación de equipos de perforación y en los sistemas de ventilación, siendo uno de los recursos más utilizados en la minería subterránea.

Antecedente internacional 2

Por otro lado, el manejo eficiente del agua en la minería también ha sido ampliamente estudiado. Un artículo de Journal of Sustainable Mining (Jones & Clark, 2018) aborda la importancia de la gestión del agua en la flotación y el lavado de minerales. El estudio destaca que, en operaciones mineras a gran escala, el agua es fundamental en los procesos de separación de metales.

Antecedente internacional 3

Así mismo, en China, Tong et al. (2021), describe que el almacenamiento de energía de aire comprimido (CAES), que almacena energía en aire a alta presión, se presenta como una solución para gestionar el suministro inestable de energía renovable a gran escala. Este estudio examina los desarrollos recientes de CAES en China, incluyendo su viabilidad, opciones de almacenamiento y proyectos piloto. Se analiza su aplicación en regulación de la red, generación de energía y gestión de la demanda. Un análisis de costo-beneficio sugiere que promover el comercio de electricidad y la integración de CAES con energía renovable en las regiones del "Tres del Norte" generaría importantes beneficios económicos y ambientales.

Antecedente internacional 4

Además en un informe publicado en el International Journal of Mining and Mineral Processing (Smith et al., 2021), el aire comprimido juega un papel crucial en el transporte de minerales, la operación de equipos de perforación y en los sistemas de ventilación, siendo uno de los recursos más utilizados en la minería subterránea.

Antecedente internacional 5

Por otro lado, el manejo eficiente del agua en la minería también ha sido ampliamente estudiado. Un artículo de Journal of Sustainable Mining (Jones & Clark, 2018) aborda la importancia de la gestión del agua en la flotación y el lavado de minerales. El estudio destaca que, en operaciones mineras a gran escala, el agua es fundamental en los procesos de separación de metales.

1.8.2 Antecedentes nacionales

Antecedente nacionales 1

Estudios recientes sobre la eficiencia de los sistemas de aire comprimido en minería han revelado que una mala gestión de estos recursos puede generar sobrecostos y retrasos significativos. Por ejemplo, un estudio realizado por Pérez et al. (2020) analizó el impacto de los sistemas de aire comprimido en la minería de la sierra central del Perú, encontrando que el mal diseño y mantenimiento de estos sistemas podían generar paradas inesperadas, lo cual afectaba la capacidad operativa de los equipos y, en consecuencia, la productividad.

Antecedente nacionales 2

Igualmente, en Lima Huiman (2022), investigó cómo la implementación de la herramienta TPM (Mantenimiento Productivo Total) podría mejorar el sistema de suministro de aire comprimido, que presentaba baja productividad. Con un enfoque cuantitativo, diseño preexperimental y alcance longitudinal, se recogieron datos mediante observación y validación por expertos, utilizando IBM SPSS Statistics 23 para el análisis. Los resultados mostraron un aumento del 20,75% en la productividad, con una significancia de 0.010, lo que permitió rechazar la hipótesis nula y aceptar la hipótesis alterna. Se concluyó que el

TPM mejoró la eficiencia y eficacia del sistema de aire comprimido, recomendándose mantener y seguir aplicando esta mejora para continuar obteniendo buenos resultados.

Antecedente nacionales 3

Por su parte Roque y Torres (2021) en Chiclayo elaboraron un estudio donde se propusieron mejorar el sistema de aire comprimido para optimizar la perforación en la cantera Caballo Viejo, Jauja, Junín, en 2020, debido a tiempos de perforación de 40 minutos en doble turno, lo que generaba alto consumo de combustible y pérdidas de tiempo. Se realizó un estudio de tipo básico y diseño no experimental, con enfoque descriptivo. A través de análisis documental y observación, se identificaron la caída de presión y el tiempo de perforación como variables clave. Como resultado, se logró calcular que la compresión de aire era de 2 minutos, permitiendo una entrega óptima con un costo total de US\$ 6670.375. Se propuso implementar un sistema de aire comprimido con un compresor de 86 kW a un costo de 0.25 US\$/kWh.

Antecedente nacionales 4

En cuanto al agua, un estudio de López et al. (2019) sobre la eficiencia hidráulica en operaciones mineras en la zona norte del Perú evidenció que los sistemas hidráulicos ineficientes pueden generar pérdidas en los procesos de flotación y separación de minerales. De acuerdo con su investigación, un adecuado control y mantenimiento de los sistemas de agua mejora la recuperación de metales, incrementando la producción y reduciendo costos operativos.

1.8.3 Antecedentes locales

Antecedente local 1

En la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), diversos estudios se han enfocado en la optimización de sistemas industriales, incluidos los sistemas de aire comprimido y agua. Un estudio relevante es el de Gutiérrez (2020), quien investigó la eficiencia de los sistemas de aire comprimido en una mina ubicada en la zona central del Perú. En su análisis, Gutiérrez demostró que la falta de mantenimiento adecuado en los compresores de aire el incorrecto dimensionamiento de estos sistemas generaba paradas imprevistas

en los procesos productivos, afectando directamente la capacidad de la mina para operar a su máxima eficiencia.

Antecedente local 2

Además, un trabajo de investigación realizado por la Facultad de Ingeniería de Minas de la UNI, dirigido por López et al. (2021), analizó la gestión de sistemas hidráulicos en operaciones mineras subterráneas, destacando que la presión constante en los sistemas de agua es crucial para el buen desempeño de los procesos de flotación y separación de minerales.

Antecedente local 3

Así mismo, en Trujillo, López y Terrones (2020), elaboraron un estudio donde diseñaron un sistema de aire comprimido para eliminar las fugas intermitentes durante el proceso de carbonatación en Arca Continental Lindley–Trujillo. Tras analizar las fugas actuales, se identificó que el compresor estaba sobrecargado, perdiendo 158.4 kg/h de aire, lo que generaba una pérdida anual de 52,911.73 soles. Aunque las fugas en otros procesos eran menores, se propuso un sistema de aire comprimido independiente para carbonatación, con un control automático para evitar fugas y optimizar el proceso. El costo de implementación fue de 128,619.08 soles, con un retorno de inversión en 7 meses.

1.9 Metodología de la investigación

1.9.1 Según el enfoque

El estudio se llevó a cabo bajo el enfoque cuantitativo propuesto por Arispe et al. (2020), el cual se basa en la evaluación y cuantificación, herramientas clave para identificar tendencias, generar nuevas hipótesis y desarrollar teorías mediante el proceso de medición. Igualmente, Hernández et al (2018), las orientaciones cuantitativas manejan la recogida de datos para verificar hipótesis, instituir estándares de conductas y experimentar teorías fundadas en medidas numéricas y exámenes estadísticos.

1.9.2 Según su naturaleza

El tipo de indagación es aplicada, tal como sostiene Arispe et al. (2020), este tipo de investigación se centra en aplicar el conocimiento científico para descubrir herramientas

(como métodos, técnicas y protocolos) que puedan abordar una necesidad concreta y práctica. Así, su propósito es desarrollar propuestas metodológicas que contribuyan a optimizar la producción en la empresa seleccionada.

1.9.3 Según el alcance

Explicativo propositivo.

Conjuntamente considerando que el nivel de indagación es de tipología explicativa propositiva, como señala Vera et al. (2018), este tipo de investigación propone una solución técnica concreta: el mejoramiento del sistema de aire y agua, midiendo su impacto en la producción. Así mismo, el presente estudio se sitúa en el nivel explicativo, ya que busca esclarecer los eventos mediante un análisis de relaciones causales, indagando las razones subyacentes que originan los fenómenos y cómo interactúan estas variables.

1.9.4 Según el diseño de la investigación

En el estudio actual para contrastar la hipótesis empleó el diseño descriptivo propositivo (Cabezas, 2018).

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1. Marco teórico

2.1.1 Sistema de aire comprimido y agua en la minería

Sistema de aire comprimido en la minería

El aire comprimido es una fuente de energía ampliamente utilizada en la minería, especialmente en procesos como la perforación, transporte de materiales, ventilación y el funcionamiento de maquinaria pesada. Según un estudio realizado por Smith et al. (2021), el uso eficiente de los sistemas de aire comprimido es crucial para asegurar que las operaciones mineras sean rentables y productivas. Los sistemas de aire comprimido en la minería incluyen compresores, secadores y redes de distribución que deben ser optimizados para asegurar una presión constante y evitar caídas de rendimiento.

Un informe de Jones y Clark (2020) en el que se analizó el impacto de los sistemas de aire comprimido en las minas subterráneas de Sudáfrica, evidenció que los fallos en la capacidad de estos sistemas pueden generar paradas no programadas y afectar directamente la productividad. Este estudio resalta la necesidad de implementar tecnologías avanzadas de monitoreo y mantenimiento preventivo para evitar estos problemas.

Sistema de agua en minería

El agua es un recurso crítico en las operaciones mineras, utilizado en una amplia variedad de procesos, tales como la flotación de minerales, el lavado de estos y la generación de polvo. Sin embargo, en muchas regiones, el agua también es un recurso escaso, lo que hace que su gestión adecuada sea aún más crucial. Según un estudio reciente de Gutiérrez et al. (2021), la gestión eficiente del agua en la minería no solo es fundamental para maximizar la recuperación de metales y reducir los costos operativos, sino que también juega un papel clave en el concepto de desarrollo sostenible, asegurando que este recurso se utilice de manera responsable y se conserve para las generaciones futuras.

En este contexto, la eficiencia de los sistemas hidráulicos en minería no debe enfocarse únicamente en la reducción de costos, sino en cómo optimizar su uso dentro de un marco de sostenibilidad. Según López y Pérez (2019), la eficiencia de estos sistemas depende no solo de la cantidad de agua disponible, sino también de la presión y la distribución en la planta. Las variaciones en la presión y el flujo de agua pueden reducir la eficiencia de los procesos de flotación y otros métodos de separación, lo que impacta negativamente en la productividad y rentabilidad de la operación minera. Sin embargo, el desafío no es solo mejorar estos procesos, sino también garantizar que las prácticas de gestión del agua no agoten los recursos hídricos locales ni afecten el ecosistema circundante, contribuyendo así a un equilibrio entre la producción minera y la preservación ambiental.

Optimización de los sistemas de aire comprimido y agua

La optimización de los sistemas de aire comprimido y agua se ha convertido en un área clave de investigación para aumentar la eficiencia operativa en la minería. García et al. (2020) realizaron un análisis exhaustivo sobre cómo las estrategias de mantenimiento y el diseño adecuado de los sistemas hidráulicos y de aire pueden mejorar los índices de producción en las plantas mineras. El estudio mostró que el mantenimiento preventivo y la implementación de tecnologías de monitoreo en tiempo real permiten reducir fallos y mejorar la eficiencia de estos sistemas.

En este sentido, Martínez et al. (2022) destacaron que, mediante la mejora en la gestión de estos sistemas, se puede lograr un uso más eficiente de los recursos, lo que resulta en un incremento en la capacidad de procesamiento y una reducción significativa de los costos operativos. El monitoreo en tiempo real, junto con un diseño más eficiente de las redes de distribución, puede asegurar que tanto el aire como el agua se utilicen de manera óptima durante todo el proceso productivo.

Impacto de optimización de los sistemas en la producción

El impacto de optimizar los sistemas de aire comprimido y agua sobre la producción ha sido documentado en varios estudios recientes. Rojas y Vargas (2021) encontraron que

la mejora en la eficiencia de estos sistemas lleva a un aumento directo en la producción minera, ya que permite a los equipos operar a su máxima capacidad, sin paradas innecesarias. Esto, a su vez, contribuye a una mayor disponibilidad de equipos y un menor tiempo de inactividad, lo que incrementa el volumen de mineral procesado y mejora la rentabilidad de la mina.

Por otro lado, González et al. (2020) realizaron un estudio en el que analizaron el impacto de la eficiencia en los sistemas de agua en la flotación de minerales, concluyendo que una correcta presión y flujo de agua mejora la separación de minerales valiosos, lo que resulta en una mayor recuperación y, por ende, una mayor producción. En este sentido, un sistema de agua bien gestionado es fundamental para la eficiencia operativa de la mina.

Desafíos en la optimización de los sistemas de aire y agua

A pesar de los avances tecnológicos, existen diversos desafíos en la optimización de los sistemas de aire comprimido y agua en la minería. Según Vásquez y Romero (2019), uno de los principales problemas es la obsolescencia de los equipos y la falta de inversión en tecnologías modernas, lo que lleva a una caída en la eficiencia y aumenta los costos operativos. Además, la falta de personal capacitado y la inadecuada planificación del mantenimiento preventivo son factores que dificultan la optimización de estos sistemas.

El estudio de Paredes et al. (2020) subraya que, a menudo, los sistemas de aire y agua no se dimensionan adecuadamente en función de la demanda de la mina, lo que puede generar sobrecargas o subutilización de los recursos. Esto resalta la importancia de un diseño adecuado y una planificación exhaustiva antes de implementar cambios en los sistemas de soporte.

2.1.2 La producción en una empresa minera

Definición

Girones (2017), en el contexto de una empresa minera, la producción se refiere al proceso de extracción y procesamiento de minerales desde su estado natural en el yacimiento hasta su transformación en productos comercializables.

Etapas

Este proceso incluye diversas etapas, tales como:

- **Exploración:**

Identificación y evaluación de yacimientos minerales.

- **Extracción:**

Remoción del mineral del yacimiento mediante técnicas como perforación, voladura y transporte.

- **Concentración:**

Separación de los minerales valiosos de los estériles, utilizando métodos físicos y químicos.

- **Fundición y refinación:**

Procesos para purificar y obtener el metal en su forma comercial.

- **Comercialización:**

Venta y distribución de los productos finales en el mercado.

La eficiencia y efectividad de cada una de estas etapas son fundamentales para determinar la cantidad y calidad de la producción minera, impactando directamente en la rentabilidad y sostenibilidad de la empresa.

Es importante destacar que la calidad del mineral, expresada en términos de ley (porcentaje de metal contenido), influye significativamente en la eficiencia de los procesos de extracción y concentración. Por ejemplo, en minas de cobre, la ley se expresa en porcentaje de cobre (%Cu) contenido en el mineral.

Además, la gestión adecuada de los recursos, la implementación de tecnologías avanzadas y el cumplimiento de normativas ambientales son aspectos clave para optimizar la producción minera y minimizar impactos negativos en el entorno.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Aire comprimido

Aire que se ha presionado a una presión superior a la atmosférica, utilizado para la operación de maquinaria y herramientas en la minería.

2.2.2 Compresores

Equipos encargados de generar el aire comprimido, fundamentales en el sistema de aire comprimido de la empresa minera.

2.2.3 Sistema de distribución

Red de tuberías y componentes que transportan el aire comprimido y el agua a las distintas áreas de la mina.

2.2.4 Calidad del aire

Se refiere a la pureza del aire comprimido, que debe estar libre de impurezas que puedan afectar la eficiencia de las máquinas.

2.2.5 Eficiencia energética

El proceso de optimización de los recursos energéticos para el funcionamiento de los sistemas de aire comprimido y agua, buscando reducir costos.

2.2.6 Presión de trabajo

La presión a la que el aire comprimido se distribuye a lo largo del sistema, un factor crucial para la operatividad de las herramientas y maquinarias mineras.

2.2.7 Agua industrial

El agua utilizada en el proceso productivo, especialmente para el enfriamiento y el transporte de materiales.

2.2.8 Sistemas de filtración

Equipos que eliminan las impurezas en el aire comprimido y en el agua, garantizando su calidad y evitando daños en la maquinaria.

2.2.9 Automatización

Uso de sistemas de control automático para regular la presión y flujo del aire y el agua, mejorando la eficiencia y seguridad operativa.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Recolección de datos

3.1.1 Cálculos de aire comprimido

Cálculo de caudal de agua a eliminar en los purgadores

Se utilizó la siguiente fórmula:

Volumen de agua a purgar = $(4 \times \text{Volumen de aire comprimido introducido por día} \times HA) / 5$

Q = Caudal de agua a eliminar con purgador; gramos de agua/m³ de aire.

4/5 = Cantidad de agua que realmente se elimina con el purgador

Vol. De aire comprimido introducido por día = Volumen de aire introducido/min * 60 min/hora*horas

HA = Humedad relativa, peso en gramos de agua en 1 m³ de aire. Se utiliza la Tabla HA EN FUNCIÓN A LA TEMPERATURA AMBIENTAL. Diccionario Técnico Larousse:

- Teniendo los siguientes datos
 - Temperatura media 20 °C
 - Aire introducido 7000 CFM (198.1875 m³/día)
 - Horas de trabajo compresoras 16 horas/día (182.650 m³/día)

Humedad Absoluta en función de la temperatura según el Diccionario Técnico Larousse:

°C	-10	0	10	20	30	40
gr/m ³	2.17	4.85	9.39	16.19	30.41	50.80

Humedad Absoluta a 20°C = 16.19 gr/m³.

$Q = (4 \times 182.650 \times 16.19) / 5 = 2365.6828 \text{ gr/día}$

$= 2.17 \text{ m}^3/\text{día} = 2.17 \times 264.18 = 537.27 \text{ glns. USA}$

Pérdida de presión por fricción al final de los primeros 1000 pies

Estos cálculos se obtienen con TABLAS expresamente elaboradas, las mismas que utilizaremos a continuación, teniendo en cuenta:

PRES. REAL FINAL 1000 PIES = PRES.MANOM.SALIDA – PERDIDA PRES. POR FRICC.

- Teniendo los siguientes datos:
 - Capacidad de la compresora es de 632.80 CFM de aire.
 - Presión manométrica de salida es 100 lb/pug² = 100 psi.
 - Línea de distribución es de 10 pulgadas de diámetro.

HALLAR LA PÉRDIDA DE PRESIÓN POR FRICCIÓN AL FINAL DE LOS PRIMEROS 1000 PIES.

Con tabla tendríamos los siguientes datos:

Capacidad de la compresora = 632.80 p.s.i.

Diámetro de la tubería = 3 pug.

Entonces hallando la presión real a los 1000 pies = 100 – 6.30 = 93.70 lb/pug².

1000 pies ----- 6.30 p.s.i.

1800 ----- x

$$X = (1800 * 6.30) / 1000 = 11.34$$

Presión real a 1800 pies de longitud de tubería = 100 – 11.34 = 88.66 lb/pug².

Pérdida de presión en mangueras de 50 pies de longitud

El tamaño (diámetro de la manguera es de ¾ de pulgada; Presión reinante en la línea es de 93 p.s.i. Caudal pasando por la manguera es de 150 cfm. HALLAR LA PERDIDA DE PRESIÓN EN LA MANGUERA Y LA PRESIÓN REAL DE INGRESO A LA PERFORADORA.)

Según Tabla, relacionamos los datos dados para obtener la Pérdida de presión en la manguera: 11.10 lbs/pulg².

Concluyendo: Las pérdidas de presión por fricción en la manguera sumaría 11.10 lb/pulg².

Siendo la presión a la salida de la compresora de 100 lb/pulg², realmente llegaría a la perforadora: (100 – 11.10) = 88.90 lb/pulg².

$$D_p = (0.0007 * Q^{1.85} * L_t) / (d^5 * P)$$

Donde: D_p = Caída de presión; lb/pulg².

Q = Flujo de aire; CFM

L_t = Longitud de la tubería incluyendo accesorios; pies = $L_e + L$

D = Diámetro de la tubería; pulg -- P = Presión inicial de salida; lb/pulg².

Diferencias de presiones por elevaciones sobre el nivel del mar

$$\log P_2 = \log P_1 - (H / (122.4 * ^\circ R))$$

Donde:

P_2 = Presión absoluta a la elevación H ; lb/pulg².

P_1 = Presión absoluta al nivel del mar o la de otro elevación entre dos puntos; pies.

H = Elevación sobre el nivel del mar, o diferencias de elevación entre dos puntos;

pies

$^\circ R$ = Temperatura promedio del lugar considerado.

- **Hallar la presión absoluta a 1000 pies sobre el nivel del mar y a una temperatura media de 60 °F.**

Según tabla: Presión atmosférica al nivel del mar: 14.69 lb/pulg².

Reemplazando datos:

$$\log P_2 = \log (14.69 + 0) - (1000 / (122.4 * 520))$$

$$P_2 = 14.17 \text{ lb/pulg}^2.$$

- **Teniendo la fórmula: $P_{manom} = 83.59 - 11.77 = 71.82 \text{ lb/pulg}^2$.**

- Nivel más bajo de la mina está a = 3000 pies.
- Presión para las perforadoras menos de 80 lb/pulg².
- Presión atmosférica a 6000 pies = 11.77 lb/pulg².
- Presión atmosférica a 3000 pies = 13.16 lb/pulg².
- $\log P_2 = \log (80 - 13.16) - 0.0000157 (6000 - 3000)$
- $P_2 = 83.59 \text{ lb/pulg}^2$.
- $P_{manom} = 83.59 - 11.77 = 71.82 \text{ lb/pulg}^2$.

Eficiencia de un compresor

$$V_{cO} = ((VO * PaO) / (P_{mh} + PaO)); \text{pies}^3.$$

$$V_{ch} = ((VO * P_{ah}) / (P_{mh} + P_{ah})); \text{pies}^3.$$

$$E = (V_{ch} / V_{cO}) * 100; \%$$

Donde:

V_{cO} = Volumen de aire comprimido al nivel del mar; pies^3 .

VO = Volumen de aire libre a comprimir a nivel del mar; pie^3 .

PaO = Presión atmosférica al nivel del mar; lb/pulg^2 --- Según tabla.

P_{mh} = Presión manométrica a altura de trabajo; lb/pulg^2 .

V_{ch} = Volumen de aire comprimido a determinada altura; pie^3 .

P_{ah} = Presión atmosférica a determinada altura; lb/pulg^2 .

Según tabla: $\log P_2 = \log P_1 - (0.0000157 * H)$

P_2 = Presión atmosférica a altura considerada; p.s.i.

P_1 = Presión atmosférica al nivel del mar = $P_{ah} = 14.69$ p.s.i.

H = Altura considerada; pies

E = Eficiencia volumétrica del compresor; %

- **Se tiene 120 pies cúbicos de aire libre que se desea comprimir al nivel del mar y a 10000 pies de altura. Hallar los volúmenes y la eficiencia volumétrica del compresor.**

Según tabla tenemos que: $PaO = 14.69 \text{ lb/pulg}^2$.

$$V_{cO} = 120 * 14.69 / (100 + 14.69) = 15.37 \text{ pie}^3.$$

Según tabla tenemos que: $P_{ah} = 10.10 \text{ lb/pulg}^2$.

$$V_{ch} = 120 * 10.10 / (100 + 10.10) = 11.01 \text{ pie}^3.$$

$$E = (11.01/15.37) * 100 = 71.63\%.$$

3.2 Unidad de análisis

La unidad de análisis es el sistema de aire comprimido y agua utilizado en las operaciones mineras. Esto incluye todos los sistemas que operan en las diferentes fases de la extracción y transporte del mineral en la Compañía Minera Poderosa, que son

esenciales para el funcionamiento de equipos como Jacklegs, Jumbos, Bolters y otras maquinarias operativas en la mina.

3.3 Plan de recolección y elaboración de datos

3.3.1 Técnica de recolección de datos

La principal técnica que se utilizó fue el análisis documental.

3.3.2 Instrumento de recolección de datos

El principal instrumento que se utilizará en la investigación es la Guía de Análisis Documental.

3.4 Etapas de investigación

El trabajo de investigación se desarrolló de la manera siguiente:

- Recojo de información preliminar
- Análisis de información preliminar
- Elaboración del plan de investigación
- Elaboración del marco teórico
- Desarrollo del trabajo
- Procesamiento de datos
- Análisis de resultados
- Discusión de resultados
- Elaboración del informe preliminar
- Elaboración del informe final
- Presentación del informe
- Sustentación.

3.5 Matriz de consistencia

La matriz de consistencia se muestra en el Anexo 1.

3.6. Hipótesis de investigación

3.6.1. *Hipótesis general*

La mejora de los sistemas de aire comprimido y agua en las minas subterráneas auríferas incrementará la producción y mejorará la eficiencia operativa, reduciendo costos y mejorando la rentabilidad de la operación minera.

3.6.2. *Hipótesis específicas*

- La mejora del sistema de aire comprimido en las minas subterráneas auríferas incrementará la producción y mejorará la eficiencia operativa, reduciendo costos y mejorando la rentabilidad de la operación minera.
- La mejora del sistema de agua en las minas subterráneas auríferas incrementará la producción y mejorará la eficiencia operativa, reduciendo costos y mejorando la rentabilidad de la operación minera.

3.7 Variables del estudio

3.7.1 *Variable dependiente*

Y: Producción

3.7.2 *Variable independiente*

X1: Sistema de aire comprimido.

X2: Sistema de agua.

3.7.3 *Operacionalización de variables*

Ver Tabla 2

Tabla 2

Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADOR	ESCALA
Variable Independiente: X1: Sistema de aire comprimido X2: Sistemaz de agua.	Se refiere a las acciones y procesos destinados a optimizar la eficiencia, la seguridad, la sostenibilidad y la funcionalidad de los sistemas que proporcionan aire comprimido y agua en las operaciones mineras.	Esta variable se operacionaliza a través de sus dimensiones e indicadores.	Sistema de aire comprimido en operaciones mineras	Caudal del aire comprimido (m ³ /min) Presión del aire comprimido (psi o bar) Horas de disponibilidad del sistema (Horas/día) Eficiencia operativa (% aprovechamiento del aire)	Razón
			Sistema de agua en operaciones mineras	Caudal de agua disponible en los frentes de trabajo (L/min) Presión del agua (psi o bar) Porcentaje de disponibilidad del sistema de agua (%) Eficiencia del sistema de distribución de agua (%)	
Variable Dependiente: Y: Producción en mina subterránea aurífera.	En el contexto de una empresa minera, la producción se refiere al proceso de extracción y procesamiento de minerales desde su estado natural en el yacimiento hasta su transformación en productos comercializables (Girones, 2017),.	Dado que la producción se relaciona con la productividad se estima como el producto de la eficiencia y la eficacia, el tiempo de actividad y el rendimiento del trabajador deben medirse a través de registros de observación.	Volumen de producción	Toneladas métricas procesadas por día Onzas de oro recuperadas por mes.	Razón
			Eficiencia operativa	Número de ciclos de perforación-explosión-ventilación	Razón
			Productividad laboral	Índice de productividad por turno o trabajador	

Fuente: Elaboración propia.

3.8 Diagnóstico situacional

3.8.1 Breve descripción de la empresa y sus procesos

3.8.1.1 Descripción. La Compañía Minera Poderosa S.A. es una empresa peruana dedicada a la exploración, extracción, procesamiento y comercialización de oro, con más de 40 años de experiencia en el sector. Su operación principal se encuentra en la provincia de Pataz, en el departamento de La Libertad, al norte del Perú.

La unidad Santa María es una de las principales zonas operativas de Poderosa, situada en una región montañosa y de difícil acceso a más de 2,500 m.s.n.m.. Esta unidad concentra parte importante de la producción aurífera subterránea de la compañía.

3.8.1.2 Procesos principales.

- **Exploración geológica:**

- Evaluación de vetas auríferas mediante sondajes y mapeo estructural.
- Identificación y cuantificación de reservas y recursos minerales.

- **Explotación minera:**

- Minería subterránea mecanizada (con uso de perforadoras neumáticas).
- Métodos como corte y relleno y taladros largos, según geología del yacimiento.

- **Transporte del mineral:**

- El mineral es trasladado desde las galerías subterráneas hasta la planta mediante tolvas, fajas transportadoras y camiones.

- **Procesamiento metalúrgico:**

- Trituración y molienda del mineral.
- Cianuración en plantas de lixiviación para recuperación del oro.
- Recuperación mediante adsorción en carbón activado (CIP).

- **Refinación y fundición:**

- Producción de doré de oro, que luego es enviado a refinerías para obtener oro puro.

- Manejo ambiental y cierre progresivo:
 - Gestión de relaves, tratamiento de aguas y reforestación.
 - Implementación de sistemas de monitoreo ambiental continuo.

3.8.2 Nivel de la producción de la Compañía Minera Poderosa, en mina subterránea aurífera

3.8.2.1. Producción 2024 y proyección 2025.

Ver Tabla 3 y Tabla 4

Tabla 3

Programa de producción para el 2024 de la UEA Libertad

UEA	ORIGEN	VALORES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL GENERAL
LIBERTAD	MINA	TON_DIL	41,705	34,100	39,174	37,583	38,469	37,457	38,243	38,686	36,447	38,771	35,306	38,137	454,079
		Ley Au (g/t)	12.07	11.62	11.81	11.88	11.99	11.64	11.83	12.1	11.73	12.22	12	12.15	11.93
		Recuperación (%)	91.61%	91.15%	91.35%	91.35%	91.37%	91.23%	91.30%	91.43%	91.20%	91.49%	91.24%	91.42%	91.35%
		Finos (Oz)	14,829	11,615	13,583	13,114	13,547	12,793	13,281	13,757	12,538	13,935	12,429	13,623	159,044
	ACOPIO	TON_DIL	8,258	9,476	9,337	9,010	9,863	9,243	10,194	9,953	10,183	9,453	10,945	10,415	116,330
		Ley Au (g/t)	23.01	23.59	23.8	23.79	22.53	24.04	22.65	22.48	23.97	22.03	22.17	22.39	23.01
		Recuperación (%)	91.20%	91.36%	91.38%	91.40%	91.07%	91.49%	91.11%	91.02%	91.43%	90.91%	91.00%	91.04%	91.20%
		Finos (Oz)	5,571	6,566	6,529	6,298	6,505	6,536	6,764	6,549	7,174	6,087	7,099	6,824	78,501
TON_DIL LIBERTAD		49,963	43,577	48,511	46,593	48,332	46,700	48,437	48,639	46,630	48,225	46,251	48,552	570,409	
Ley Au (g/t) LIBERTAD		13.88	14.22	14.12	14.18	14.14	14.1	14.11	14.22	14.4	14.14	14.41	14.35	14.19	
Recuperación (%) LIBERTAD		91.50%	91.23%	91.36%	91.37%	91.27%	91.32%	91.23%	91.30%	91.29%	91.31%	91.15%	91.29%	91.30%	
Finos (Oz) LIBERTAD		20,399	18,181	20,112	19,413	20,052	19,329	20,045	20,306	19,712	20,022	19,528	20,447	237,544	

Fuente: Compañía minera poderosa.

El programa de producción para el 2024 de la UEA Libertad asciende a 570,409 t, 14.19 gr/t y 237,544 oz:

Análisis

El análisis del programa de producción 2024 de la UEA Libertad revela una operación subterránea con niveles de producción relativamente estables, alcanzando un total anual de 570,409 toneladas diluidas y 237,544 onzas de oro fino. De este total, la mina subterránea representa aproximadamente el 80 % del mineral tratado, lo que la posiciona como la principal fuente de producción, pese a que el mineral proveniente del acopio presenta leyes de oro más altas. La recuperación promedio general se mantiene alrededor del 91.30 %, lo que indica un proceso metalúrgico eficiente. Sin embargo, la capacidad de aumentar la producción se encuentra limitada por factores operativos propios del entorno subterráneo, donde la disponibilidad y eficiencia de los sistemas de aire comprimido y agua juegan un rol fundamental en el sostenimiento de las actividades de perforación, ventilación y limpieza.

En este contexto, el proyecto de tesis orientado al mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua cobra particular relevancia, ya que estos sistemas son esenciales para garantizar la continuidad y eficiencia de las operaciones mineras subterráneas. Una infraestructura optimizada en estos servicios permitiría reducir significativamente los tiempos muertos por fallas o baja presión, incrementar la disponibilidad de los equipos y mejorar las condiciones laborales, lo que se traduciría directamente en un aumento del tonelaje mensual procesado y, por consiguiente, en un mayor volumen de onzas de oro producidas. Así, el proyecto no solo busca mantener la estabilidad operativa actual, sino también generar las condiciones técnicas necesarias para incrementar sosteniblemente la producción aurífera de la unidad minera.

Tabla 4

Proyección del programa de producción para el 2025 de la UEA Libertad

UEA	ORIGEN	VALORES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL GENERAL
LIBERTAD	MINA	TON_DIL	39,759	33,261	36,862	38,583	41,538	38,162	43,725	40,803	39,346	40,715	39,476	40,146	472,376
		Ley Au (g/t)	10.86	11.34	10.91	10.82	10.73	10.73	10.58	10.84	10.94	10.66	11	10.7	10.83
		Recuperación (%)	89.16%	89.33%	89.13%	89.14%	89.13%	89.09%	89.08%	89.17%	89.22%	89.07%	89.25%	89.08%	89.15%
		Finos (Oz)	12,372	10,831	11,526	11,970	12,778	11,732	13,247	12,685	12,352	12,430	12,460	12,303	146,687
	ACOPIO	TON_DIL	7,933	8,994	10,144	11,371	10,063	11,471	8,921	10,707	10,886	11,371	10,063	11,471	123,395
		Ley Au (g/t)	22.76	24.77	22.37	22.97	23.05	22.6	22.76	24.77	22.37	22.97	23.05	22.6	23.07
		Recuperación (%)	92.85%	93.30%	92.73%	92.97%	92.87%	92.84%	92.85%	93.30%	92.73%	92.97%	92.87%	92.84%	92.93%
		Finos (Oz)	5,390	6,683	6,767	7,809	6,925	7,738	6,061	7,956	7,262	7,809	6,925	7,738	85,064
	TON_DIL LIBERTAD		47,692	42,255	47,007	49,955	51,601	49,633	52,646	51,509	50,232	52,086	49,539	51,617	595,770
	Ley Au (g/t) LIBERTAD		12.84	14.2	13.38	13.59	13.14	13.48	12.64	13.74	13.42	13.35	13.45	13.34	13.37
	Recuperación (%) LIBERTAD		90.25%	90.81%	90.43%	90.62%	90.41%	90.54%	90.23%	90.72%	90.49%	90.54%	90.51%	90.50%	90.50%
	Finos (Oz) LIBERTAD		17,762	17,515	18,293	19,778	19,703	19,471	19,307	20,641	19,614	20,239	19,385	20,042	231,751

Fuente: Compañía minera poderosa.

El programa de producción para el 2025 de la UEA Libertad asciende a 595,770 t, 13.37 gr/t y 231,751 oz:

Análisis

El programa de producción proyectado para el año 2025 en la UEA Libertad muestra un aumento significativo en el volumen total de toneladas diluidas, pasando de 570,409 toneladas en 2024 a 595,770 toneladas en 2025, lo que representa un incremento del 4.45 %. Sin embargo, este aumento de producción no se refleja proporcionalmente en los finos de oro, ya que se proyecta una producción total de 231,751 onzas, inferior a las 237,544 onzas obtenidas en 2024. Esta diferencia se explica principalmente por la disminución en la ley de oro en el mineral proveniente de mina, que baja de un promedio de 11.93 g/t en 2024 a 10.83 g/t en 2025, además de una leve reducción en la eficiencia de recuperación (de 91.35 % a 89.15 %). Aunque el acopio sigue aportando mineral con alta ley, su volumen de tratamiento, aunque creciente, no compensa completamente la disminución de contenido metálico en el mineral de mina.

Este escenario pone en evidencia la importancia del proyecto de tesis orientado al mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua, ya que el aumento en el tonelaje proyectado exige una infraestructura subterránea más eficiente para sostener mayores volúmenes de producción, sin comprometer la calidad ni la continuidad operativa. Una mejora en estos sistemas críticos permitiría no solo mantener el ritmo de minado proyectado, sino también reducir pérdidas por ineficiencias operativas y potenciar la recuperación de oro en condiciones menos favorables de ley. En conjunto, la tesis se alinea con la necesidad de optimizar los recursos existentes para compensar la menor ley del mineral, mantener la rentabilidad y asegurar la sostenibilidad de la producción en la unidad minera.

3.8.2.2 Déficit de producción. Para determinar la diferencia o déficit entre la producción real del año 2024 y la proyección para el año 2025 de la UEA Libertad, compararemos las toneladas producidas por mina.

Resumen de producción por año

Tabla 5

Tabla comparativa de la producción en la UEA Libertad entre los años 2024 y 2025

Indicador	2024	2025 (Proyección)	Variación Absoluta	Variación %
Toneladas Diluidas (TON_DIL)	570,409	595,770	+25,361	+4.45 %

Fuente: Elaboración propia.

El análisis del indicador de toneladas diluidas (TON_DIL) evidencia un incremento proyectado del 4.45 % en el año 2025 respecto al 2024, lo que representa un aumento absoluto de 25,361 toneladas. Este crecimiento en el volumen de material tratado refleja una mayor exigencia operativa para la unidad minera, especialmente en el sistema subterráneo, donde los recursos de soporte como el aire comprimido y el agua desempeñan un rol fundamental en el sostenimiento de los ciclos de producción. En este contexto, se justifica técnicamente la necesidad de mejorar dichos sistemas, ya que un aumento en el tonelaje procesado demanda una infraestructura más eficiente, capaz de garantizar continuidad operativa, reducir pérdidas por tiempos muertos y permitir una respuesta efectiva frente al desgaste natural de los equipos y condiciones geomecánicas adversas.

3.8.3 Análisis del sistema de aire comprimido

3.8.3.1 Descripción técnica de las compresoras. La información técnica de las compresoras se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 6

Características de la Compresora KAISHAN KRSP2 300 (Zona Alta)

COMPRESORA KAISHAN KRSP2 300-100		
Caudal (CFM)		1350
Potencia (HP)		300
Voltaje(V)		440
Frecuencia (HZ)		60
RPM		1780
Placa	Caudal (CFM)	1750

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7*Características de la Compresora SULLAIR TS32 – 300 (Zona Baja)*

COMPRESORA SULLAIR TS32-300L		
	Caudal (CFM)	1150
	Potencia (HP)	300
	Voltaje(V)	440
	Frecuencia (HZ)	60
	RPM	1780
Placa	Caudal (CFM)	1600

Fuente: Elaboración propia.

3.8.3.2 Factor de Simultaneidad. Para elegir adecuadamente un compresor, es necesario conocer tanto la variedad como la cantidad de herramientas y equipos que este deberá atender dentro de un sistema de aire comprimido. Un compresor que abastece a un sistema con múltiples herramientas conectadas normalmente no necesita suministrar el flujo máximo de aire para todas ellas al mismo tiempo. Si llegara a ocurrir, las herramientas tendrían que operar con un caudal de aire reducido de manera temporal.

Para tener en cuenta la diversidad de herramientas conectadas al compresor, se utiliza un "factor de simultaneidad". Podemos observar la curva en el anexo 2.

Tabla 8*Factores de simultaneidad en comparación al nivel del mar*

ALTITUD EN PIES	NÚMERO DE PERFORADORAS								
	1	3	5	7	10	20	40	60	70
	FACTORES								
0	1	2.7	4.1	5.4	7.1	11.1	21.4	29.4	33.2
1000	1.03	2.78	4.22	5.56	7.3	12.05	22	30.3	34.2
2000	1.07	2.89	4.39	5.78	7.6	12.52	22.9	31.46	35.52
3000	1.1	2.97	4.51	5.94	7.81	12.87	23.54	32.34	36.52
4000	1.14	3.08	4.67	6.15	8.09	13.34	24.4	33.52	37.8
5000	1.17	3.16	4.8	6.32	8.31	13.69	25.08	34.4	38.84
6000	1.2	3.24	4.9	6.48	8.52	14.04	25.64	35.4	39.84
7000	1.23	3.32	5.04	6.64	8.73	14.39	26.32	36.16	40.84
8000	1.26	3.4	5.17	6.8	8.95	14.74	26.96	37.04	41.83
9000	1.29	3.48	5.29	6.96	9.16	15.09	27.6	37.92	42.83
10000	1.32	3.56	5.41	7.13	9.37	15.44	28.25	38.8	43.82
12000	1.37	3.7	5.62	7.4	9.73	16.03	29.32	40.28	45.48
15000	1.43	3.86	5.86	7.72	10.15	16.73	30.6	42.04	47.47

Fuente: Charles W. Gibbs, Compressed air and gas data

3.8.3.3. Horas de operación de compresoras. Las horas operativas promedio de las compresoras tomadas en campo y corroborado con el sistema SCADA se detallan en las siguientes tablas.

Tabla 9

Horas operativas promedio por mes de compresoras NV2520

COMPRESORA	HORAS/MES
SULLAIR TS32-2	415
SULLAIR TS32-3	565
SULLAIR TS32-4	741
SULLAIR TS32-5	535
SULLAIR TS32-6	458
SULLAIR TS32-7	595
SULLAIR TS32	552

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10

Horas operativas promedio por mes de compresoras NV3100

COMPRESORA	HORAS/MES
KAISHAN 300- 4	300
KAISHAN 300-5	150
KAISHAN 300-10	300
KAISHAN 300	250

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11

Horas de trabajo mensual de la compresora

COMPRESORA	CAP. MEDIDA	HORAS/MES	PROMEDIO MENSUAL
SULLAIR TS 32-300	1150	552	634800
KAISHAN 300	1350	410	553500

Fuente: Elaboración propia.

3.8.3.4 Número de compresoras. Actualmente, en la Unidad Minera Santa María de Cía. Minera Poderosa, se cuenta con un sistema de compresión de aire distribuido entre dos sectores operativos: la zona alta y la zona baja.

Casa de compresoras NV 2520 (Zona Baja)

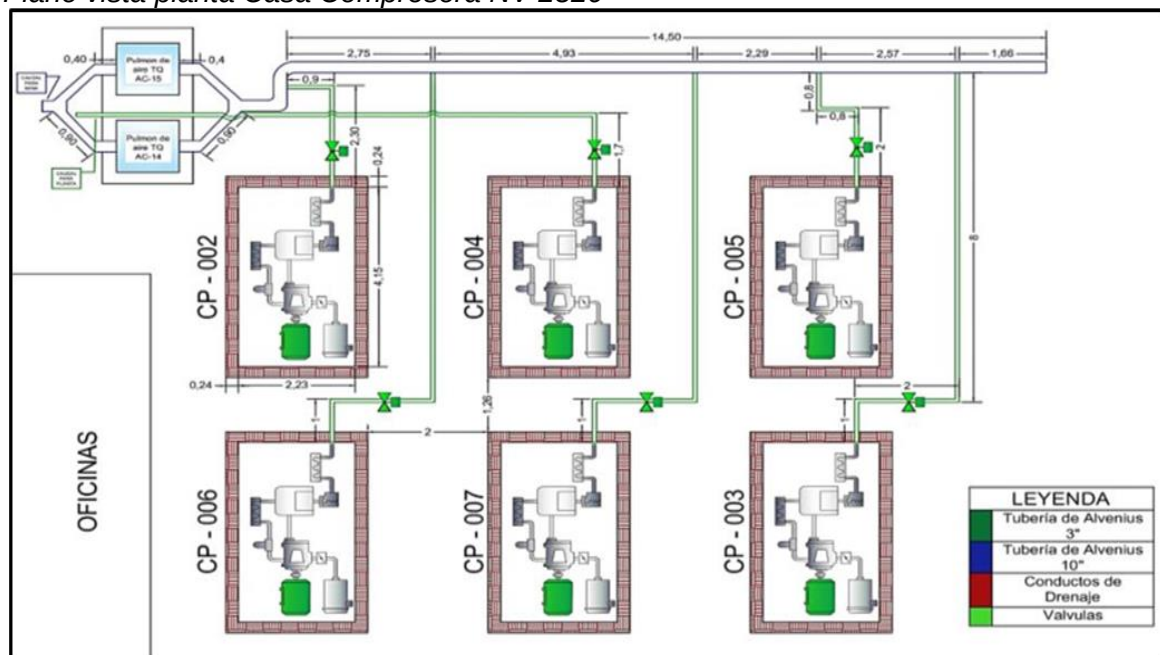
En la casa de compresoras de zona baja, se encuentran en funcionamiento cinco compresoras SULLAIR TS32-300L destinadas a la operación directa de mina, además de una sexta compresora, la cual está destinada al suministro de aire para la planta, operando

bajo un sistema de regulación específico para garantizar una presión y caudal adecuados al proceso. En este sector, se cuenta con jacklegs, cuyo funcionamiento depende del suministro constante de aire comprimido.

En la parte baja, encontramos en el sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), que los equipos CP-002, CP-003, CP-005, CP-006 y CP-007 corresponden a compresoras distribuidas estratégicamente en distintas áreas de la planta, cada una monitoreada y controlada localmente. La interfaz del SCADA proporciona a los operadores información visual y alarmas en tiempo real, facilitando la toma de decisiones inmediatas para mantener la eficiencia del sistema.

Figura 13

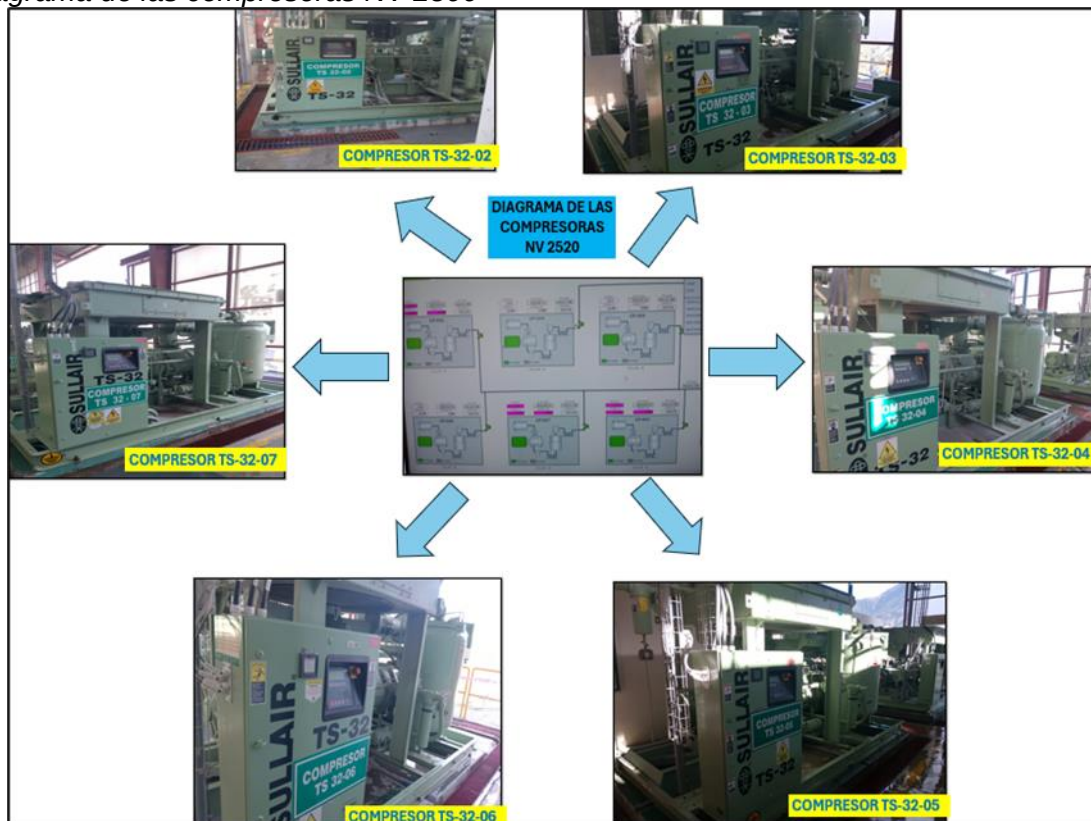
Plano vista planta Casa Compresora NV 2520



Nota: Los equipos CP-002, CP-003, CP-005, CP-006 Y CP-007 brindan suministro a Interior Mina, mientras que la CP-004 brinda suministro a Planta Mina.

Figura 14

Diagrama de las compresoras NV 2500



Fuente: Elaboración propia.

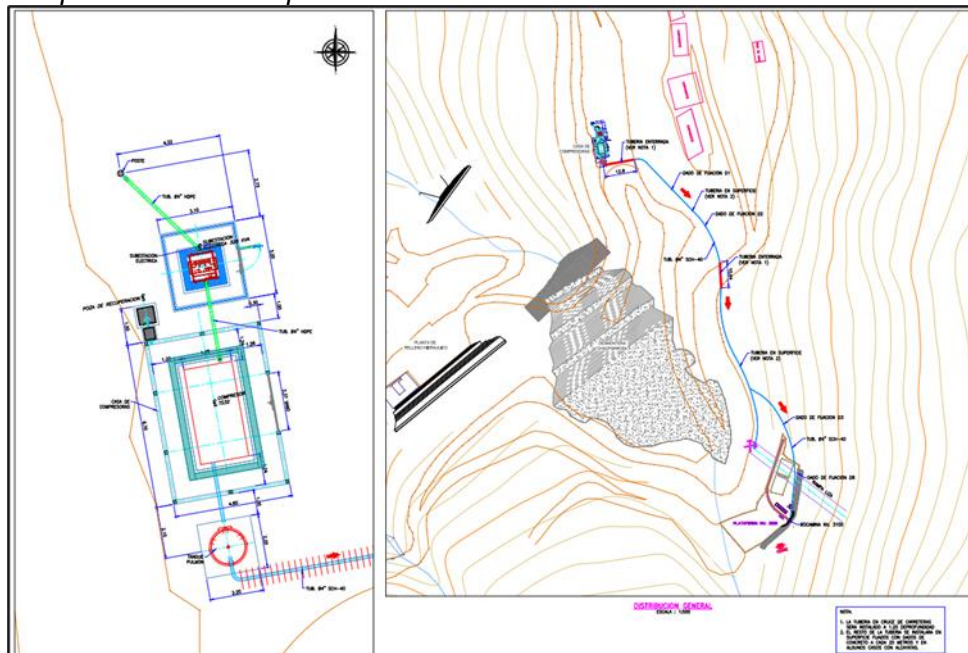
Casa de compresoras NV3100 (Zona Alta)

En la zona alta operan tres compresoras KAISHAN KRSP2 300-100, las cuales suministran aire comprimido principalmente para la operación de equipos neumáticos de perforación, como las jacklegs instaladas en este sector.

Esta infraestructura de compresión es crítica para mantener la continuidad de las operaciones de perforación y del circuito de planta, por lo que su desempeño influye directamente en la productividad y eficiencia del ciclo minero-operativo.

Figura 15

Plano vista planta Casa Compresora NV 3100



Fuente: Compañía minera poderosa.

Figura 16

Diagrama de las compresoras NV 3100



Fuente: Elaboración propia

3.8.3.5 Balance general

3.8.3.5.1 Balance de la parte baja

Necesidad de número de compresoras para mina – parte baja

Parte baja se cuenta con 06 compresoras Sullair TS-32-300 de las cuales 5 trabajan para la mina y 1 compresora que se emplea mayormente para planta. En el caso de las compresoras que trabajan para la mina, es importante considerar que este modelo cuenta con un motor de 300 caballos de fuerza (HP) y ofrece un caudal de 47 metros cúbicos por

minuto (m³/min) a una presión de trabajo de 7 kg/cm², equivalente a aproximadamente 100 psi, así mismo, trabajan máximo en 1150 CFM a la altura de 2520 m.s.n.m. Estas compresoras alimentan a las máquinas neumáticas desde el Nivel 2120 hasta el Nivel 2860.

A continuación, se muestra el balance de las compresoras que trabajan para la mina, identificando el déficit para el presente año 2025.

Tabla 12

Cálculo del factor de simultaneidad a 2520 msnm

ALTITUD EN PIES	NÚMERO DE PERFORADORAS								
	1	3	5	7	10	20	40	60	70
	FACTORES								
8000	1.26	3.4	5.17	6.8	8.95	14.74	26.96	37.04	41.83
8267.72	1.27	3.42	5.20	6.84	9.01	14.83	27.13	37.28	42.10
9000	1.29	3.48	5.29	6.96	9.16	15.09	27.6	37.92	42.83

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13

Caudal requerido de compresoras de zona baja (2024 -2025)

CAUDAL REQUERIDO				CAUDAL REQUERIDO			
JACKLEG				JACKLEG			
2024				2025			
# Perforadoras				# Perforadoras			
Altitud (pies)	40	60	42	Altitud (pies)	40	60	48
8000	26.96	37.04	27.97	8000	26.96	37.04	30.99
8,268	27.13	37.28	28.15	8,268	27.13	37.28	31.19
9000	27.60	37.92	28.63	9000	27.60	37.92	31.73
# Perforadoras			42 Und	# Perforadoras			48 Und
Factor de Simultaneidad			28.15	Factor de Simultaneidad			31.19
Caudal Requerido por Perforadora			120 CFM	Caudal Requerido por Perforadora			120 CFM
Factor de Seguridad			1.5	Factor de Seguridad			1.5
Caudal Requerido Zona Baja 2024				5,066.24	CFM	Caudal Requerido Zona Baja 2025	
						5,614.03	CFM

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14

Balance del trabajo de las compresoras del nivel 2520, que atienden a la necesidad de la parte baja hasta el nivel 2860 (2024-2025)

	2024	2025	VAR
Capacidad compresora Sullair TS32(CFM)	1150	1150	
Producción real medida (5 compresoras Sullair TS-32-300)	5750	5750	
Pérdidas permisibles (15% del consumo)	862.5	862.5	
Aire recuperable	4887.5	4887.5	
Caudal Requerido Zona Baja	5,066.24	5614.03	
Necesidad real	5,929	6476.53	547.79
Déficit (Necesidad Real – Capacidad Total de Compresoras)	178.74	726.53	

Fuente: Elaboración propia.

La situación actual refleja un déficit estructural de capacidad, que pone en riesgo la operación continua de la mina. Para corregirlo y garantizar un suministro de aire comprimido confiable, se requiere poder alimentar a mina con la sexta compresora que alimenta a planta en horario donde se requiera una mayor demanda de consumo de aire comprimido, además aprovechar más la compresora TS32-2 que cuenta con una baja disponibilidad. Esta medida asegurará que se cubran tanto el consumo actual como la demanda proyectada, dentro de márgenes de pérdida permisibles y sin comprometer la eficiencia operacional.

Requerimiento de aire comprimido zona baja

Tabla 15

Comparación del requerimiento de aire comprimido (caudal) en la zona baja de Santa María de una mina, en los años 2024 y año 2025

	2024		2025	
Caudal Requerido Zona Baja Santa María	5,929	CFM	6477	CFM
Caudal por Compresora	1,150	CFM	1,150	CFM
# Compresoras	5.2	Und	5.6	Und

Fuente: Elaboración propia.

A una altitud de 2,500 m.s.n.m., las 5 compresoras entregan 5,750 CFM, para el año 2024 se genera un déficit de 178.74 CFM frente a la necesidad real de 5929 CFM. Para el año 2025 se incrementarán 6 perforadoras de las 42 del año 2024 teniendo un total de 48 perforadoras, este incremento generará una necesidad de 6,477 CFM esto representa una necesidad de aire comprimido de 726.53 CFM para el año 2025, por lo tanto para garantizar el caudal requerido en la zona baja de Santa María a una altitud de

2,520 m.s.n.m., se necesitará que la sexta compresora que abastece a planta apoye en el horario de mayor demanda de aire para perforación en el año 2025, manteniendo una presión de trabajo aproximado de 100 psi y un caudal efectivo por unidad de 1,150 CFM. En conclusión, para la zona baja no se requiere el aumento de compresoras solo una correcta gestión de su uso.

3.8.3.5.2 Balance de la parte alta. Actualmente, el sistema cuenta con tres compresoras Kaishan KRSP2 300-100, cuya producción combinada alcanza los 4,050 CFM. Si bien esta cifra representa una capacidad importante, al considerar las pérdidas permisibles del sistema, equivalentes al 15% del consumo, se observa que el aire realmente utilizable (o “aire recuperable”) se reduce a 3,442.5 CFM en el año 2024.

Este valor coincide con el consumo efectivo de aire en la mina, que representa la demanda real que se puede cubrir con el aire disponible tras descontar las pérdidas por fugas, ineficiencias en las líneas o equipos mal calibrados. Sin embargo, la necesidad operativa total establecida para la mina para el año 2025 es de 5,363 CFM, por lo que se generará un déficit de aproximadamente 1,312.53 CFM. Estas compresoras alimentan a las máquinas neumáticas desde el Nivel 2910 hasta el Nivel 3260.

Tabla 16

Cálculo del Factor de Simultaneidad a 3100 msnm

ALTITUD EN PIES	NÚMERO DE PERFORADORAS								
	1	3	5	7	10	20	40	60	70
	FACTORES								
10000	1.32	3.56	5.41	7.13	9.37	15.44	28.25	38.8	43.82
10170.6	1.32	3.57	5.43	7.15	9.40	15.49	28.34	38.93	43.96
12000	1.37	3.7	5.62	7.4	9.73	16.03	29.32	40.28	45.48

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17*Caudal requerido de compresoras de zona alta (2024 -2025)*

CAUDAL REQUERIDO				JACKLEG			
2024				2025			
# Perforadoras				# Perforadoras			
Altitud (pies)	20	40	24	Altitud (pies)	20	40	34
8000	15.44	28.25	18.00	8000	15.44	28.25	24.41
10,171	15.49	28.34	19.49	10,171	15.49	28.34	26.42
9000	16.03	29.32	18.69	9000	16.03	29.32	25.33
# Perforadoras			24 Und	# Perforadoras			34 Und
Factor de Simultaneidad			19.49	Factor de Simultaneidad			26.42
Caudal Requerido por Perforadora			120 CFM	Caudal Requerido por Perforadora			120 CFM
Factor de Seguridad			1.5	Factor de Seguridad			1.5
Caudal Requerido Zona Alta 2024			3,508.39 CFM	Caudal Requerido Zona Alta 2025			4,755.06 CFM

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18*Balance del trabajo de las compresoras del NV3100, que atienden a la necesidad de la parte alta (2024-2025)*

	2024	2025	VAR
Capacidad compresora Kaishan KRSP2	1350	1350	
Producción real medida (3 compresoras Kaishan KRSP2)	4050	4050	
Pérdidas permisibles (15% del consumo)	607.5	607.5	
Aire recuperable	3442.5	3442.5	
Caudal Requerido Zona Alta	3,508.39	4755.06	
Necesidad real	4,116	5363	1,246.67
Déficit	65.89	1312.56	

Fuente: Elaboración propia.

Este déficit, representa una limitación operacional que puede traducirse en varios problemas: pérdida de presión en ciertos puntos de la red, ineficiencia en el funcionamiento de equipos neumáticos, posibles tiempos muertos y menor confiabilidad del sistema de aire comprimido. Además, al operar al límite de capacidad, el sistema queda sin margen para absorber aumentos temporales de demanda ni contingencias (como el paro de una compresora por mantenimiento).

Requerimiento de aire comprimido zona alta

Tabla 19

Comparación del requerimiento de aire comprimido (caudal) en la zona alta de Santa María de una mina, en los años 2024 y año 2025

	2024		2025	
Caudal Requerido Zona Alta Santa María	4,116	CFM	5363	CFM
Caudal por Compresora	1,350	CFM	1,350	CFM
# Compresoras	3.05	Und	3.97	Und

Fuente: Elaboración propia.

Para cubrir la demanda de 4,116 CFM de aire comprimido en la Zona Alta Santa María durante el año 2024, se requieren tres compresoras Kaishan KRSP2 300-100, considerando un caudal efectivo de 1,350 CFM por unidad a 3,100 msnm. Este número cubre la necesidad operativa para el año 2024, pero para el año 2025 se tiene una proyección de caudal de 5,363 CFM. Por ello, es recomendable aumentar una cuarta compresora para cubrir la necesidad de aire comprimido y poder cumplir con las metas de la proyección del año 2025, asegurando continuidad operativa y mayor confiabilidad del sistema.

3.8.3.6 Distribución del aire comprimido. Como resultado de la racionalización y automatización de los dispositivos de fabricación, las empresas precisan continuamente una mayor cantidad de aire, siendo esta suministrada por un compresor, a través de una red de tuberías. El diámetro de las tuberías debe elegirse de manera que, si el consumo aumenta, la pérdida de presión entre el depósito y el consumidor no sobrepase 10 kPa (0,1 bar); si la caída de presión excede de este valor, la rentabilidad del sistema estará amenazada y el rendimiento disminuirá considerablemente.

En la planificación de instalaciones nuevas debe preverse una futura ampliación de la demanda de aire, por cuyo motivo deberán dimensionarse generosamente las tuberías. El montaje posterior de una red más importante supone costos dignos de mención.

3.8.3.7 Costo de energía por operación de compresoras. Los costos en dólares por consumo de kWh lo calcularemos a partir del reporte que se genera del sistema SCADA, el costo unitario es de aproximadamente de 0.17 USD/KWh.

Tabla 20*Consumo mensual de energía de compresoras (kWh)*

Equipo	Corriente Prom. (A)	Corriente Máx. (A)	Voltaje Prom. (V)	Voltaje Máx. (V)	Potencia Prom. (kW)	Potencia Máx. (kW)	kWh
TS 32-2	186.69	879.84	441.82	490.92	125.09	249.83	93,447
TS 32-3	265.55	628.48	443.63	491.72	179.03	252.64	133,574
TS 32-4	310.53	374.23	457.04	483.98	210.63	251.38	157,047
TS 32-5	241	367.79	443.5	491.6	162.78	243.52	121,304
TS 32-6	187.36	392.59	442.63	491.05	121.53	249.54	90,594
TS 32-7	270.51	375.39	443.33	491.68	185.65	250.57	138,394
Total							734,361

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21*Costos de consumo promedio por mes (\$/kWh-mes)*

EQUIPO	KWH SCADA	COSTO SCADA USD
TS 32-2	93,447	15,886
TS 32-3	133,574	22,708
TS 32-4	157,047	26,698
TS 32-5	121,304	20,622
TS 32-6	90,594	15,401
TS 32-7	138,394	23,527
Total	734,361	124,841

Fuente: Elaboración propia.

3.8.3.8 Diagrama unifilar de la red de aire comprimido. El diagrama unifilar de la red de aire comprimido de la zona baja (nivel 2520) lo podemos ver en el anexo 3 y el diagrama unifilar de aire comprimido de la zona alta (nivel 3100) en el anexo 4.

3.8.4 Análisis del sistema de agua

3.8.4.1 Balance de caudales – agua.

Tabla 22*Balance de caudales - agua, parte alta*

	JACKLEG	JUMBO	CONSUMO DE AGUA (Litros / minuto)
ARCA SAC	4	0	16
EA&T	14	2	296
TAURO	8	3	392
EJMAC	5	0	20
MAROSE	14	2	296
ACOPIO	10	0	40
Sub . Total	45	7	1060
CONSUMO TOTAL			64 m ³ /hora 18 l/s

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23*Ingresos y caudal del agua, parte alta*

INGRESOS	CAUDAL (L/S)
DDH 80	8
Cuneta EA&T	3
DDH 103	2
Bombeo EA&T (Intermitente)	4
Total	17

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24*Balance de caudales - agua, parte baja*

	JACKLEG	JUMBO	CONSUMO DE AGUA (Litros / minuto)
FALCON	8	2	272
WAMEX	11	0	44
CORIMAYO	0	3	360
INCIMMET	2	1	128
BULMINING	10	1	160
ACOPIO	5	0	20
Sub . Total	36	7	984
			59 m³/hora
CONSUMO TOTAL			16 l/s

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25*Ingresos y caudal del agua, parte alta*

INGRESOS	CAUDAL (L/S)
Dique 2260	4
Dique RC-51	3
Dique 2670	10
Total	17

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26*Balance de caudales - agua*

	ÍTEMS	CAUDAL (L/S)
	Zona Alta	18
	Zona Baja	16
	Planta	6
	Áreas Verdes	2
BALANCE	Pallaqueo en Superficie	1
	Necesidad	43
	Ingresos	34
	Déficit	9

Fuente: Elaboración propia.

3.8.4.2 Costos de instalación de tuberías de agua. La instalación de las tuberías de agua de 2" y de 4" se encuentran dentro de la estructura de precios unitarios de las empresas contratistas mineras y son realizados por ellos, el costo de la tubería y accesorios es asumido en este caso por la Compañía minera, se tienen los siguientes precios referenciales.

Tabla 27*Costo de tuberías de 2" y 4"*

	SOLES / METRO
Tubería de polietileno HDPE 2"	5.9
Tubería de polietileno HDPE 4"	17.4

Fuente: Elaboración propia

El costo de la instalación de una tubería de 2" y de 4" se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 28*Costo de instalación de tuberías de 2" y 4"*

	SOLES / METRO
Instalación tubería de polietileno HDPE 2"	11.5
Instalación tubería de polietileno HDPE 4"	17.5

Fuente: Elaboración propia.

Para la valorización de cada empresa contratista minera se considera los metros que colocaron las tuberías por cada labor y se multiplica por el costo de instalación, este costo va cargado a la actividad de instalación de tubería. Por ejemplo, si una empresa

contratista ha avanzado una labor 100 metros y ha colocado tubería de 2" se le pagará el costo de instalación de tubería equivalente a 1150 soles, el costo del material lo asume la compañía minera que sería equivalente a 590 soles.

El costo promedio por Instalación de tubería asciende a 25,000 USD por mes según lo proyectado para el año 2025.

3.8.4.3 Diagrama unifilar de la red de agua. El diagrama unifilar de la red de agua de la zona baja lo podemos ver en el anexo 5 y el diagrama unifilar de agua de la zona alta en el anexo 6.

3.9 Propuesta de mejora

3.9.1 Propuesta de Mejora del Sistema de Aire Comprimido

Propuesta de mejora del sistema de aire comprimido – Unidad Santa María

3.9.1.1 Diagnóstico del sistema actual.

3.9.1.1.1 Zona alta. El análisis detallado del sistema de aire comprimido de la Unidad Santa María revela que la capacidad instalada actual en la zona alta es insuficiente para cubrir la demanda operativa proyectada para el año 2025. En este sector, las tres Kaishan KRSP2-300 actualmente en operación entregan un caudal combinado de 4,050 CFM, frente a una necesidad real para el año 2025 de 5,363 CFM, lo que genera un déficit estructural de 1,312.56 CFM, equivalente a un 32.4% de desfase.

Este déficit ha sido cuantificado bajo condiciones reales de operación a una altitud de 3,100 m.s.n.m., donde cada compresora alcanza una eficiencia de aproximadamente 1,350 CFM, considerando el impacto de la altitud sobre la densidad del aire.

3.9.1.1.2 Zona baja. Por otro lado, en el sistema de aire comprimido de la zona baja, las cinco compresoras Sullair TS32-300 actualmente en operación entregan un caudal combinado de 5,750 CFM, frente a una necesidad real para el año 2025 de 6,476.53 CFM, lo que genera un déficit estructural de 726.53 CFM, equivalente a un 12.6% de desfase.

Este déficit ha sido cuantificado bajo condiciones reales de operación a una altitud de 2,520 m.s.n.m., donde cada compresora alcanza una eficiencia de aproximadamente 1,150 CFM, considerando el impacto de la altitud sobre la densidad del aire.

3.9.1.2 Propuesta técnica de mejora.

3.9.1.2.1 Zona alta. Para garantizar la continuidad operativa, cubrir la demanda real de aire comprimido en la zona alta, y proporcionar margen de maniobra ante mantenimientos o variaciones de carga, se propone: Incorporar una cuarta compresora Kaishan KRSP2-300 para la operación de mina.

Esta unidad permitirá elevar la producción total de las compresoras a 5,400 CFM, con esta capacidad, se cubriría el consumo actual (6,086.96 SCFM) y se eliminaría el déficit operativo, manteniendo una presión constante de 100 psi, requerida para el correcto funcionamiento de las 34 jacklegs proyectadas para el uso en el año 2025. Además, esta medida ofrecería mayor redundancia operacional, minimizando el riesgo de paradas no programadas por mantenimiento o fallas mecánicas.

Respecto al sistema de red de aire comprimido se tiene un proyecto que se ejecutará con la construcción de las RC58 generando un ahorro anual de 5,694.6 USD y de la RC 59 que nos generará un ahorro de 3,023.3 USD por año teniendo un ahorro total de 8717.87 USD. En el anexo 7 se podrá ver el diagrama unifilar del proyecto planteado para la parte alta, esto incluye la reubicación de la casa de compresoras al nivel 3070.

Tabla 29*Ahorro energético por caída de presión – Proyecto RC 59*

PROYECTO CH RC 59					
REALIDAD ACTUAL					
Q	CAUDAL	517.5	CFM	0.24	m³/seg
Pi	PRESION	105	PSI	7.24	Bar
L	LONGITUD	600	m	600	m
D	DIAMETRO	4	pulg	101.6	mm
VAR(P)	CAIDA DE PRESION	1.31	PSI	0.09	Bar
POTENCIA CONSUMIDA NETA		2198.36	watts		
POTENCIA CONSUMIDA		2586.31	watts		
PROYECTADO					
Q	CAUDAL	1875	CFM	0.88	m³/seg
Pi	PRESION	105	PSI	7.24	Bar
L	LONGITUD	100	m	100	m
D	DIAMETRO	10	pulg	254	mm
VAR(P)	CAIDA DE PRESION	0.02	PSI	0.00	Bar
POTENCIA CONSUMIDA NETA		147.12	watts		
POTENCIA CONSUMIDA		173.08	watts		
AHORRO ENERGETICO		2413.23	watts		
AHORRO ENERGETICO		2.41	Kwatts		
AHORRO ENERGETICO POR AÑO		20850.33	Kwatts		
AHORRO		3023.30	\$		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30*Ahorro energético por caída de presión – Proyecto RC 58*

PROYECTO CH RC 58					
REALIDAD ACTUAL					
Q	CAUDAL	517.5	CFM	0.24	m³/seg
Pi	PRESION	105	PSI	7.24	Bar
L	LONGITUD	1100	m	1100	m
	DIAMETRO	4	pulg	101.6	mm
CAIDA DE PRESION		2.40	PSI	0.17	Bar
POTENCIA CONSUMIDA NETA		4030.33	watts		
POTENCIA CONSUMIDA		4741.57	watts		
PROYECTADO					
Q	CAUDAL	1837.5	CFM	0.87	m³/seg
Pi	PRESION	105	PSI	7.24	Bar
L	LONGITUD	120	m	120	m
D	DIAMETRO	10	pulg	254	mm
VAR(P)	CAIDA DE PRESION	0.03	PSI	0.00	Bar
POTENCIA CONSUMIDA NETA		166.66	watts		
POTENCIA CONSUMIDA		196.07	watts		
AHORRO ENERGETICO		4545.49	watts		
AHORRO ENERGETICO		4.55	Kwatts		
AHORRO ENERGETICO POR AÑO		39273.07	Kwatts		
AHORRO		5694.60	\$		
AHORRO TOTAL POR VAR(P)		8717.89	\$		

Fuente: Elaboración propia.

3.9.1.2.2 Zona baja. Para garantizar la continuidad operativa, cubrir la demanda real de aire comprimido en la zona baja, y proporcionar margen de maniobra ante mantenimientos o variaciones de carga, se plantea la necesidad de habilitar la alimentación de aire comprimido hacia mina a través de la sexta compresora actualmente destinada a planta, durante los periodos de alta demanda. Asimismo, se busca optimizar el uso de la compresora TS32-2, la cual presenta un bajo índice de disponibilidad. Adicional también se tienen proyectos para la distribución de la red de aire comprimido en la zona baja el cual se puede ver en el diagrama unifilar del anexo 8.

3.9.1.3 Justificación operativa y estratégica. La operación minera subterránea depende críticamente del suministro constante de aire comprimido, especialmente para labores de perforación. Las interrupciones por baja presión o falta de caudal pueden derivar en pérdida de turnos de trabajo, reducción de avance en galerías, y disminución de productividad general. Conjuntamente, la proyección de la demanda indica que el nivel actual de producción de aire está en el umbral de su capacidad máxima; por tanto, operar sin una cuarta compresora en la zona alta y solo operar con 3 compresoras en la zona alta pone en riesgo la continuidad del proceso.

3.9.1.4 Recomendaciones adicionales.

- Ejecutar un plan de integración del sistema de red de aire comprimido de la zona baja con el sistema de zona alta esto con el fin de garantizar una continuidad de nuestra operación ante la presencia de alguna falla.
- Se recomienda revisar la operatividad de los grupos electrógenos que sirven de respaldo ante cualquier imprevisto de energía, para el funcionamiento de las compresoras.
- Monitorear en tiempo real las variables críticas de presión, caudal y rendimiento de cada unidad desde el SCADA, para asegurar eficiencia energética y predictibilidad operativa.

- Establecer un programa rotativo de mantenimiento preventivo, considerando que el aumento del número de compresoras permitirá sacar equipos sin afectar la producción.
- Completar el reporte del sistema SCADA de la casa de compresoras de la zona alta que se tiene actualmente (anexo 9) e incluir dentro del diagrama a la cuarta compresora propuesta para la correcta integración.

3.9.2 Propuesta de mejora del sistema de agua

3.9.2.1 Problemática identificada. Del análisis realizado se concluye que:

- Las pérdidas de presión debidas a la fricción en el sistema de tuberías afectan la eficiencia del transporte de agua, especialmente en tramos de largo recorrido o con alta carga de accesorios.
- Algunos tramos presentan caídas de presión significativas, superando valores aceptables para un funcionamiento óptimo de las herramientas neumáticas.

3.9.2.2 Objetivo de la propuesta. Implementar un sistema eficiente de drenaje y optimización hidráulica que minimice las pérdidas de presión, y asegure el suministro adecuado de agua para los procesos mineros, con el fin de incrementar la disponibilidad y productividad de los equipos neumáticos en mina subterránea.

3.9.2.3 Acciones propuestas.

Limpieza de CR E @ Nivel 2995 – Gestión de 400 m³ de lodo acumulado. (A)

Actualmente, en el Crucero E del Nivel 2995, se presenta una acumulación significativa de aproximadamente 400 metros cúbicos de lodo, producto de infiltraciones, operación minera continua y limitaciones en el sistema de drenaje. Esta acumulación no solo afecta la transitabilidad del personal y equipos, sino que también representa un riesgo potencial para la seguridad y la eficiencia operativa, al limitar el acceso, aumentar los tiempos de traslado y dificultar las labores de ventilación y logística.

Se propone como medida de mejora la implementación de un plan de limpieza mecanizado y segmentado por tramos, utilizando bombas de lodos de alta capacidad, que permitan reducir el volumen de lodo de manera controlada y sostenida. La acción incluirá

el diseño de canales de drenaje provisionales, la disposición segura del lodo extraído en zonas designadas. Esta intervención permitirá recuperar el nivel operativo del crucero, mejorar las condiciones de trabajo y reducir los tiempos improductivos asociados al tránsito dificultoso. Asimismo, se recomienda evaluar de forma paralela las causas estructurales de acumulación de agua y lodo para implementar soluciones permanentes a nivel de infraestructura de drenaje. La propuesta se puede ver en el anexo 10.

Incremento del caudal de agua en 5 L/s desde el Nivel 3260 hacia el Sistema de alimentación de zona Baja. (B)

La zona baja de la Unidad Minera Santa María presenta una creciente demanda de agua debido al incremento en el número de equipos neumáticos operativos, especialmente jacklegs y sistemas auxiliares. Actualmente, el caudal suministrado desde los niveles superiores resulta insuficiente en ciertos tramos de mayor consumo, lo que genera pérdidas de presión, disminución en la eficiencia operativa de los equipos, y paradas intermitentes que afectan la continuidad de las labores.

Como acción de mejora, se propone incrementar en 5 litros por segundo (L/s) el caudal de agua desde el Nivel 3260 hacia el sistema de alimentación de la zona baja, mediante el refuerzo de la línea de conducción principal o la instalación de una derivación adicional conectada a la red existente. Esta mejora debe incluir la verificación del estado de las tuberías, instalación de reductores de presión, asegurando que el aumento del caudal no afecte la distribución general del sistema. Este incremento permitirá mejorar el rendimiento de los equipos neumáticos en operación, reducir tiempos muertos y asegurar una operación continua y eficiente en las labores de perforación y servicios en la zona baja.

Incremento de capacidad en zona Baja a partir de captación de agua del NV 2670. (C)

Se propone la instalación de un dique de contención en el ESCM 9875, programada, como parte de los trabajos de control hidráulico. Adicionalmente, se implementará la asignación de una bomba de 30 HP cuya función principal será alimentar hidráulicamente al dique para el control y direccionamiento del flujo hacia el ESCM 9870,

facilitando así el manejo de agua en puntos críticos de acumulación. Esta medida incrementará la capacidad operativa del sistema de drenaje local. Se recomienda complementar esta acción con monitoreo constante del caudal y mantenimiento programado de la bomba y estructuras hidráulicas asociadas. La propuesta se puede ver en el anexo 11.

Ejecución de dique en el Nivel 2160 para captación de aguas de rebose – Zona Faby. (D)

En la zona de influencia de Faby, se ha identificado la necesidad de mejorar el control del rebose. Se propone la ejecución de un nuevo dique de captación en el Nivel 2160, con el objetivo de recolectar de manera eficiente el agua de rebose generada por los diques de la zona de Faby. Este dique actuará como un punto de control hidráulico secundario, permitiendo redirigir o contener el flujo excedente y reducir la presión sobre las infraestructuras existentes. Asimismo, se considera su uso como dique en condición de stand-by, sirviendo como sistema de respaldo para proteger las labores de la CR-5000, RA 5990 y RA ELI 2. Esta intervención forma parte de un enfoque preventivo para asegurar la continuidad operativa en zonas de desarrollo clave y mantener condiciones seguras en el interior de la mina. La propuesta se puede ver en el anexo 12.

Ejecución de dique en la CR-600. (E)

En la labor CR-600, se ha identificado la necesidad de reforzar el sistema de manejo de aguas subterráneas debido a la presencia de infiltraciones y acumulación de agua en puntos críticos, que representan un riesgo potencial para la estabilidad del sostenimiento, las condiciones de tránsito, y la seguridad del personal. Como medida de mejora, se propone la ejecución de un dique de contención y control de caudal en la CR-600, con el objetivo de interceptar y regular el flujo de agua que ingresa o circula por esta labor. Este dique permitirá reducir significativamente la carga hidráulica aguas abajo, proteger las labores conectadas y facilitar un entorno operativo más seguro y eficiente. Esta acción forma parte de un conjunto de mejoras en infraestructura hidráulica

subterránea, orientadas a preservar la integridad de las labores y optimizar la continuidad operativa en zonas de desarrollo. La propuesta se puede ver en el anexo 13.

SÍNTESIS DE LA PROPUESTA

Nº	Descripción de la Acción	Objetivo	Beneficio Esperado	Ubicación
A	Limpieza del Crucero E @ Nivel 2995 (400 m³ de lodo)	Recuperar la transitabilidad y seguridad de la labor	Mejora del acceso, reducción de tiempos improductivos y mayor seguridad	Nivel 2995 – CR E
B	Incremento de 5 L/s al sistema de agua desde el Nivel 3260	Aumentar el caudal de agua para equipos en zona baja	Mayor eficiencia operativa y menor interrupción de equipos.	Zona Alta – Nivel 3260
C	Instalación de dique en el ESCM 9875 y asignación de bomba de 30 HP para ESCM 9870	Incrementar capacidad de manejo de agua y direccionamiento hidráulico	Incremento de agua en la Zona baja	Zona Alta - Nivel 2670
D	Ejecución de dique en Nivel 2160 para captar reboses de Faby	Controlar rebose de diques en zona de Faby	Protección de CR-5000, Rampa 5990 y Rampa Ely 2; mejor gestión hídrica	Nivel 2160 – Zona Faby
E	Ejecución de dique en la CR-600	Controlar ingreso de aguas subterráneas	Reducción de humedad, mayor seguridad estructural y continuidad operativa	CR-600

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

4.1 Discusión del objetivo específico 1

Identificar el nivel de producción en una mina subterránea aurífera, estimando el incremento potencial asociado a la mejora del sistema de aire comprimido y agua.

El análisis del indicador de toneladas diluidas (TON_DIL) mostró una proyección de incremento del 4.45 % en la producción minera para el año 2025 en comparación con 2024, equivalente a 25,361 toneladas adicionales. Este aumento, si bien no es drástico, representa una mayor exigencia operativa en el entorno subterráneo, lo que hace indispensable que los sistemas de soporte, como el aire comprimido y el agua, estén dimensionados correctamente y funcionen de manera eficiente para mantener o superar dicha proyección. La correlación entre la capacidad instalada y la continuidad del ciclo minero resalta la importancia de contar con un suministro confiable de estos recursos para evitar cuellos de botella que afecten la producción proyectada.

Además, este crecimiento esperado en la producción pone de relieve la necesidad de optimizar la infraestructura existente para evitar pérdidas por paradas imprevistas o limitaciones operativas. En este sentido, el estudio justifica que las acciones propuestas de mejora en los sistemas de aire comprimido y agua no solo permitirán sostener el crecimiento proyectado, sino que contribuirán a consolidar una operación más estable y resiliente frente a la variabilidad geomecánica y la demanda de los equipos subterráneos. La mejora de estos sistemas, por tanto, no solo tiene un impacto técnico, sino también económico y estratégico dentro del plan de producción de la mina.

El diagnóstico realizado reveló deficiencias estructurales en el diseño y mantenimiento de los sistemas, lo cual coincide con el estudio nacional de Pérez et al. (2020), quien evidenció que una mala gestión del aire comprimido provoca paradas operativas. A nivel local, Gutiérrez (2020) también identificó problemas similares, destacando que la falta de mantenimiento y el dimensionamiento incorrecto limitan el desempeño de los compresores. Sin embargo, se observó una diferencia con respecto al

caso descrito por Tong et al. (2021), donde el aire comprimido se analiza más como un sistema de almacenamiento energético integrado a redes eléctricas, lo cual va más allá del enfoque operativo directo en producción minera que se tuvo en este estudio. Aun así, ambas perspectivas coinciden en la necesidad de eficiencia energética.

El diagnóstico permitió identificar problemas como la pérdida de presión en la red de distribución de aire y deficiencias en la presión del agua, elementos clave señalados en el marco teórico como causantes de caídas en la productividad (Jones y Clark, 2020; López y Pérez, 2019). El estudio confirmó que compresores sobredimensionados, falta de mantenimiento y filtración inadecuada estaban deteriorando el rendimiento operativo. Esto refuerza lo propuesto por Smith et al. (2021), quienes indican que una evaluación técnica del sistema es esencial para evitar paradas no programadas. Asimismo, el diagnóstico permite sentar las bases para el rediseño de un sistema con una red de distribución optimizada, coherente con la necesidad teórica de mantener una presión de trabajo constante y calidad del aire adecuada.

4.2 Discusión del objetivo específico 2

Diseñar una propuesta técnica para la incorporación de compresoras que optimicen el suministro de aire, adaptadas a las condiciones operativas y geográficas de la mina.

El diagnóstico técnico evidenció un déficit estructural significativo en el sistema de aire comprimido, particularmente en la zona alta, donde las tres compresoras Kaishan KRSP2 300-100 actualmente operativas no alcanzan a cubrir la demanda real del año 2025 de 5,363 CFM, generando un déficit de 1,312.56 CFM. Esta limitación pone en riesgo la continuidad operativa de equipos neumáticos como los 34 jacklegs y compromete la estabilidad del ciclo de producción. Para revertir este escenario, se propone incorporar una cuarta compresora con capacidad de 1,350 CFM, lo cual permitiría no solo cubrir la demanda real, sino incorporar un margen operativo necesario para mantenimiento rotativo, fugas o fallas puntuales.

En la zona baja, aunque la capacidad instalada de las 5 compresoras Sullair TS-32-300 que alimentan a mina, cubre justo la demanda de 5,929 CFM. Se recomienda habilitar la alimentación de aire comprimido hacia mina a través de la sexta compresora actualmente destinada a planta, durante los periodos de alta. Asimismo, se busca optimizar el uso de la compresora TS32-2, la cual presenta un bajo índice de disponibilidad. Por tanto, la propuesta técnica apunta no solo a ampliar capacidad, sino también a estabilizar la presión de trabajo (100 psi) y mitigar los tiempos muertos por inestabilidad operativa, garantizando así la continuidad productiva de la mina.

Los resultados evidenciaron pérdidas significativas de aire y agua, lo que afectó la continuidad operativa. Este hallazgo coincide con López y Terrones (2020), quienes identificaron fugas intermitentes en un sistema industrial que generaban sobrecarga del compresor y grandes pérdidas económicas. Asimismo, Roque y Torres (2021) en su estudio en la cantera Caballo Viejo, concluyeron que la caída de presión en el sistema de aire comprometía el tiempo de perforación, aumentando los costos y reduciendo eficiencia. Por otro lado, la evaluación también mostró que el sistema hidráulico ineficiente generaba un impacto negativo en la recuperación de mineral, en línea con lo planteado por López et al. (2019), quienes demostraron que el control y mantenimiento adecuado del sistema de agua mejora la productividad minera.

La propuesta de mejora incorpora elementos como el redimensionamiento de compresores, automatización del control de presión y sistemas de filtración, en concordancia con lo desarrollado por García et al. (2020) y Martínez et al. (2022) sobre la importancia de un diseño eficiente para garantizar la disponibilidad operativa. Este diseño busca superar los desafíos señalados por Vásquez y Romero (2019), tales como la obsolescencia de equipos y la subutilización del recurso. Además, la propuesta está alineada con el enfoque de sostenibilidad presentado por Gutiérrez et al. (2021), ya que contempla el uso responsable del agua industrial y promueve la eficiencia energética. En suma, se reafirma que la modernización tecnológica y el mantenimiento preventivo son

esenciales para garantizar un sistema de soporte robusto y una producción minera sostenible.

4.3 Discusión del objetivo específico 3

Diseñar una propuesta técnica para mejora de los sistemas hidráulicos que optimicen el suministro de agua y reduzcan pérdidas por fricción y condensación.

El análisis de balance de caudales mostró un déficit global de 9 litros por segundo en la red hidráulica, siendo insuficientes los ingresos actuales frente a una necesidad de 43 l/s. Esto afecta directamente el rendimiento de Jumbos y Jacklegs, los cuales requieren un suministro constante y controlado para operar eficientemente.

Ante ello, la propuesta técnica considera acciones integrales como la instalación de sistemas automáticos de drenaje en tanques receptores para eliminar condensados, el redimensionamiento de tuberías según la pérdida por fricción, y la independización de caudales en zonas críticas mediante diques estratégicos. Estas medidas permitirán optimizar la distribución del agua, reducir pérdidas por presión, y asegurar la disponibilidad para zonas operativas sensibles como la CR-600. La intervención, en conjunto, busca estabilizar el sistema hidráulico, prevenir interrupciones en los ciclos de perforación y fortalecer la seguridad operativa en el entorno subterráneo.

La propuesta técnica desarrollada se alinea con la experiencia de Roque y Torres (2021), quienes también propusieron la implementación de compresores más eficientes para mejorar los tiempos operativos y reducir costos. De igual forma, el estudio de Lima Huiman (2022) respalda el uso de herramientas de mantenimiento sistemático para mejorar la eficiencia de estos sistemas, lo cual fue considerado en la propuesta. En cuanto al sistema hidráulico, los resultados están en sintonía con lo descrito por López et al. (2021), quienes sostienen que mantener una presión constante mejora la separación de minerales. Los antecedentes internacionales como los de Jones & Clark (2018) también refuerzan la necesidad de un diseño eficiente del sistema de agua. No se detectan discrepancias significativas; por el contrario, hay una notable convergencia en la necesidad de integrar soluciones técnicas para optimizar la producción.

La propuesta de mejora incorpora elementos como el redimensionamiento de compresores, automatización del control de presión y sistemas de filtración, en concordancia con lo desarrollado por García et al. (2020) y Martínez et al. (2022) sobre la importancia de un diseño eficiente para garantizar la disponibilidad operativa. Este diseño busca superar los desafíos señalados por Vásquez y Romero (2019), tales como la obsolescencia de equipos y la subutilización del recurso. Además, la propuesta está alineada con el enfoque de sostenibilidad presentado por Gutiérrez et al. (2021), ya que contempla el uso responsable del agua industrial y promueve la eficiencia energética. En suma, se reafirma que la modernización tecnológica y el mantenimiento preventivo son esenciales para garantizar un sistema de soporte robusto y una producción minera sostenible.

4.4 Discusión de Resultados – Objetivo General

Proponer el mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua para incrementar la producción en una mina subterránea aurífera.

La propuesta de mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua se fundamenta en el análisis técnico de la infraestructura actual y su impacto en los niveles de producción. Los resultados evidencian que tanto el sistema de aire como el de agua presentan déficits operativos que afectan directamente la continuidad del ciclo productivo en una mina subterránea aurífera. En el caso del aire comprimido, se identificaron deficiencias de caudal en ambas zonas operativas (alta y baja), que comprometen la eficiencia de los equipos neumáticos, como los Jacklegs, esenciales para las labores de perforación. La incorporación de compresoras adicionales, junto con un sistema de control y monitoreo adecuado, permite subsanar estos déficits, garantizando presión y caudal constantes, fundamentales para evitar tiempos muertos e interrupciones operativas.

Es necesario considerar que la evaluación del sistema de agua reveló problemas estructurales relacionados con acumulación de lodo, presencia de agua en las líneas de aire y pérdidas por fricción, que afectan tanto la seguridad como la operatividad. Las acciones propuestas, como la limpieza de niveles, la instalación de diques, el refuerzo de

bombeo y la independización de caudales, permiten optimizar el manejo hídrico y minimizar los riesgos asociados a inundaciones y fallos en el suministro. En conjunto, estas mejoras propositivas no solo responden a las condiciones geográficas y operativas de la mina, sino que proyectan un incremento tangible en la producción, con base en la recuperación de eficiencia operativa, reducción de paradas no programadas y mayor confiabilidad en los sistemas auxiliares de soporte a la actividad minera subterránea.

Los resultados de la presente investigación confirman que la mejora de los sistemas de aire comprimido y agua permite optimizar la productividad en minería subterránea, en concordancia con lo planteado por Smith et al. (2021), quienes destacan el rol esencial del aire comprimido en la operación de equipos y ventilación en minas. Asimismo, el estudio de Jones & Clark (2018) valida la relevancia de una gestión eficiente del agua para la flotación y separación de metales, procesos también presentes en la operación analizada. A nivel nacional, lo planteado por Pérez et al. (2020) refuerza los hallazgos: deficiencias en el diseño y mantenimiento del sistema generan paradas inesperadas, afectando la producción, situación corregida en la propuesta desarrollada.

Además, se observaron coincidencias con el estudio local de López et al. (2021), que resalta la necesidad de mantener una presión constante en el sistema de agua para garantizar eficiencia. Esto se logró en el caso evaluado mediante mejoras en las líneas hidráulicas y la reducción de pérdidas. La propuesta presentada integra tanto aspectos técnicos como económicos, reafirmando su viabilidad y alineándose con los beneficios esperados descritos por los antecedentes.

Los resultados del estudio muestran que la optimización del sistema de aire comprimido y agua contribuye directamente al aumento de la producción minera, lo cual coincide con lo expuesto por Rojas y Vargas (2021), quienes afirman que la eficiencia en estos sistemas mejora la operatividad de los equipos y reduce los tiempos muertos. Desde el marco teórico, esta relación se explica por la importancia del aire comprimido como fuente de energía en la perforación, transporte y operación de maquinaria pesada (Smith et al., 2021), así como por el papel crítico del agua en los procesos de concentración y

separación de minerales (Gutiérrez et al., 2021). Además, la propuesta de mejora se sostiene en la necesidad de diseñar sistemas energéticamente eficientes y automatizados que aseguren la presión y el flujo adecuados, lo cual impacta positivamente en todas las etapas de la producción minera, desde la extracción hasta la comercialización.

Conclusiones

La propuesta de mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua representa una solución técnica viable y necesaria para incrementar la producción en una mina subterránea aurífera. La implementación de compresoras adicionales, el control de fugas y la optimización del sistema hidráulico permiten garantizar un suministro continuo, eficiente y seguro de recursos críticos para la operación minera. Estas mejoras fortalecen la estabilidad operativa, reducen tiempos improductivos y contribuyen directamente al cumplimiento de los volúmenes proyectados de producción.

La mejora de los sistemas de aire comprimido y agua tiene un impacto directo en el aumento de la producción minera. La proyección para el año 2025 en la UEA Libertad muestra un incremento del 4.45 % en las toneladas diluidas, equivalente a 25,361 toneladas adicionales, lo cual evidencia una mayor exigencia operativa que justifica la necesidad de una infraestructura más eficiente. Este incremento proyectado valida la importancia de optimizar los sistemas auxiliares que garantizan la continuidad y estabilidad del ciclo productivo subterráneo.

El análisis del sistema de aire comprimido en las zonas alta y baja demuestra que la capacidad instalada es insuficiente para cubrir la demanda proyectada. En la zona alta, se identificó un déficit de 1,312.56 CFM que compromete la eficiencia operativa de los equipos neumáticos. La propuesta de incorporar una cuarta compresora Kaishan KRSP2-300 busca mejorar la disponibilidad de caudal, eliminando el desfase operativo y aumentando la confiabilidad del sistema.

El sistema hidráulico presenta deficiencias tanto en la distribución como en el control de agua, lo que afecta negativamente la operación subterránea. La presencia de agua en las líneas de aire comprimido y la pérdida de presión por fricción y fugas representan problemas críticos. La propuesta incluye mejoras en drenaje, control de caudales, ejecución de diques y reemplazo de tuberías, para optimizar el sistema de agua, asegurando el abastecimiento adecuado y proteger la infraestructura minera.

Recomendaciones

Recomendaciones para la gerencia de la mina:

Se recomienda que la gerencia priorice la adquisición de equipos modernos y eficientes, como compresores de alta capacidad con variadores de velocidad, sensores de presión y sistemas de monitoreo en tiempo real. Esta inversión permitirá mejorar la eficiencia energética, reducir pérdidas y garantizar una distribución adecuada de recursos en todas las zonas operativas de la mina.

Implementar un plan de mantenimiento preventivo sistemático

para los sistemas de aire y agua, con inspecciones regulares, limpieza de filtros y verificación de presiones. Esto ayudará a evitar paradas inesperadas, prolongar la vida útil de los equipos y mantener la continuidad de las operaciones productivas, asegurando la disponibilidad de los sistemas críticos.

Es fundamental que la gerencia promueva capacitaciones periódicas en el uso, mantenimiento y monitoreo de los sistemas de aire comprimido y agua. Estas acciones fortalecerán las competencias del personal y permitirán una mejor gestión de los recursos, contribuyendo a una operación más segura, eficiente y alineada con los estándares de sostenibilidad.

Recomendaciones para el personal operario:

El personal operario debe realizar revisiones diarias a los equipos de aire comprimido y agua, prestando especial atención a fugas, vibraciones anormales o fluctuaciones de presión. Ante cualquier irregularidad, es importante reportar de inmediato al área de mantenimiento para evitar daños mayores y asegurar la continuidad operativa.

Se recomienda que los operarios sigan de forma rigurosa los protocolos establecidos para la manipulación de equipos y sistemas, incluyendo el encendido y apagado de compresores, el uso adecuado del agua y la verificación de válvulas y controles. Esta disciplina operativa minimizará errores, reducirá el desgaste de los equipos y mejorará el rendimiento general del sistema.

Referencias bibliográficas

- Arispe, C., Yangali, J., Guerrero, M., Lozada, O., Acuña, L., & Arrellano, C. (2020). *La investigación científica*. Ecuador: UÍDE.
<https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/4310/1/LA%20INVESTIGACI%C3%93N%20CIENT%8DFICA.pdf>
- Bazaluk, O., Ashcheulova, O., Mamaikin, O., Khorolskyi, A., Lozynskyi, V., & Saik, P. (2022). *Innovative Activities in the Sphere of Mining Process Management*. *Frontiers in Environmental Science*, 10.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.878977>
- Cabezas, E. (2018). *Introducción a la metodologíade la investigación científica*. Ecuador: ESPE. Universidad de las Fuerzas Armadas.
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/15424/1/Introduccion%20a%20la%20Metodologia%20de%20la%20investigacion%20cientifica.pdf>
- Calzada, B. (2022). *Innovation in mining: what are the challenges and opportunities along the value chain for Latin American suppliers? nnovación en minería: ¿cuáles son los desafíos y oportunidades a lo largo de la cadena de valor para los proveedores latinoamericanos?*, 35, 35-51. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13563-021-00251-w>
- Fraser, J. (2021). *Mining companies and communities: Collaborative approaches to reduce social risk and advance sustainable development*. *Resources Policy*, 74.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.02.003>.
- Gibbs, C. W. (1971). *Compressed air and gas data*.
- Hernández, R., et al. (2018). *Metodología de la investigación*. México: Mc Graw Hill Education. <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Huiman Yangali, S. C. (2022). *Implementación de la metodología (TPM) para incrementar la productividad en el Suministro de Aire Comprimido de la empresa SIMA, CALLAO 2021*. (Tesis de Ingeniería Industrial): Universidad César Vallejo.

https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/91635/Huiman_YSD-C-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Igogo, T., Awuah-Offei, K., Newman, A., Lowder, T., & Engel, J. (2021). *Integrating renewable energy into mining operations: Opportunities, challenges, and enabling approaches*. *Applied Energy*, 300.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117375>

López Reyna, L. M., & Terrones Laureano, L. E. (2020). *Diseño de un sistema de aire comprimido para eliminar fugas durante el proceso de carbonatación en Arca Continental Lindley – Trujillo*. (Tesis de Ingeniero Mecánico Electricista): Universidad César Vallejo.

<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/51042>

Luckeneder, S., Giljum, S., Schaffartzik, A., Maus, V., & Tost, M. (2021). *Surge in global metal mining threatens vulnerable ecosystems*. *Global Environmental Change*, 69.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102303>

Pérez, M. (2017). *Minería de datos*. Alfaomega.

<https://documat.unirioja.es/servlet/libro?codigo=868986>

Ponomarenko, T., Nevskaya, M., & Jonek, I. (2021). *Mineral Resource Depletion Assessment: Alternatives, Problems, Results*. *Sustainability*, 13(2).

<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su13020862>

Reza Razmi, A., Hasan, H. A., Pourahmadiyan, A., & Torabi, M. (2021). *Investigation of a combined heat and power (CHP) system based on biomass and compressed air energy storage (CAES)*. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101253>

Roque Boggiano, J. J., & Torres Marin, C. A. (2021). *Mejora del Sistema de Aire Comprimido para Optimizar La Perforación en La Cantera Caballo Viejo Jauja, Junín*. (Tesis de Ingeniero de Minas): Universidad César Vallejo.

https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/100614/Torres_MCA-Roque_BJJ-SD.pdf?sequence=4&isAllowed=y

- Tong, Z., Cheng, Z., & Tong, S. (2021). *Una revisión sobre el desarrollo del almacenamiento de energía de aire comprimido en China: desafíos técnicos y económicos para la comercialización. Reseñas sobre energías renovables y sostenibles*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110178>
- Vera, J.; et al. (2018). *Fundamentos de metodología de la investigación científica*. Guayaquil, Ecuador: Editorial Grupo Compás.
<http://142.93.18.15:8080/jspui/handle/123456789/274>
- Zang, Y. Y., & Zhen, K. L. (2018). *Un diseño integrado para un sistema híbrido combinado de refrigeración, calefacción y energía con almacenamiento de energía de aire comprimido*. *Energía aplicada*, 210, 1151-1166.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.005>

Anexos

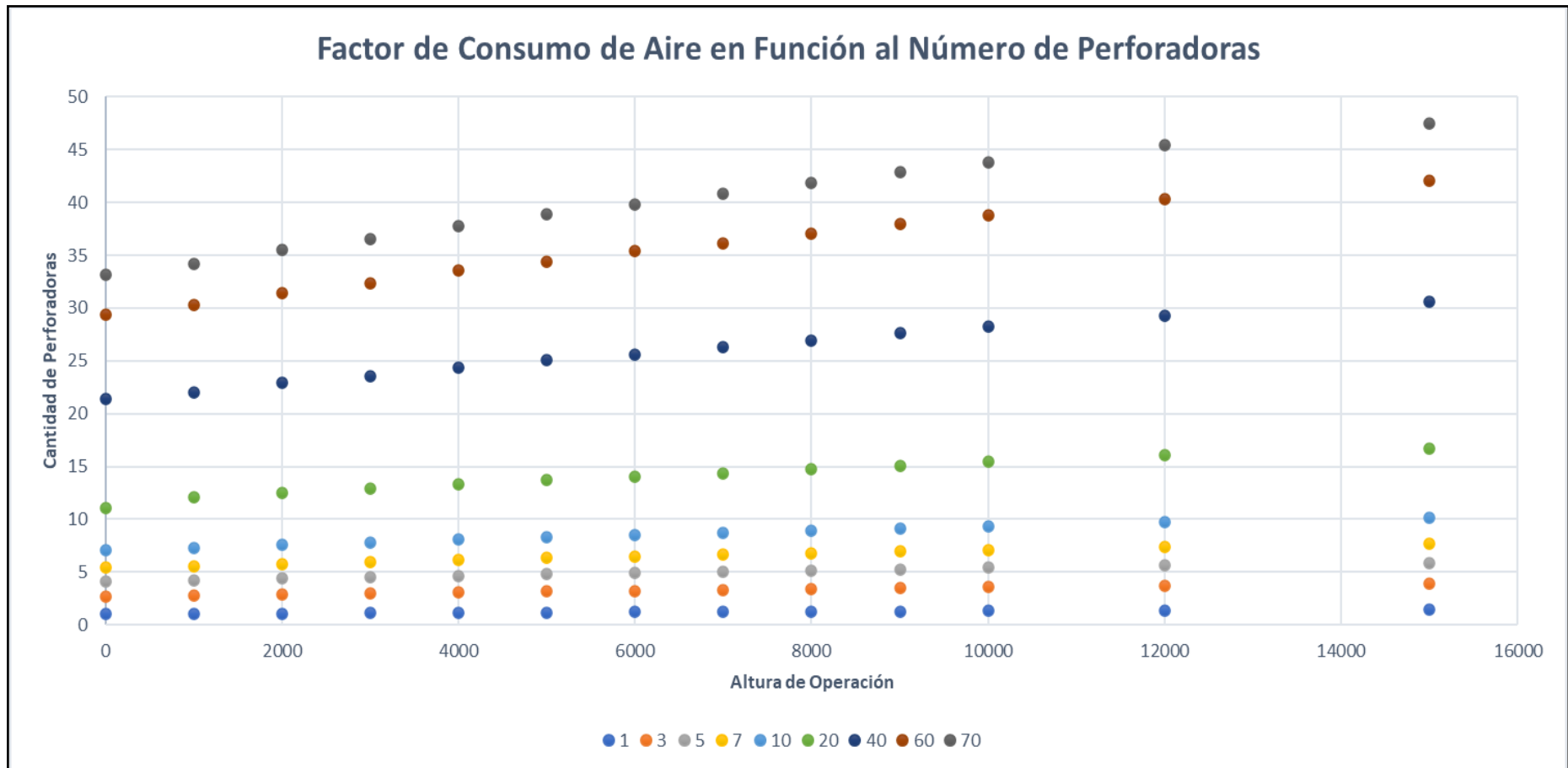
	Pág.
Anexo 1 : Matriz de consistencia	1
Anexo 2 : Factor de simultaneidad a distintos niveles de operación sobre el nivel del mar	2
Anexo 3 : Diagrama unifilar de la red de aire comprimido de la zona baja (nivel 2520)....	3
Anexo 4 : Diagrama unifilar de la red de aire comprimido de la zona alta (nivel 3100).....	4
Anexo 5 : Diagrama unifilar de la red de agua de la zona baja	5
Anexo 6 : Diagrama unifilar de la red de agua de la zona alta	6
Anexo 7 : Diagrama unifilar de proyectos en la red de aire comprimido de la zona baja (nivel 2520)	7
Anexo 8 : Diagrama unifilar de proyectos en la red de aire comprimido de la zona baja (nivel 2520)	8
Anexo 9 : Sistema SCADA zona alta (nivel 3100)	9
Anexo 10 : Limpieza de lodo en CR E @ Nivel 2995	10
Anexo 11: Incremento de Capacidad en zona Baja a partir de captación de agua del NV 2670.....	11
Anexo 12: Ejecución de Dique en el Nivel 2160 para captar el agua de rebose de los Diques de la zona de Faby.....	12
Anexo 13: Ejecución de Dique en la CR-600	13

Anexo 1: Matriz de consistencia

Formulación del problema	Objetivos	Hipótesis	Variable(s) y dimensiones	Metodología
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	Variable dependiente: Y: Producción Dimensiones: • Eficiencia • Eficacia. Variable independiente: X1: Aire comprimido. X2: Agua. Dimensiones: • Sistema de aire comprimido en operaciones mineras • Sistema de agua en operaciones mineras.	Paradigma y enfoque: Positivista y cuantitativo Nivel y tipo de investigación: Nivel explicativo, aplicada. Diseño: Pre experimental, con un grupo control, con pre y post test. Población y muestra: Cía. minera La Poderosa.. Técnicas e instrumentos de recolección de datos: Técnica: Observación. Instrumento: Guía de observación. Técnica de procesamiento Estadística descriptiva: Tablas y figuras estadísticas. Estadística inferencia: Prueba de normalidad y prueba estadística
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas		
¿Cómo influye el mejoramiento del sistema de aire comprimido y agua en el incremento de la producción en las minas subterráneas auríferas?	Mejorar el sistema de aire comprimido y agua en las minas subterráneas auríferas, con el fin de incrementar la producción.	La mejora de los sistemas de aire comprimido y agua en las minas subterráneas auríferas incrementará la producción y mejorará la eficiencia operativa, reduciendo costos y mejorando la rentabilidad de la operación minera.		
• ¿Cómo influye el mejoramiento del sistema de aire comprimido en el incremento de la producción en las minas subterráneas auríferas? • ¿Cómo influye el mejoramiento del sistema de agua en el incremento de la producción en las minas subterráneas auríferas?	• Mejorar el sistema de aire comprimido en las minas subterráneas auríferas, con el fin de incrementar la producción. • Mejorar el sistema de agua en las minas subterráneas auríferas, con el fin de incrementar la producción.	• La mejora del sistema de aire comprimido en las minas subterráneas auríferas incrementará la producción y mejorará la eficiencia operativa, reduciendo costos y mejorando la rentabilidad de la operación minera. • La mejora del sistema de agua en las minas subterráneas auríferas incrementará la producción y mejorará la eficiencia operativa, reduciendo costos y mejorando la rentabilidad de la operación minera.		

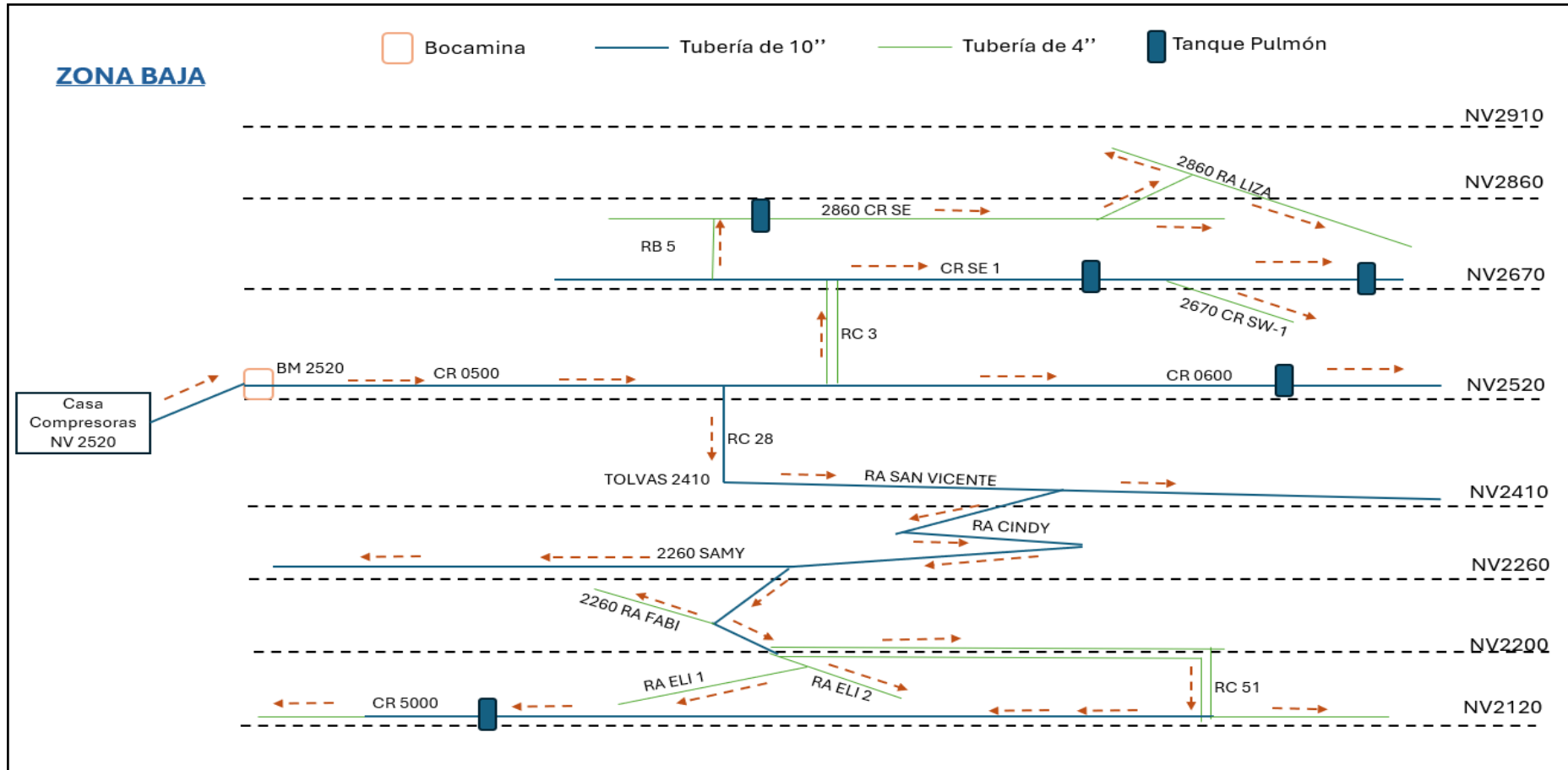
Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2: Factor de simultaneidad a distintos niveles de operación sobre el nivel del mar



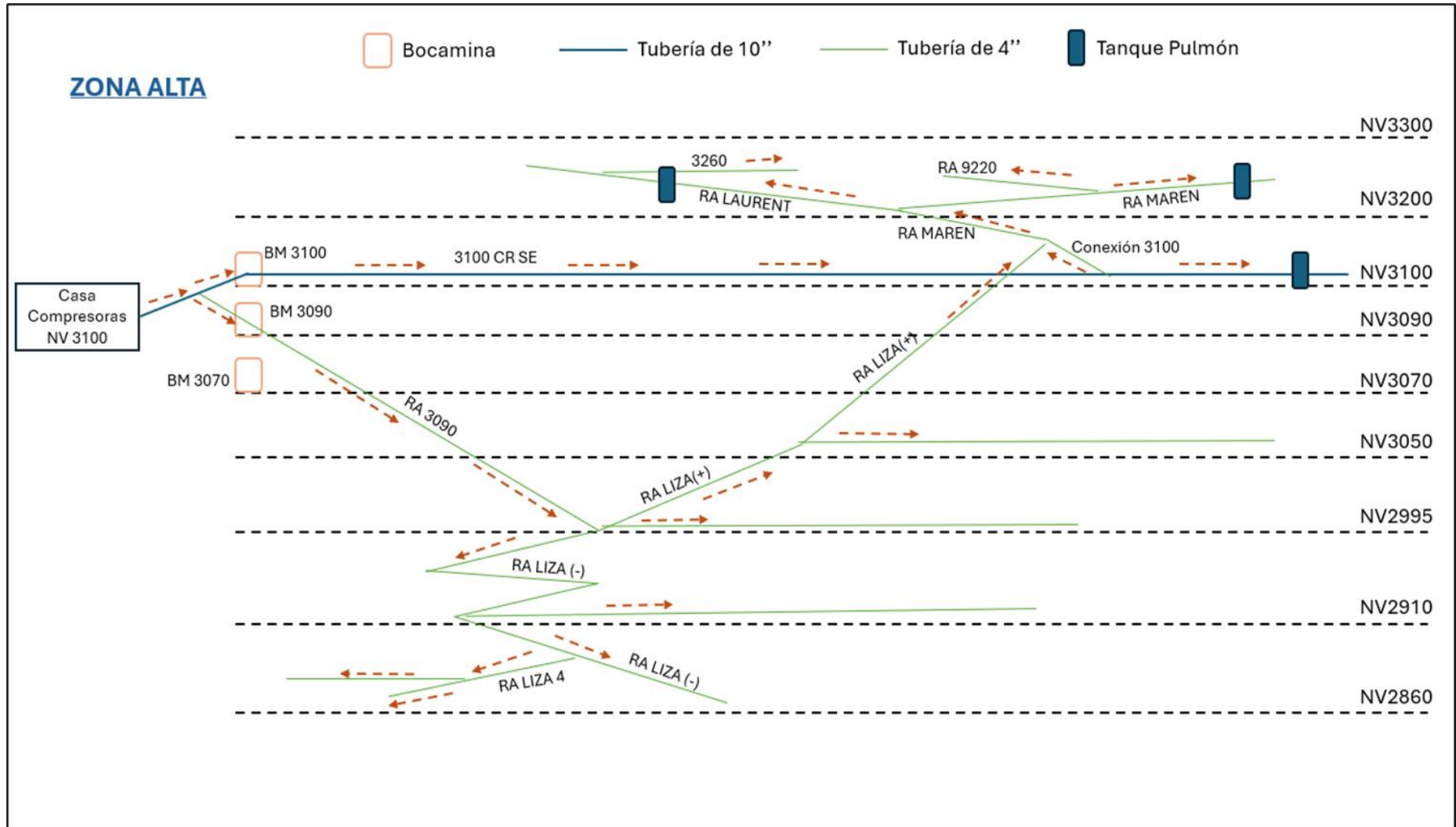
Fuente: Gibbs, C. W. (1971). Compressed air and gas data.

Anexo 3: Diagrama unifilar de la red de aire comprimido de la zona baja (nivel 2520)



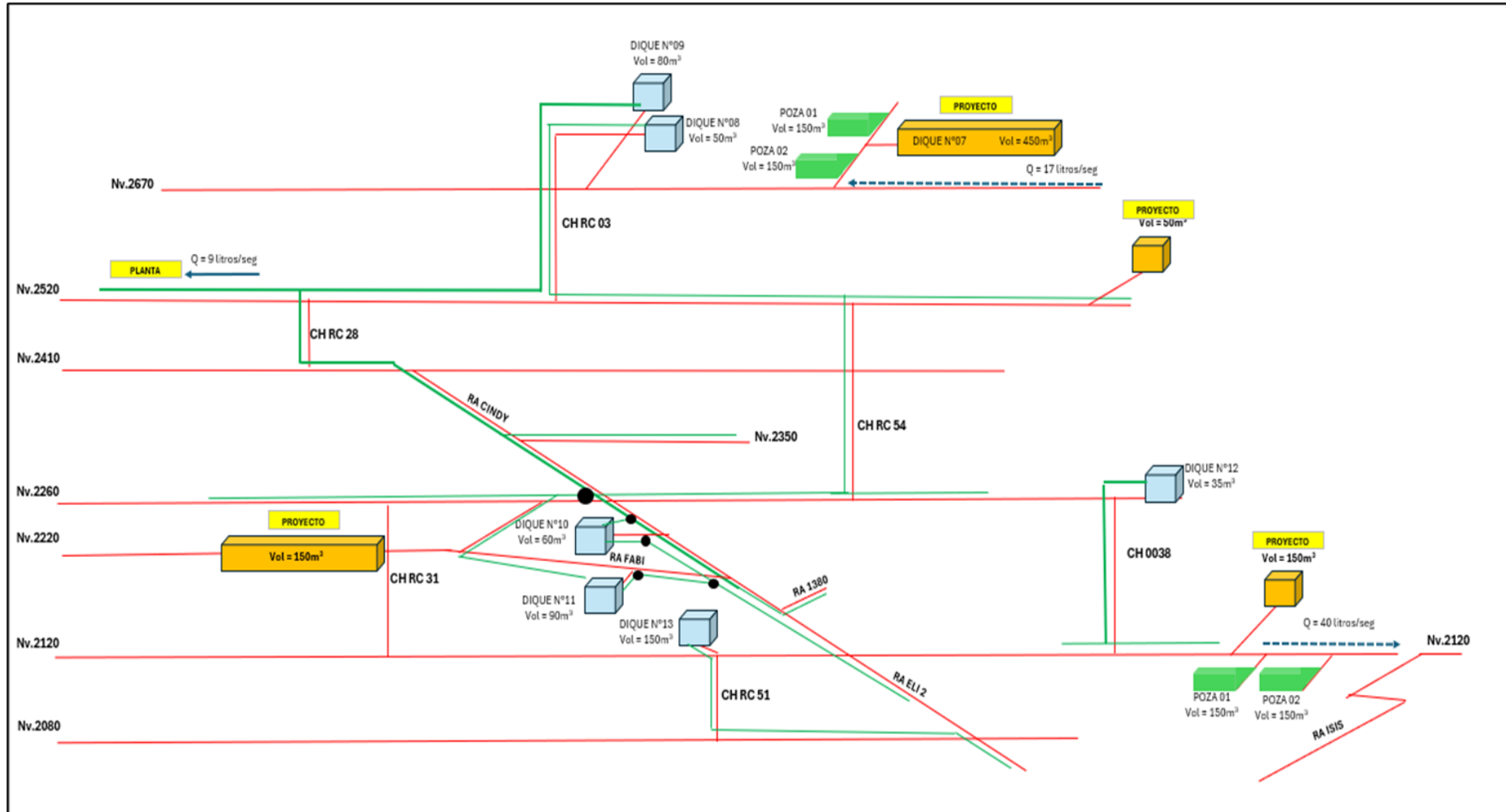
Fuente: Compañía Minera Poderosa

Anexo 4: Diagrama unifilar de la red de aire comprimido de la zona alta (nivel 3100)



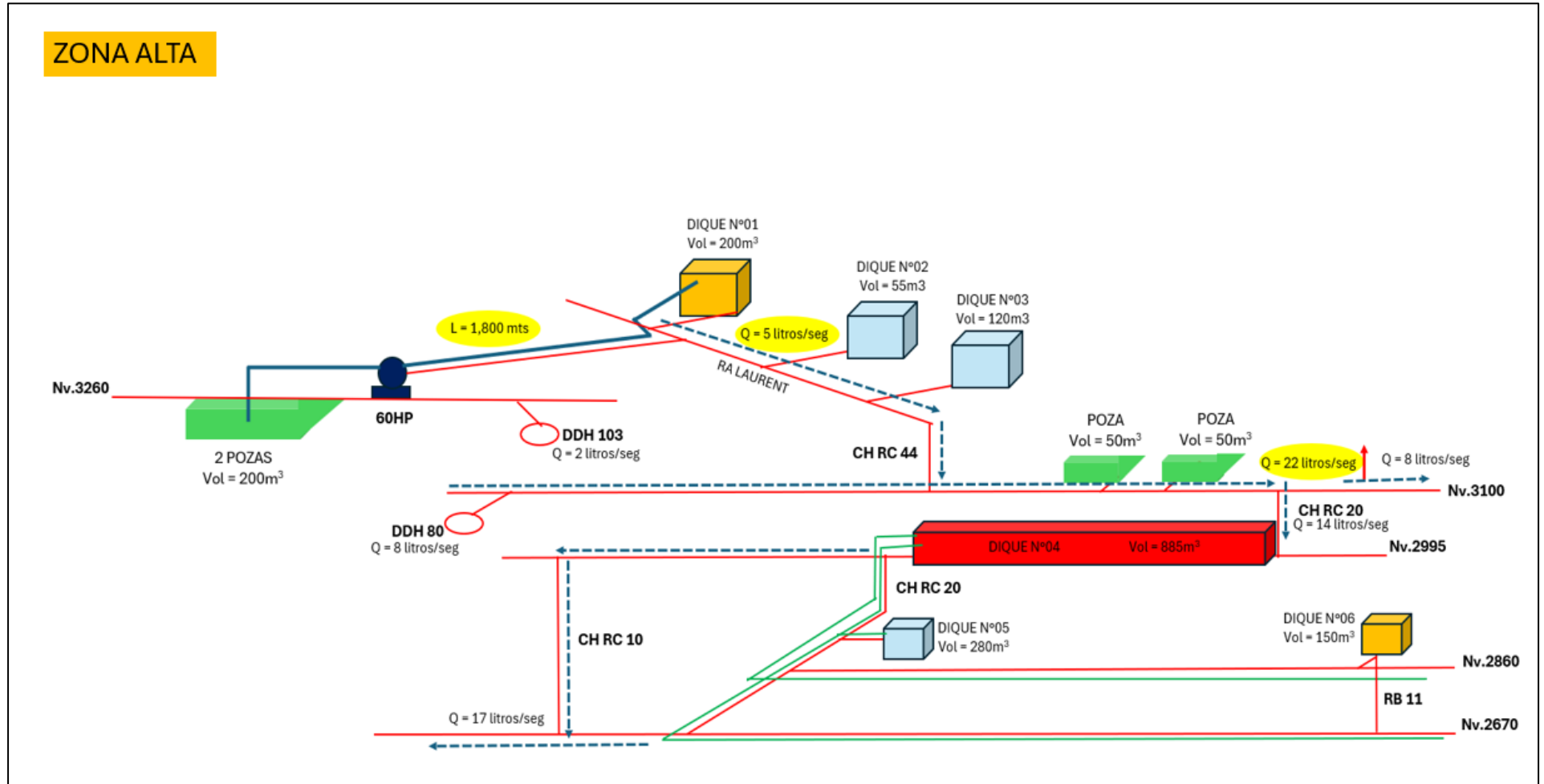
Fuente: Compañía Minera Poderosa

Anexo 5: Diagrama unifilar de la red de agua de la zona baja



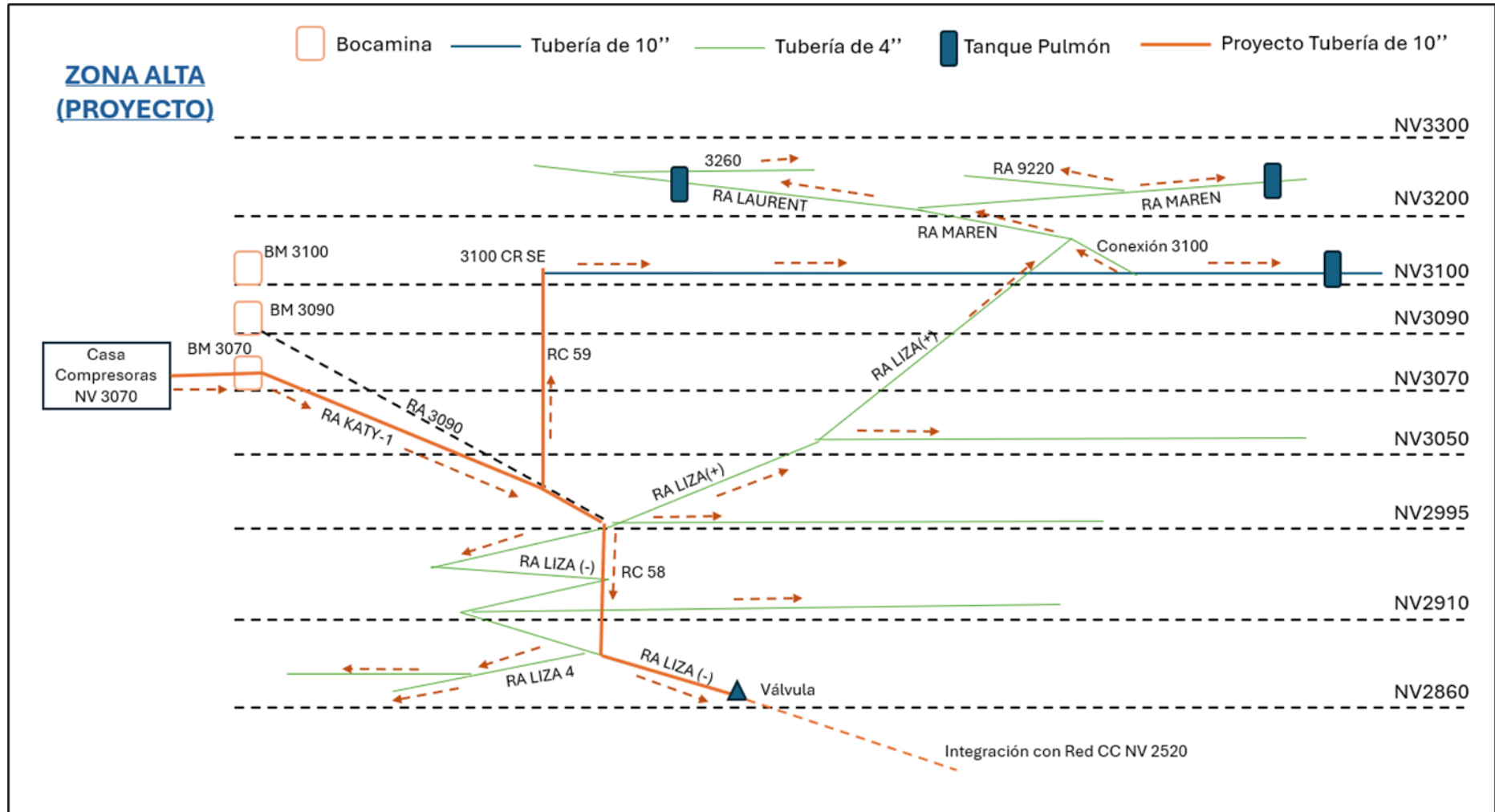
Fuente: Compañía Minera Poderosa

Anexo 6: Diagrama unifilar de la red de la zona alta



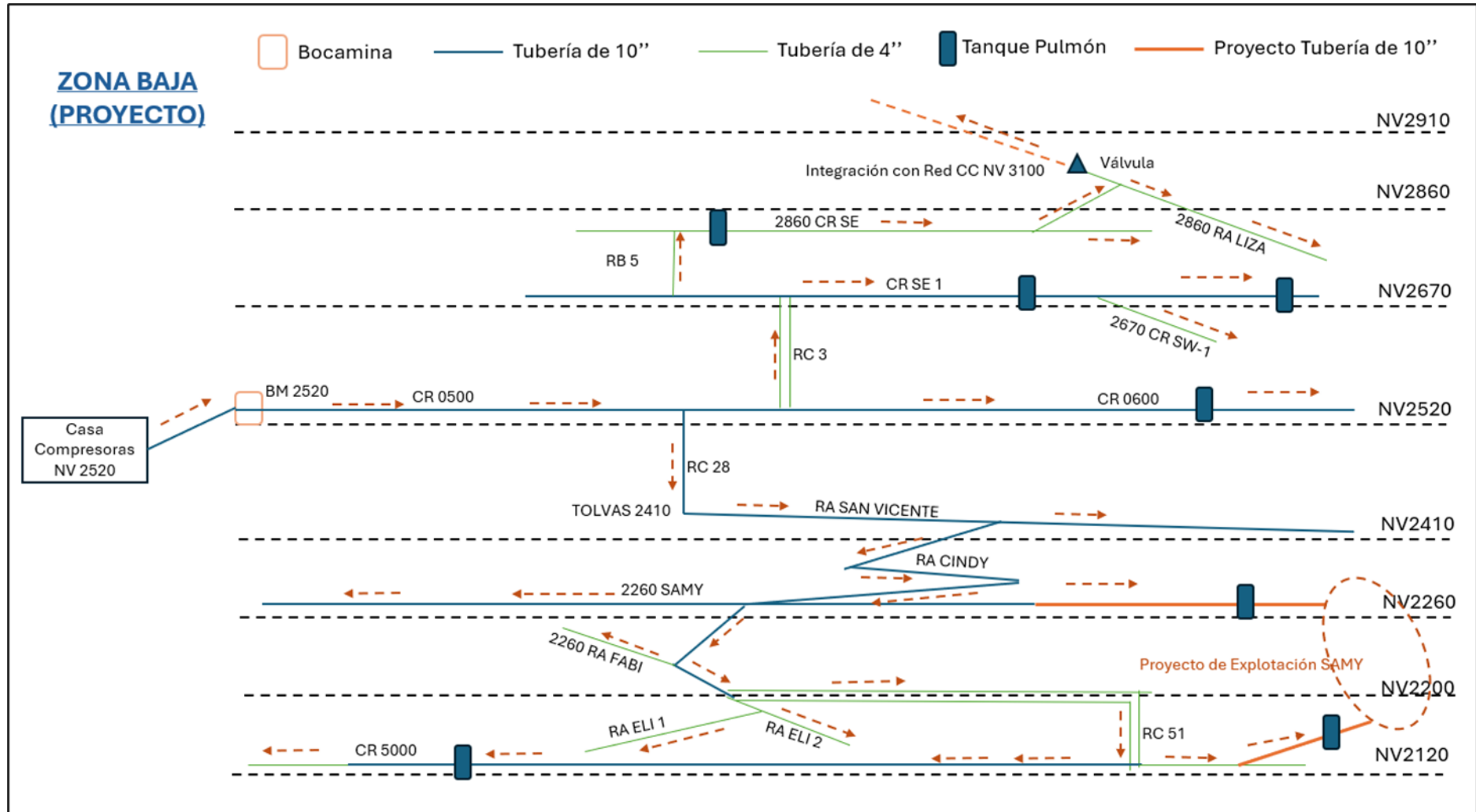
Fuente: Compañía Minera Poderosa

Anexo 7: Diagrama unifilar de proyectos en la red de aire comprimido de la zona alta (nivel 3100)



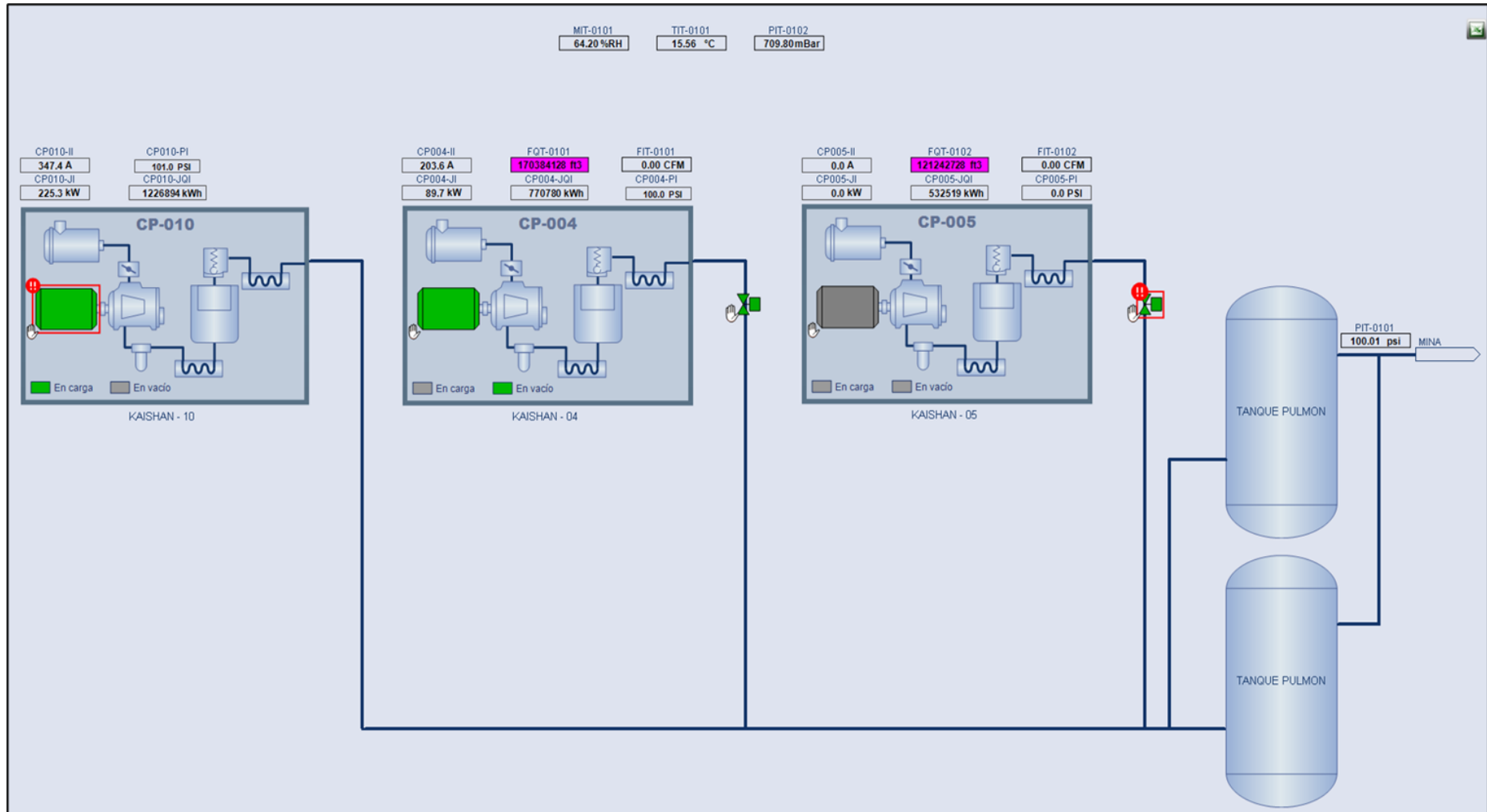
Fuente: Compañía Minera Poderosa

Anexo 8: Diagrama unifilar de proyectos en la red de aire comprimido de la zona baja (nivel 2520)



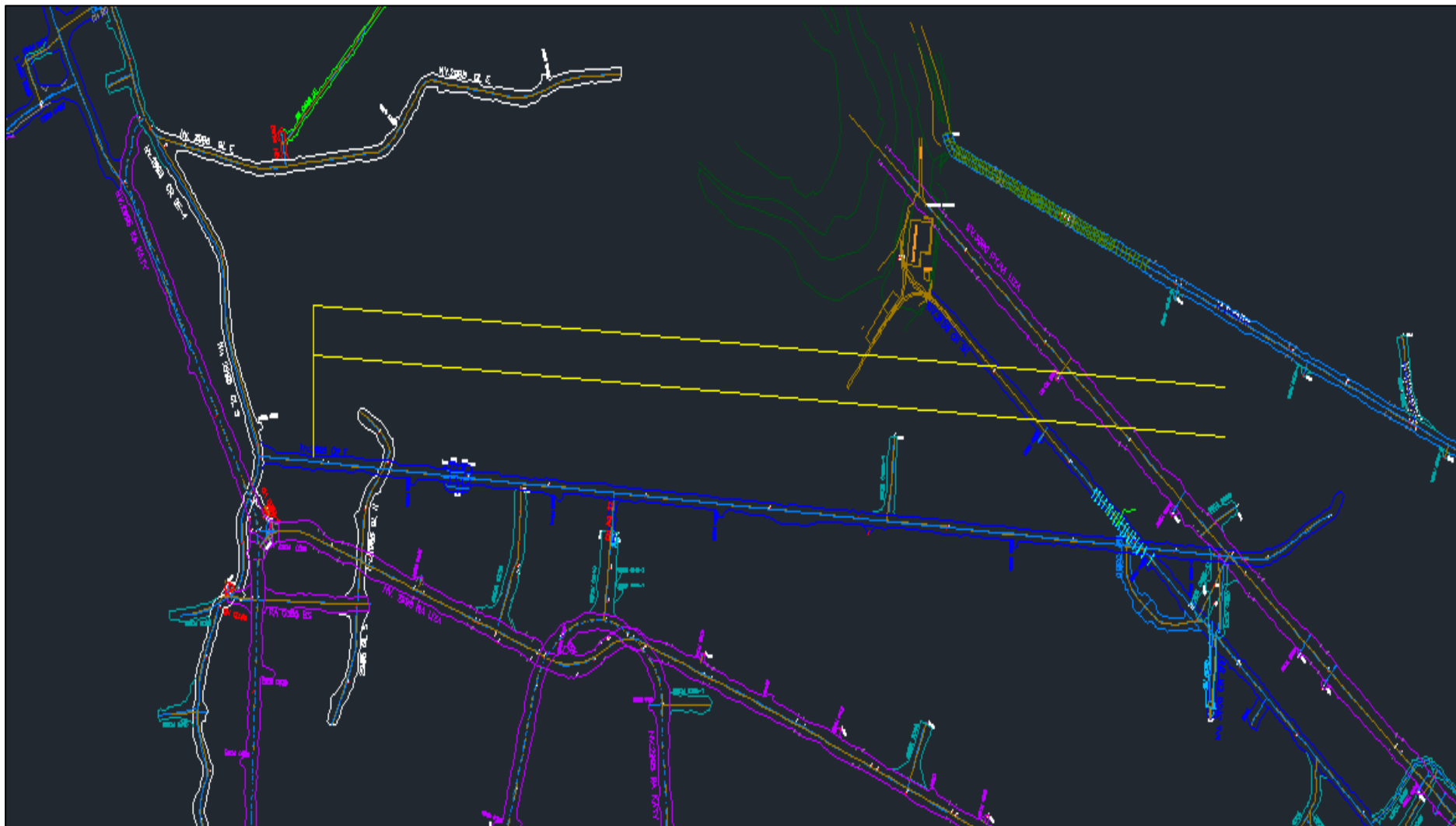
Fuente: Compañía Minera Poderosa

Anexo 9: Sistema SCADA zona alta (nivel 3100)



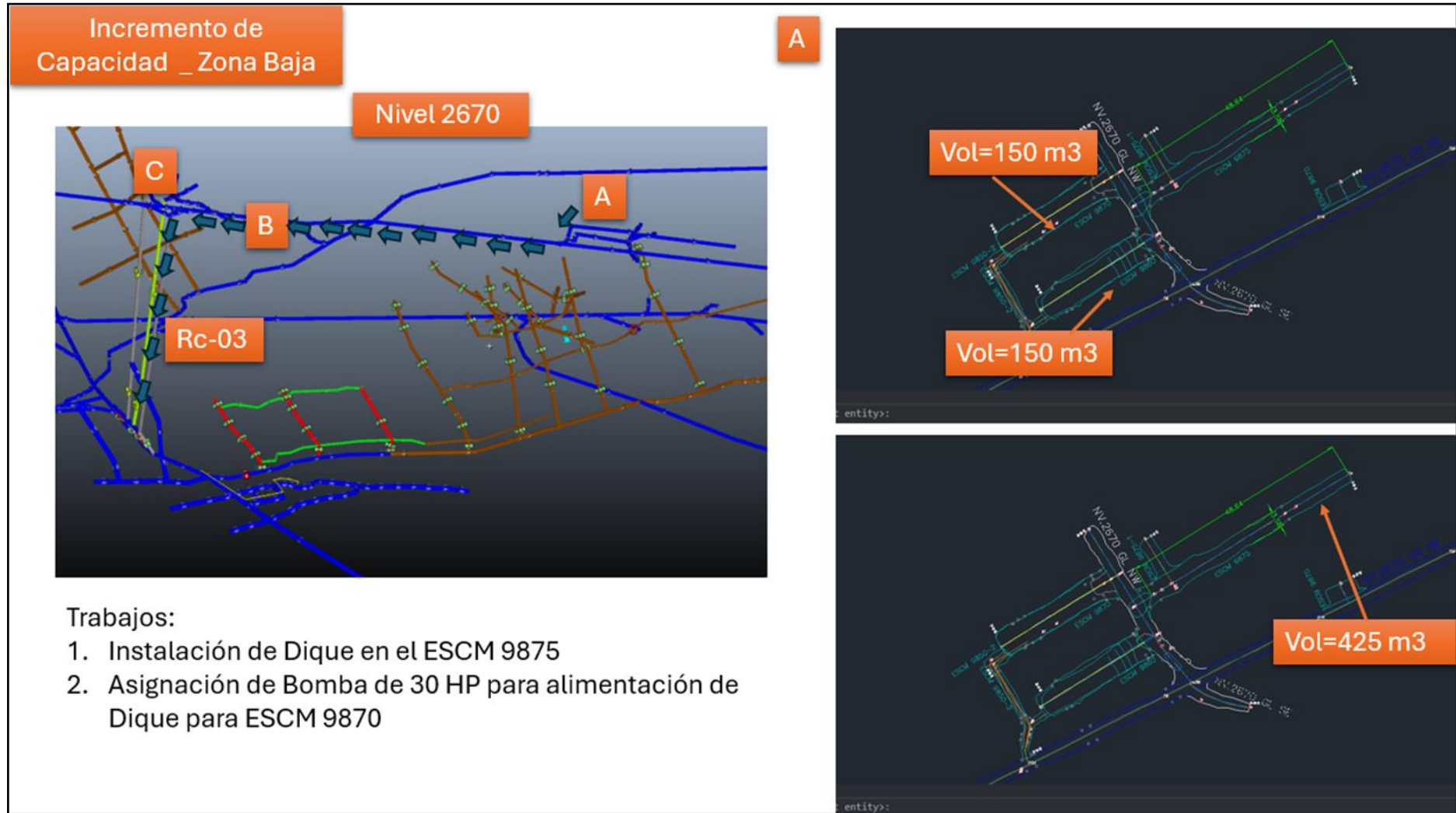
Fuente: Compañía Minera Poderosa

Anexo 10: Limpieza de lodo en CR E @ Nivel 2995



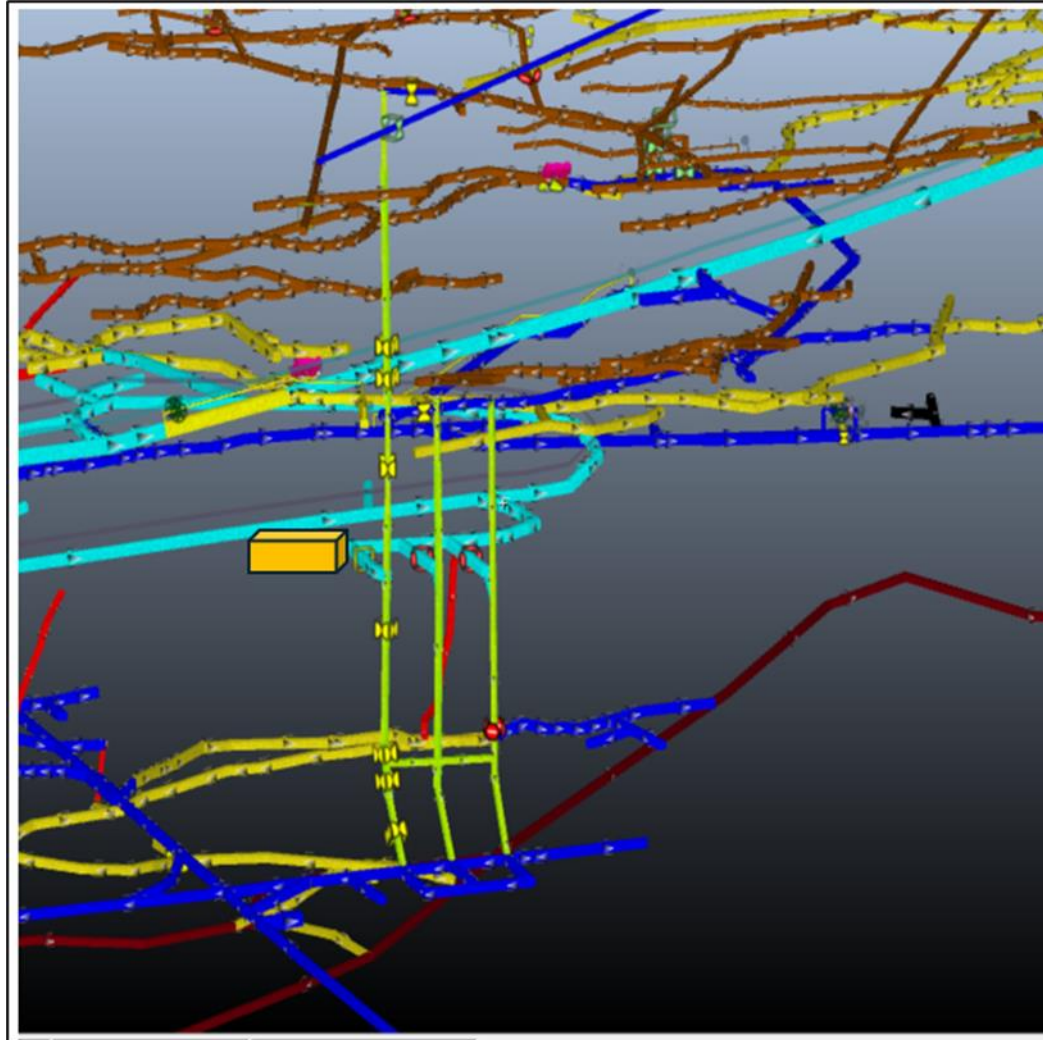
Fuente: Compañía Minera Poderosa

Anexo 11: Incremento de Capacidad en zona Baja a partir de captación de agua del NV 2670



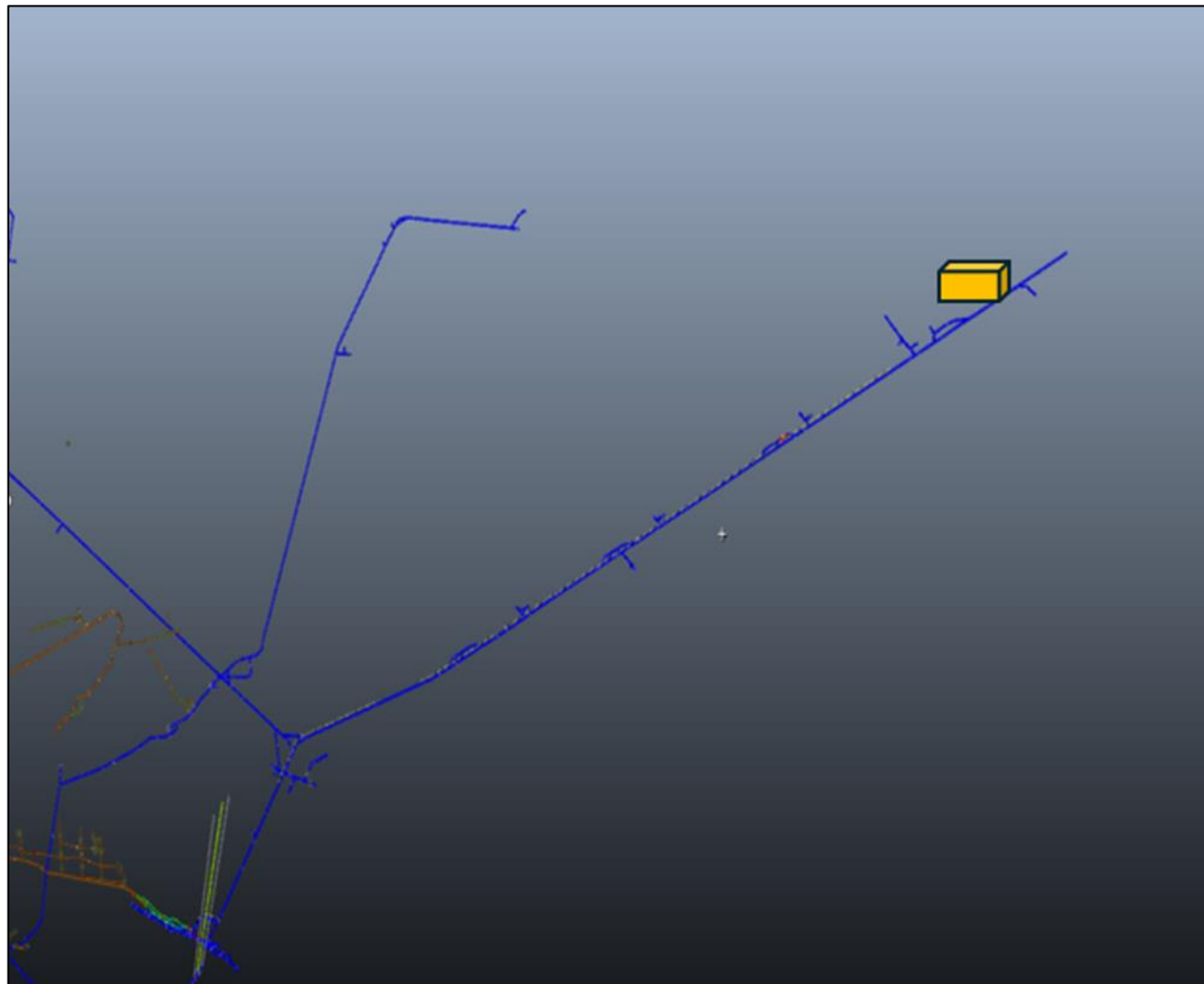
Fuente: Compañía Minera Poderosa

Anexo 12: Ejecución de Dique en el Nivel 2160 para captar el agua de rebose de los Diques de la zona de Faby



Fuente: Compañía Minera Poderosa

Anexo 13: Ejecución de Dique en la CR-600



Fuente: Compañía Minera Poderosa