

**Universidad Nacional de Ingeniería**  
**Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica**



TESIS

**Evaluación de sistema de control de ley para reducción de la  
incertidumbre y variabilidad en la alimentación de planta  
concentradora**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Jhan Carlos Huayra Gabriel

 [0009-0004-2095-9144](https://orcid.org/0009-0004-2095-9144)

Asesor

MBA. Carmelo Condori Cupi

 [0009-0004-3332-5271](https://orcid.org/0009-0004-3332-5271)

LIMA – PERÚ

2025

---

Citar/How to cite	Huayra Gabriel [1]
Referencia/Reference	[1] J. Huayra Gabriel, " <i>Evaluación de sistema de control de ley para reducción de la incertidumbre y variabilidad en la alimentación de planta concentradora</i> " [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

---

---

Citar/How to cite	(Huayra, 2025)
Referencia/Reference	Huayra, J. (2025). <i>Evaluación de sistema de control de ley para reducción de la incertidumbre y variabilidad en la alimentación de planta concentradora</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

---

***Dedicatoria***

*A mis padres, por el gran esfuerzo realizado para brindarme educación de calidad e inculcarme día a día a ser mejor; y a mi esposa por su preocupación por mi desarrollo personal y profesional.*

### **Agradecimientos**

Agradezco de manera muy especial a mis maestros y a mis compañeros de mi alma mater, Universidad Nacional de Ingeniería, quienes me brindan su amistad, conocimientos y me inculcaron el amor por la minería. Agradezco también, a mis compañeros de trabajo que siempre me apoyaron en mi proceso de aprendizaje, gracias.

## Resumen

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el incremento de la recuperación metalúrgica en una planta concentradora al implementar un sistema de control de ley avanzado que utiliza tecnologías para la reducción de la variabilidad de ley de alimentación. Se identificaron tres principales fuentes de incertidumbre: desplazamiento por voladura, remanejo desde stocks y falta de monitoreo continuo. Para enfrentar esta problemática, se propuso un modelo conceptual basado en tecnologías de simulación, modelamiento predictivo (OrePro Predict) y sistemas de medición en tiempo real.

La implementación del sistema en una planta minera permitió mejorar la predictibilidad de la ley de alimentación, reduciendo el coeficiente de variación al percentil 50 e incrementando la recuperación metalúrgica de cobre en 0.15% (0.36% en altas leyes). Desde el punto de vista económico, esta mejora representa 1,079 toneladas métricas adicionales de cobre fino y un ingreso anual estimado en USD 7.1 millones. Con un CAPEX de USD 150,000 y un OPEX anual de USD 97,600, el proyecto obtuvo un Valor Actual Neto (VAN) de USD 2.315 millones, una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 370% y un periodo de recuperación de la inversión (payback) de 0.78 años.

Se identificaron riesgos técnicos y operativos, mitigados mediante protocolos de mantenimiento, capacitación y gestión del cambio. Finalmente, se plantea la escalabilidad de la solución hacia otras operaciones mineras, como parte de una estrategia de integración digital entre la mina y la planta, orientada a mejorar la eficiencia, rentabilidad y sostenibilidad del proceso productivo.

Palabras clave — Sistema, automatización, mina, recuperación, metalúrgica, ley.

## Abstract

This research aims to evaluate the increase of metallurgical recovery in a concentrator plant by implementing an advanced grade control system using technologies for feed grade variability reduction. Three main sources of uncertainty were identified: blast displacement, re-handling from stockpiles and lack of continuous monitoring. To address this issue, a conceptual model based on simulation technologies, predictive modelling (OrePro Predict) and real-time measurement systems was proposed.

The implementation of the system in a mining plant allowed improving the predictability of the feed grade, reducing the coefficient of variation to the 50th percentile and increasing the metallurgical recovery of copper by 0.15% (0.36% on high grades). Economically, this improvement represents an additional 1,079 metric tonnes of fine copper and an estimated annual revenue of USD 7.1 million. With a CAPEX of USD 150,000 and an annual OPEX of USD 97,600, the project has a Net Present Value (NPV) of USD 2.315 million, an Internal Rate of Return (IRR) of 370% and a payback period of 0.78 years.

Technical and operational risks were identified and mitigated through maintenance, training and change management protocols. Finally, the scalability of the solution to other mining operations is proposed as part of a digital integration strategy between the mine and the plant, aimed at improving the efficiency, profitability and sustainability of the production process.

Keywords — System, automation, mine, recovery, metallurgical, grade.

## Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen .....	v
Abstract .....	vi
Introducción .....	xii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo .....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo general .....	3
1.3.2 Objetivos específicos .....	3
1.4 Hipótesis .....	4
1.4.1 Hipótesis general .....	4
1.4.2 Hipótesis específicas.....	4
1.5 Metodología .....	5
1.5.1 Enfoque cuantitativo.....	5
1.5.2 Alcance descriptivo – Explicativo.....	5
1.5.3 Diseño Cuasi-Experimental.....	5
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual.....	6
2.1 Minería a tajo abierto.....	6
2.1.1 Operaciones unitarias .....	8
2.1.2 Descripción de las operaciones unitarias .....	8
2.1.3 Modelado del desplazamiento por voladura .....	14
2.2 Planeamiento minero .....	17
2.2.1 Estratégicas .....	17
2.2.2 Tácticas.....	17
2.2.3 Operativas.....	18
2.2.4 Largo plazo .....	18

2.2.5	Mediano plazo.....	18
2.2.6	Corto plazo.....	19
2.3	Producción de concentrados de cobre .....	19
2.3.1	Planta concentradora .....	20
2.3.2	Recuperación metalúrgica.....	21
2.3.3	Comercialización de cobre .....	23
2.4	Ecosistema de datos en procesos mineros .....	26
2.5	Evaluación financiera .....	27
2.5.1	Valor Actual Neto (VAN).....	28
2.5.2	Tasa Interna de Retorno (TIR) .....	28
2.6	Modelo conceptual .....	29
2.6.1	Variables .....	29
2.6.2	Justificación .....	29
2.6.3	Diseño de un modelo conceptual .....	30
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación .....		32
3.1	Enfoque, alcance y diseño de la investigación .....	32
3.1.1	Enfoque de la investigación.....	32
3.1.2	Alcance de la investigación .....	32
3.1.3	Diseño de investigación Cuasi-experimental .....	33
3.2	Procedimiento experimental .....	34
3.2.1	Diseño del ecosistema de datos.....	34
3.2.2	Fase Pretest: Data Pre Piloto .....	38
3.2.3	Fase Pretest: Data Pos Piloto .....	39
3.2.4	Impacto general .....	41
Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados .....		42
4.1	Cálculo de indicadores financieros .....	42
4.1.1	Estimación de CAPEX.....	42
4.1.2	Estimación de OPEX.....	42

4.1.3	Estimación de ingresos .....	43
4.1.4	Estimación de VAN y TIR .....	43
4.1.5	Análisis de sensibilidad .....	44
4.2	Pruebas de significancia .....	45
4.3	Impactos operativos .....	46
4.4	Análisis de riesgos y mitigaciones .....	46
4.4.1	Riesgos identificados .....	47
4.4.2	Estrategias de mitigación .....	47
4.4.3	Análisis de oportunidades .....	47
	Conclusiones .....	49
	Recomendaciones .....	51
	Referencias bibliográficas .....	53
	Anexos .....	55

## Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Fuentes de variabilidad e incertidumbre.....	9
Tabla 2: Elementos considerados en la valorización de concentrados.....	25
Tabla 3: Resultados económico – expresados en millones de dólares .....	43
Tabla 4: Resultados de significancia estadística en indicadores (pretest vs postest) .....	45

## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Operación minera a tajo abierto en el Perú.....	8
Figura 2 : Muestreo y loqueo de blast holes.....	11
Figura 3 : Método de kriging .....	12
Figura 4 : Operaciones unitarias en el proceso de alimentación a planta.....	14
Figura 5 : Simulaciones de modelo desplazado por voladura .....	15
Figura 6 : Flujo de trabajo del desplazamiento del modelo de bloques .....	16
Figura 7 : Flujo de Proceso de Planificación .....	19
Figura 8 : Planta concentradora de cobre en Perú.....	21
Figura 9 : Proceso de transformación de metales .....	24
Figura 10: Flujo de funcionamiento de ecosistema de datos.....	27
Figura 11: Proceso propuesto de estimación de ley a alimentar a planta.....	31
Figura 12: Proceso de estimación de ley de alimentación a plantas y principales fuentes de incertidumbre.....	33
Figura 13: Proceso de desplazamiento por voladura .....	35
Figura 14: Proceso de modelamiento de stocks.....	36
Figura 15: Modelo de bloques de stocks con GPS de descarga (leyes y atributos). .....	37
Figura 16: Proceso de modelamiento de stocks.....	38
Figura 17: Variabilidad de ley de alimentación en procedimiento experimental.....	40
Figura 18: Evolución de F2 durante 12 meses.....	40
Figura 19: Incremento de la recuperación en +0.36% para materiales de alta ley.....	41

## Introducción

La minería, al ser una actividad económica primordial, ha tenido un valor especial en el desarrollo de muchas de las regiones del mundo. En particular, el Perú se sitúa como uno de los principales productores de metales en el mundo, aportando en gran manera a la economía nacional. No obstante, la industria minera es retada continuamente, la que demanda innovaciones y mejoras continuas que sigan permitiendo la competitividad y la sostenibilidad. De los desafíos, se encuentra la variabilidad y cumplimiento de la ley del mineral alimentado a las plantas concentradoras, lo que afecta directamente la eficiencia operativa y la rentabilidad económica.

La presente investigación se centra en la iniciativa de reducción de la variabilidad y la incertidumbre de ley de alimentación a planta concentradora en minería de cobre. El objetivo final propuesto es el de desarrollar e implantar un sistema de control de la ley que contemple la conexión en tiempo real de la optimización con las tecnologías de medición para mejorar las tasas de recuperación del cobre y la eficiencia operativa, para lo cual se realizó una revisión de la bibliografía, junto con una evaluación de las distintas metodologías para determinar cuáles son las que se adecuan para la resolución de los problemas existentes en la minería.

Se estima que los resultados y recomendaciones que se aportan en este estudio serán de utilidad para las operaciones de extracción de cobre, así como para proporcionar información que sirva para las futuras investigaciones y mejoras en el dominio de la minería. El objetivo del presente trabajo es contribuir al avance de prácticas mineras más eficientes y sostenibles confiando que este trabajo será una contribución importante en línea con ello.

# Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

## 1.1 Generalidades

La actividad minera es de gran trascendencia económica para el desarrollo de muchas regiones del mundo, y el Perú no es la excepción. La minería peruana, al ser uno de los principales productores mundiales de metales, contribuye a la economía a través de su fuerte incidencia en el Producto Interno Bruto (PIB) y en la creación de empleo. Es indudable que la optimización y eficiencia de los procesos mineros es un elemento relevante a la hora de mantener la competitividad y la sostenibilidad de las operaciones mineras. En particular, la planta concentradora tiene una importancia fundamental, ya que forma el método a través del cual se procesa el mineral extraído de cobre para obtener concentrados.

La ley del mineral, que es la cantidad de metales valiosos disueltos en la roca, puede ser muy variable dado el carácter heterogéneo de los yacimientos minerales y las prácticas extractivas. La ley del mineral alimentado a la planta concentradora presenta uno de los retos más serios en la operación de una planta concentradora, variabilidad que designa la dispersión natural de la concentración de metales en el mineral extraído, debido al carácter heterogéneo del yacimiento o a las prácticas de minado. Al mismo tiempo, la incertidumbre es la falta de conocimiento o de limitaciones de las mediciones o de los modelos que intentan describir dicha variabilidad. La variabilidad y la incertidumbre tienen efectos negativos inmediatos que impactan en la operación de la planta, dado que afectan la recuperación de metales y la viabilidad económica.

En relación a esta problemática, la propuesta de un sistema de control de ley de tipo avanzado de reducir la incertidumbre y variabilidad de la ley de la alimentación a la planta concentradora se perfila como una posible solución. En esencia, esta propuesta se cimenta en la oportunidad de combinar tecnologías de medición y control avanzado y de optimizar los procesos operacionales desde la extracción hasta el tratamiento del mineral. El resultado que se espera de una disminución de la variabilidad de la ley es que la calidad

de la alimentación a la planta sea más constante, lo que conduciría a una disminución del costo de operación (mejor recuperación de metales) y a una mayor eficiencia operacional. La implementación de la iniciativa de un sistema de control de ley de tipo avanzado no sólo podría beneficiar a los procesos específicos que sustentan con el mineral alimentos las plantas de cobre, sino que también podría servir como modelo para muchas otras operaciones mineras que deben enfrentar estas mismas problemáticas, contribuyendo así a un avance de la implementación de prácticas mineras más eficientes y sostenibles en su operación.

## **1.2 Descripción del problema de investigación**

La variación de la ley del mineral que entra a la planta (dispersión natural) y la incertidumbre asociada (limitaciones de las medidas y de los modelos predictivos) constituyen un problema muy importante para la minería, debido a que incide directamente tanto en la eficiencia de los procesos operativos, entendidos como el conjunto de pasos y condiciones bajo las cuales se obtiene metales en forma de concentrados, como en la eficiencia de los sistemas de producción de las plantas concentradoras. Este problema es inherente a la heterogeneidad de los yacimientos de minerales y a los procesos que generan fuentes de incertidumbre sobre la ley del mineral. Consecuentemente, la planificación y gestión del mineral es subóptima conduciendo a variaciones en los parámetros de procesamiento y a calidad del producto final.

Como consecuencia esta variación del mineral hace que las plantas tengan que operar de manera reactiva, teniendo que variar continuamente las condiciones de procesamiento para compensar las variaciones en la ley de alimentación; esto produce costos adicionales de operación y reduce la eficiencia total del mismo proceso. La falta de control adecuado sobre la ley del mineral también complica de forma significativa la logística dentro de la mina, desde la extracción del mineral, su mediación, hasta el procesamiento; una logística adecuada es fundamental en la producción de minerales, porque permite mantener una producción eficiente. Eso también traspasa a menudo a tener una menor recuperación de los metales valiosos que permiten la rentabilidad de los

procesos, un mayor uso de reactivos y energía, y un menor retorno sobre la inversión en operación minera.

El presente trabajo se centra en un yacimiento de cobre tipo IOCG (hierro, óxido, cobre y oro por sus siglas en inglés) a tajo abierto, cuya planta concentradora opera bajo un esquema convencional de chancado, molienda y flotación. Estas condiciones base permiten contextualizar los resultados y hacer comparaciones con operaciones similares.

Para enfrentar estos desafíos, se propone el desarrollo de un sistema de control de ley avanzado que integre tecnologías de simulación (OrePro Predict), modelamiento de stocks y gestión de la data involucrada. La investigación se enfoca en el diseño, implementación y evaluación de este sistema en una planta concentradora específica, demostrando que, mediante la reducción de la incertidumbre y la variabilidad en la ley de alimentación, se pueden lograr mejoras en la eficiencia de planta. El sistema propuesto consta de:

- El diseño de un sistema de gestión de datos de simulación de desplazamiento por voladura (software de simulación: OrePro Predict).
- El diseño de una metodología de gestión y modelamiento de stocks de mineral.
- La integración de información para seguimiento de la ley de alimentación a planta en tiempo real.

### **1.3 Objetivos**

#### ***1.3.1 Objetivo general***

Evaluar el incremento de la recuperación metalúrgica en el proceso de flotación de cobre mediante la implementación de un sistema de control de ley avanzado, en mina de cobre a tajo abierto, que utiliza tecnologías para la reducción de la variabilidad e incertidumbre de ley de alimentación.

#### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Determinar el porcentaje de la recuperación de metalúrgica en el proceso de flotación después de la implementación del sistema de control de ley, a fin de validar la efectividad del sistema desarrollado.

- Implementar la gestión y el modelamiento de stocks para reducir fuente de incertidumbre de ley de alimentación de mineral a planta de procesos metalúrgicos,
- Desarrollar y calibrar un modelo basado en técnicas de análisis estadístico que pueda predecir la ley del mineral en tiempo real, utilizando datos históricos y actuales de las operaciones mineras para calibrar el modelo eficazmente.
- Evaluar el impacto económico-financiero derivado de la reducción de la variabilidad e incertidumbre de la ley de alimentación.

## **1.4 Hipótesis**

### ***1.4.1 Hipótesis general***

La implementación de un sistema de control de ley avanzado, que combine el uso de OrePro Predict con metodologías propias de gestión y modelamiento y seguimiento de leyes procesadas en tiempo real, incrementa la recuperación de cobre en el proceso de flotación de una planta concentradora de una mina a tajo abierto.

### ***1.4.2 Hipótesis específicas***

- El porcentaje de recuperación de metales en la planta concentradora es mayor después de la implementación del sistema de control de ley, en comparación con los niveles de recuperación previos.
- La implementación de una gestión y modelamiento eficiente de stocks reduce significativamente la incertidumbre en la ley de alimentación a la planta concentradora.
- El sistema de medición y control en tiempo real mejora la precisión del monitoreo de la ley del mineral a lo largo de los puntos críticos del proceso minero.
- La reducción de la variabilidad e incertidumbre de la ley de alimentación a planta concentradora genera un impacto económico-financiero positivo, reflejado en una disminución de los costos operacionales y un aumento en la rentabilidad del proceso.

## **1.5 Metodología**

La metodología que se aplica en este trabajo es de enfoque cuantitativo con diseño cuasi-experimental, además, con alcance descriptivo y explicativo.

### ***1.5.1 Enfoque cuantitativo***

Hernández – Sampieri, et al. (2014), el enfoque cuantitativo recoge datos cuantificables para comprobar hipótesis y validar teorías mediante el análisis estadístico.

En esta investigación se diseñará e implementará un sistema de control de ley avanzado en una planta concentradora específica, utilizando tecnologías de medición y algoritmos de optimización. Se recopilarán datos antes y después de la implementación del sistema, los cuales serán analizados para evaluar su impacto en la eficiencia operativa y la rentabilidad.

### ***1.5.2 Alcance descriptivo – Explicativo***

Hernández – Sampieri, et al. (2014), una investigación descriptiva busca especificar características relevantes del fenómeno que se analiza, y es explicativo porque busca identificar las causas de los sucesos que se estudian.

En este caso, se describe la variabilidad de la ley de alimentación a la planta concentradora antes y después de la implementación, los procesos operativos y factores críticos. Y se identifica y comprueba relación causal entre las variables independiente y dependiente.

### ***1.5.3 Diseño Cuasi-Experimental***

Pedhazur y Schmelkin (2013), cuasi-experimental tiene el mismo propósito del diseño experimental de probar la existencia de una relación causal en dos o más variables, pero sin manipular la variable independiente.

En este caso, dado que no se manipula aleatoriamente la implementación del sistema (es una intervención real en un entorno operativo), se puede medir el "antes" y el "después" de dicha implementación, evaluando su impacto sobre los costos operacionales y la variabilidad de la ley.

## Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

### 2.1 Minería a tajo abierto

La minería a tajo abierto es el principal sistema de explotación de los yacimientos de cobre en el Perú y en el mundo. La importancia de este sistema se da porque permite explotar yacimientos de gran tamaño y de baja ley a través de economías de escala y el uso de equipos de gran capacidad. En este método se remueve el estéril y el mineral en forma sucesiva en bancos sucesivos, garantizando estabilidad de taludes y la realización de la operación de forma continua. El sistema de operación a tajo abierto implica la operación de la mina en forma de bancos o niveles, lo que permite asegurar mejor estabilidad y seguridad en la operación de explotación. De acuerdo con Hustrulid (2013) "La minería a tajo abierto se realiza cuando existe la posibilidad de explotar un yacimiento mineral ubicado cerca de la superficie y que se extiende ampliamente."

La minería a tajo abierto contiene como ventaja principal la posibilidad de extraer mayores volúmenes de mineral a un menor coste y tiempo en comparación a la minería subterránea. Esto se debe entre otras consideraciones a la utilización de maquinaria más grande y/o más eficiente, lo que permite una mayor productividad y menor gasto operativo. Ahora bien, también existen inconvenientes derivados de la minería a tajo abierto, tales como el coste ambiental derivado de la remoción de grandes volúmenes de tierra y roca, como la necesidad de gestionar de forma adecuada los residuos y el agua de mina para minimizar los efectos nocivos en el medio ambiente. Según Hartman y Mutmansky (2002), una adecuada planificación y gestión ambiental son imprescindibles para minimizar los efectos negativos de la minería a tajo abierto.

Realizar el planeamiento y la operación en una mina a tajo abierto es la obligación de integrar en detalle disciplinas muy amplias (geología, ingeniería de minas, metalurgia, gestión ambiental, etc.). El éxito de esas tareas dependerá de un adecuado proceso de planificación que contenga, entre otras cosas, estudios de viabilidad, estudios de viabilidad técnica y económica; diseño de minas, planificación de la producción, el establecimiento

de tecnología apropiada para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de las operaciones mineras. A partir de la publicación de Wills y Finch (2016) se han incorporado tecnologías como la simulación y el modelado 3D, y las realidades aumentadas, sistemas de monitoreo en tiempo real, los cuales han mejorado la capacidad de los operadores y las fases de optimización de las operaciones mineras a tajo abierto.

En el Perú, minas como Las Bambas (Apurímac), Antamina (Áncash), Mina Justa (Ica) y Mina Constancia (Cusco) representan casos emblemáticos. En ellas se evidencia que el éxito no depende únicamente de la escala de producción, sino de la capacidad de gestionar la variabilidad natural del mineral y la incertidumbre de la estimación y control de leyes.

- **Variabilidad:**

Se refiere a la dispersión natural en la concentración de cobre y minerales asociados (Mo, Zn, Ag, Fe), producto de la heterogeneidad geológica. Por ejemplo, en Antamina la coexistencia de skarns y pórfidos genera zonas con leyes muy diferentes incluso a corta distancia.

- **Incertidumbre:**

Está asociada a limitaciones en la calidad de datos geológicos, densidad de sondajes, precisión de modelos y capacidad de muestreo. En Mina Justa, durante la fase de pre-operación, se identificaron sesgos en leyes estimadas frente a leyes de stocks de mineral a planta debido a falta de la trazabilidad de la ley de mineral.

En la Figura 1, se puede observar el flujo de producción de una operación a tajo abierto.



**Tabla 1***Fuentes de variabilidad e incertidumbre*

<b>Operación Unitaria</b>	<b>Fuentes de Variabilidad</b>	<b>Fuentes de Incertidumbre</b>
Perforación y Voladura	Diferente competencia de roca. Zonas fracturadas vs masivas. Granulometría de fragmentación variable.	Desplazamiento por voladura. Limitaciones en control de malla y retardos.
Muestreo y Logueo de blast holes	Heterogeneidad mineralógica entre taladros adyacentes. Variación de leyes en pequeños volúmenes.	Sesgo de muestreo. Errores analíticos de laboratorio. Falta de QA/QC en campo.
Modelamiento de Bloques	Distribución irregular de dominios mineralógicos. Complejidad geológica (zonas de alteración).	Supuestos geoestadísticos (kriging, IDW). Errores de interpolación.
Carguío y Acarreo	Mezcla natural de materiales de diferentes frentes. Dilución en minado entre contactos mineral/desmante.	Error en asignación de camiones. Limitaciones en trazabilidad. Errores de pesaje.
Acopio y Remanejo en Stocks	Variación de leyes en mineral stockeado.	Falta de control en el envío a stock. Limitaciones en GPS de descarga. Carencia de monitoreo en tiempo real.
Chancado y Alimentación a Planta	Mezcla de mineral en stockpile de chancado. Variabilidad mineralógica del ROM.	Limitaciones de muestreo en fajas. Error en analizadores en línea. Retardos en reportes de laboratorio.

*Nota:* Elaboración propia.

**2.1.2.1 Perforación y voladura.** La operación unitaria de perforación en minería a tajo abierto implica la creación de agujeros en la roca para colocar explosivos, facilitando la posterior voladura y extracción del mineral. Se utilizan máquinas muy específicas, como martillos en cabeza o máquinas rotativas, para hacer perforaciones de varios metros de profundidad que se llevan a cabo según el diseño del plan de minado. La precisión de la perforación es muy importante ya que permite que la fragmentación de la roca obtenida una vez realizada la voladura sea muy alta y, además, se puedan reducir los costes de la operación. En este sentido, los parámetros de perforación (velocidad de rotación y presión de aire) tendrán que ser correctamente ajustados para mejorar la eficiencia de ejecución y la duración de los equipos. La perforación es el primer paso del ciclo de minado, con una

relación directa con la eficiencia y la seguridad de las etapas posteriores (voladura y carguío) (Hartman & Mutmansky, 2002).

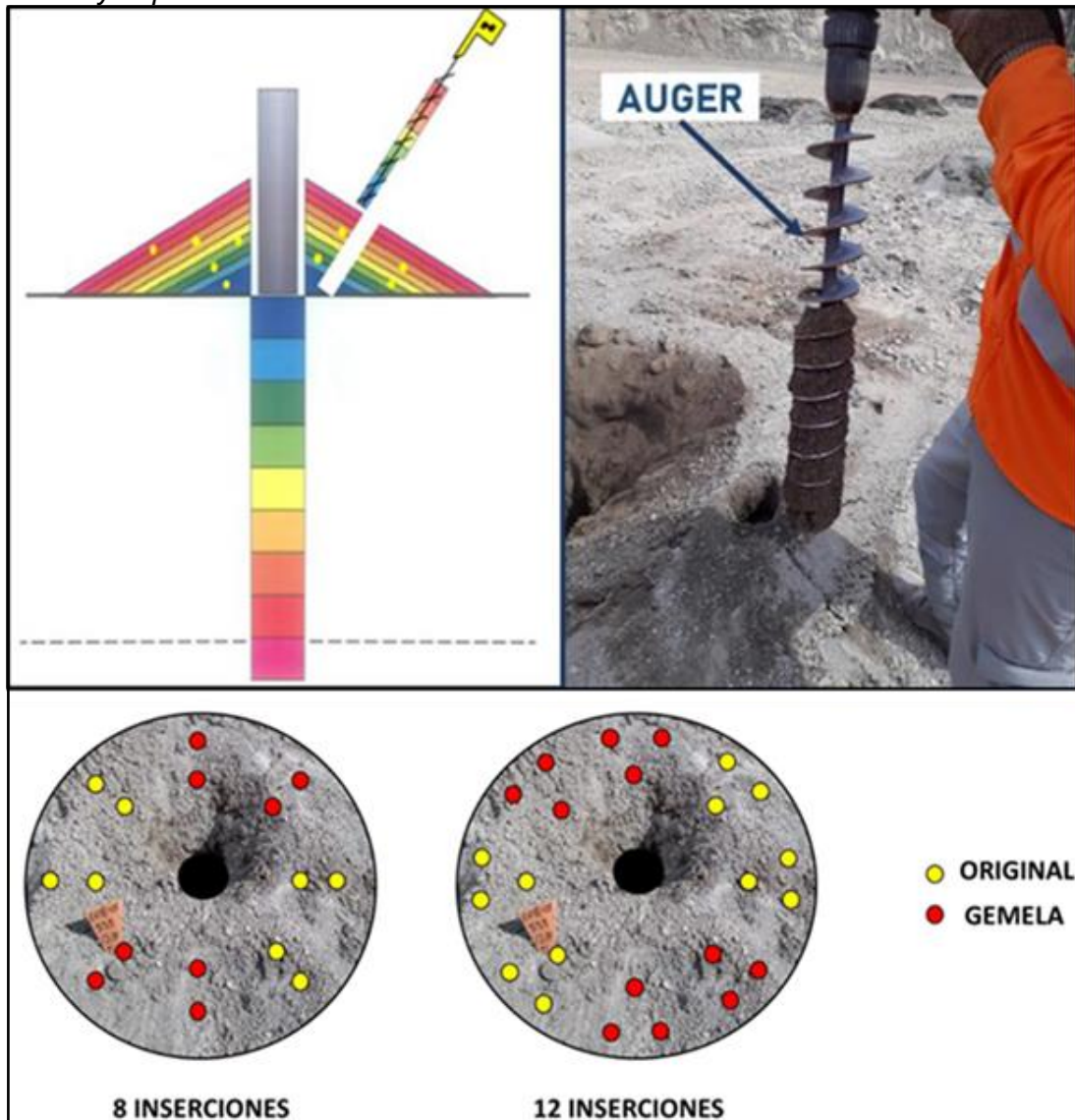
La voladura de rocas en una explotación a tajo abierto constituye otro proceso fundamental en minería, que se sirve del uso de explosivos para la fragmentación de la roca y la posterior extracción de los trozos de roca. Para ello, se realizan perforaciones de unos agujeros que deben seguir unos patrones establecidos y, posteriormente, se cargan con explosivos y se desencadenan para conseguir el tamaño de fragmentación deseada. Una buena precisión tanto en el diseño como en la ejecución de la voladura es muy importante para optimizar tanto la eficiencia de la operación como el impacto ambiental o los costes de extracción (Hustrulid, 2013).

A pesar de existir softwares como OrePro que modelan el desplazamiento, no son capaces de eliminar el / la incertidumbre de campo (ej. Irregularidad en litologías, desviaciones en perforaciones), por lo que se hace necesario un modelo que permita cuantificar y gestionar la incertidumbre residual más allá del software.

**2.1.2.2 Muestreo y logueo de blast hole.** El muestreo y logueo de blast holes, en minería a tajo abierto, son la recolección sistemática de muestras del material perforado para la posterior determinación de las leyes de los mineral y los fundamentos geotécnicos de un yacimiento, así como la planificación de la voladura y la optimización de la extracción. Los controles de calidad del muestreo, como la inclusión de muestras gemelas, normas de referencia o blancos, son fundamentales para asegurar la calidad y fiabilidad del material analizado. El logueado minucioso de blast hole es importante para garantizar una fragmentación suficiente y maximizar la eficiencia del proceso operativo (Wills & Finch, 2016). La calidad del muestreo afecta a todo el modelo de bloques. Reducir la incertidumbre aquí es mucho más fácil que corregirla en planta, lo que justifica la introducción de metodologías robustas de QA/QC como parte del aporte del presente trabajo.

**Figura 2**

*Muestreo y loqueo de blast holes*



*Nota:* Elaboración propia

**2.1.2.3 Modelamiento de bloques.** El modelamiento de bloques geológicos en minería a tajo abierto corresponde a generar

un modelo tridimensional del yacimiento, a partir de datos geológicos y perforaciones, para así asociar la distribución y características del mineral. Este modelo tiene como principal objetivo permitir optimizar la planificación de la extracción y su gestión, lo que se traduce en una explotación eficaz y exacta del yacimiento. Para este fin se utilizan herramientas informáticas punteras, como por ejemplo el kriging, para realizar

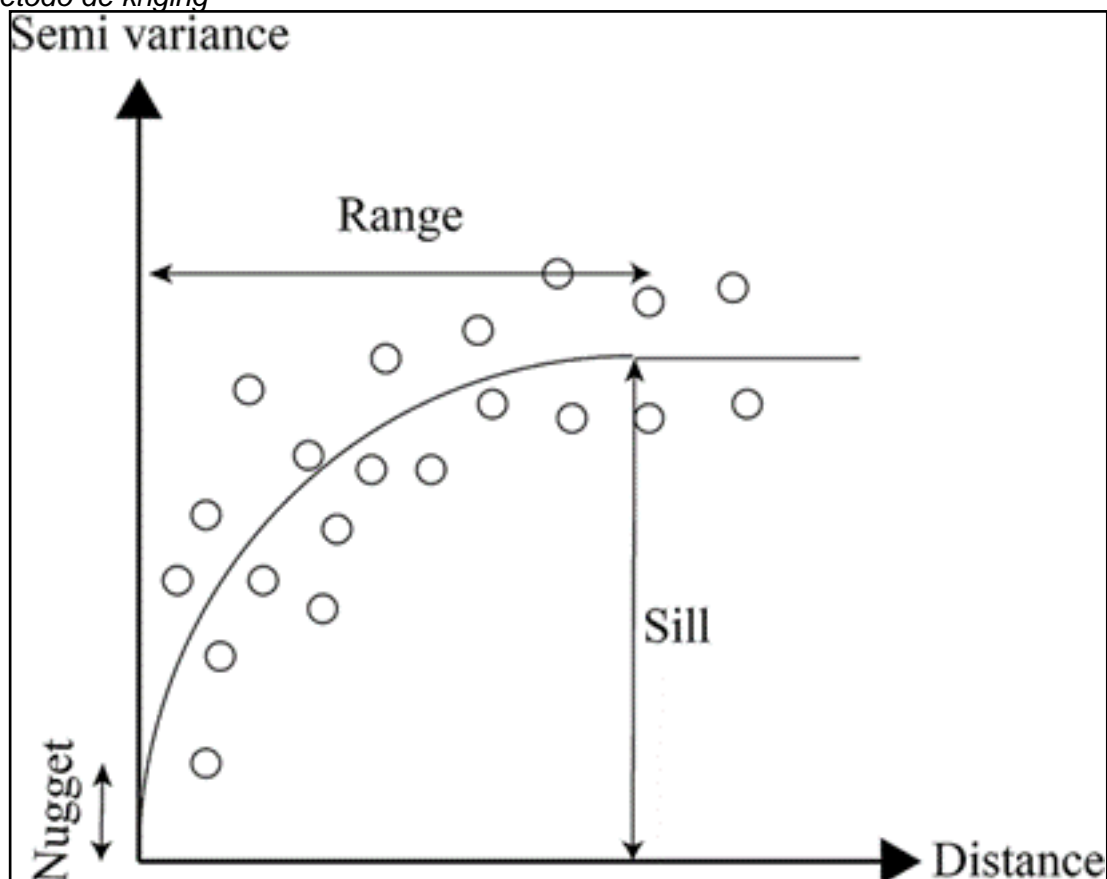
interpolaciones de datos y leyes de mineral asociadas a los bloques del modelo (Hustrulid, 2013).

Los modelos de bloques son tan robustos como la calidad de los datos. La propuesta aquí es conseguir con la información operativa (voladuras, stocks) realizar la recalibración del modelo a fin de reducir la incertidumbre. Los métodos más utilizados son los siguientes:

- Kriging
- Inverso a la distancia
- Simulación Geoestadística
- Método de Polígonos

**Figura 3**

*Método de kriging*



*Nota:* Elaboración propia.

**2.1.2.4 Carguío y acarreo.** El ganado y acarreo en minería a tajo abierto son operaciones que son fundamentales ya que implican la carga del material fragmentado (roca y mineral) en camiones mediante palas mecánicas o cargadores frontales y su transporte posterior a las instalaciones de procesamiento o sitios de almacenamiento. Su entrada en las operaciones afecta directamente los costos de operación y el rendimiento de la mina. Un buen trabajo de planificación y ejecución es primordial para el adecuado flujo de material y el cumplimiento de los tiempos de ciclo (Hartman & Mutmansky, 2002). En el caso de Mina Justa la implementación de Mine Sense y la alta precisión de los equipos de carguío permite asignar las leyes de cada pase de acuerdo a las leyes del modelo de bloques, permitiendo rastrear cada camión con alta precisión.

**2.1.2.5 Acopio en Stocks y Remanejo.** Tanto el acopio en stocks como el remanejo en la minería a tajo abierto hacen referencia a la acumulación temporal de mineralizado en pilas de almacenamiento (stocks) para su posterior manejo y abastecimiento a la planta de procesamiento; estas operaciones tendrían la función de la homogenización del mineral y la administración de las variaciones de la ley de mineral. En ese sentido, el manejo de los stocks incluye la recolección y el transporte del material mineralizado de los stocks a las plantas de procesamiento garantizando un flujo continuo del material mineralizado (Hartman & Mutmansky, 2002). En el caso de Mina Justa, cada camión tiene un punto GPS en cada descarga, lo cual permite construir el modelo de bloques de los stocks, lo que reduce la incertidumbre de las leyes; por lo tanto, la investigación propone una metodología de gestión de los stocks antes de alimentar a planta.

**2.1.2.6 Chancado de mineral.** El proceso de chancado primario del mineral de mina (ROM) en minería a tajo abierto, se consigue el primer paso de la operación que forma parte del procesamiento del mineral, siendo el primer paso del posterior procesamiento del mineral. La incertidumbre de los resultados de ley del mineral en esta primera fase podría impactar de manera contundente en la eficiencia del proceso, puesto que las variaciones en la calidad de la alimentación del mineral podrían llevar a variaciones

en la producción y recuperación. La planta concentradora es el punto que se da la confluencia de todas las fuentes de incertidumbre y variabilidad. Si se las elimina a partir de la mina esta variabilidad podría llevar a variaciones tanto en la eficiencia como también en los costos de procesamiento de mineral. La variabilidad de la siembra se controla y homogeniza los materiales con el objetivo de eliminar esta incertidumbre y operar en el *yüksek limit* de rendimiento (Wills & Finch, 2016). En Antamina, la instalación de analizador PGNAA en la faja que reduce la incertidumbre de ley de los resultados de ley, pudiendo así enlazar las variaciones de la ley de mineral de forma instantánea en la molienda.

**Figura 4**

*Operaciones unitarias en el proceso de alimentación a planta*



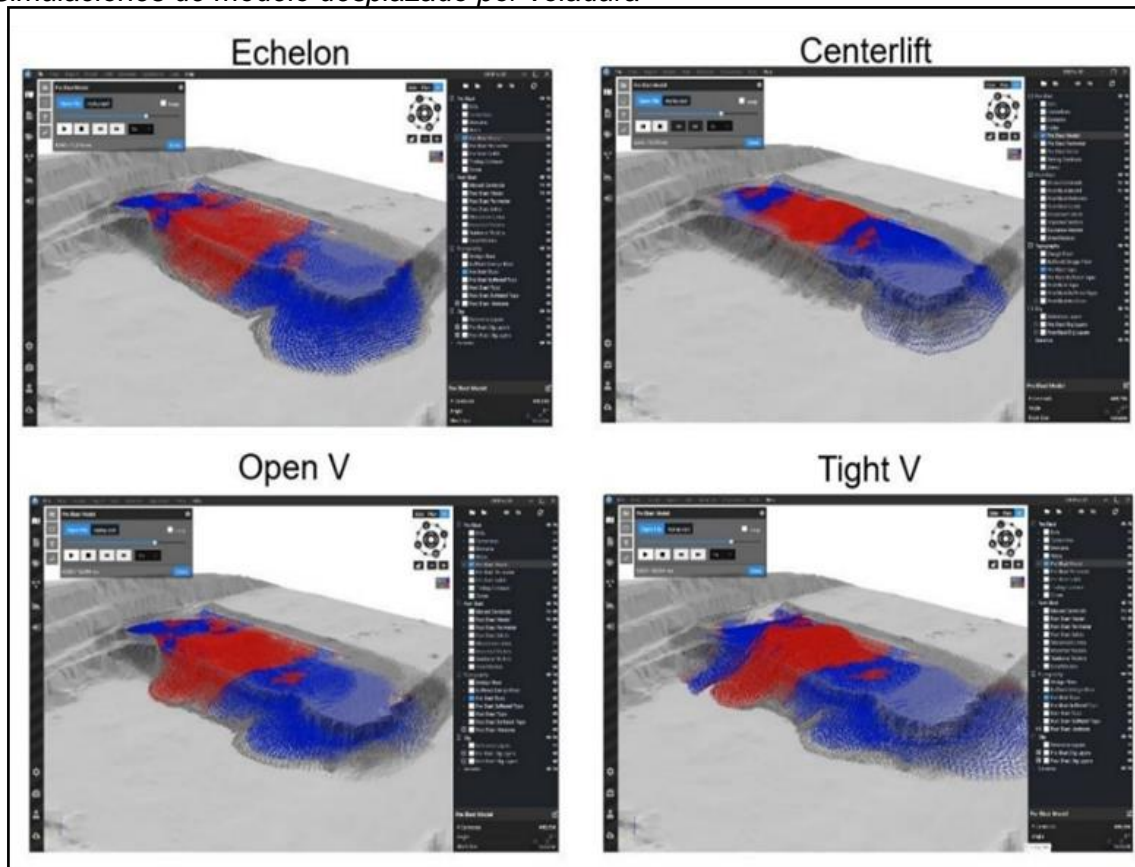
Nota: Elaboración propia

**2.1.3 Modelado del desplazamiento por voladura**

El desplazamiento de materiales mediante voladura es, sin duda, uno de los principales problemas de la minería a cielo abierto, ya que puede desproporcionar la precisión de la ubicación del mineral, impactando la reconciliación de leyes y los respectivos planes de producción (Anexo 3). Durante un buen tiempo, se han utilizado métodos 2D basados en un deslizamiento horizontal de polígonos pre-voladura a partir de un vector de desplazamiento, si bien estos modelos presentan limitaciones para un fenómeno cuadrimensional (Poupeau & Hunt, 2019). Para mitigar estos efectos, se utilizan herramientas especializadas como OrePro, un software desarrollado para modelar y predecir el movimiento de material ocasionado por la voladura. En la figura 5 se puede observar casos de modelamiento de desplazamiento por voladura para diferentes tipos de secuencia de voladura.

**Figura 5**

*Simulaciones de modelo desplazado por voladura*

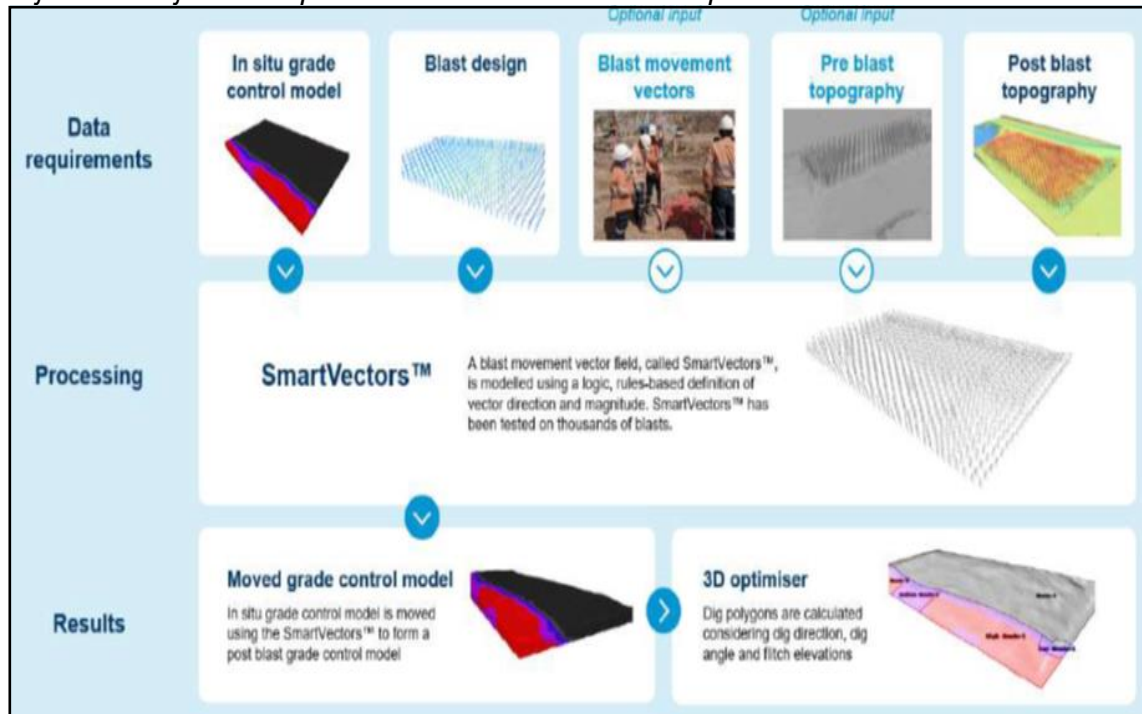


*Nota:* De "Maximización en la recuperación de mineral a través del control del movimiento de la voladura con OREPro 3D Predict", por J. Miranda,

OrePro 3D surge como una herramienta desarrollada para abordar este problema de manera integral. Este software integra el diseño de la voladura, el modelo de control de leyes in situ y la topografía post-voladura para generar un modelo 3D del movimiento del material. A partir de estos datos, OrePro 3D construye un modelo de bloques post-voladura que permite optimizar los polígonos de minado y minimizar las pérdidas y la dilución (Julian et al., 2022). Permite integrar los parámetros de diseño de la voladura (geometría de malla, carga explosiva, retardos y condiciones geomecánicas) con información del modelo de bloques geológico. Mediante algoritmos de cálculo vectorial y métodos empíricos calibrados con datos de campo, el software genera un modelo tridimensional del desplazamiento esperado. Esto posibilita estimar el movimiento de los bloques de mineral y estéril posterior a la voladura, reduciendo las pérdidas y dilución.

**Figura 6**

*Flujo de trabajo del desplazamiento del modelo de bloques*



Nota. De "A novel innovation for reconciliation", por International Mining Geology Conference, 2022

Entre sus principales funcionalidades destacan:

- **Predicción del desplazamiento:**

Utiliza modelos balísticos y de deformación para proyectar el movimiento de los bloques en los tres ejes espaciales.

- **Ajuste y calibración:**

Permite comparar los desplazamientos predichos con mediciones obtenidas mediante técnicas de monitoreo (drones, GPS de alta precisión o radares), ajustando los parámetros para mejorar la exactitud.

- **Integración con sistemas de planificación:**

Los resultados pueden exportarse a software de planeamiento minero (p.ej., MineSight, Vulcan, Datamine) para ajustar diseños de perforación y carguío.

La utilización de OrePro contribuye a optimizar la gestión del mineral en las operaciones mineras, ya que reduce el riesgo de enviar mineral a botaderos o estéril a la planta. Asimismo, permite una mejor reconciliación de las leyes de cabeza y mayor control operativo.

## **2.2 Planeamiento minero**

El planeamiento minero es aquella actividad de la Ingeniería de Minas que define el proceso mediante el cual se transforma el recurso mineral en el mejor negocio productivo para el accionista, tenderá a maximizar la renta del negocio minero activando cada una de sus fuentes, integrando restricciones impuestas por el recurso mineral, el mercado y el entorno (Rubio, 2017).

Es un proceso de naturaleza interactiva, en el cual se debe de evaluar distintas opciones y buscar la mejor opción que se adecue a la operación, el plan minero debe estar alineado a los objetivos de la corporación, dichos objetivos pueden ser distintos para cada organización, y permiten llevar un control por parte de los grupos de interés. De acuerdo con Newman et al. (2010); es posible separar en niveles el proceso de planificación de acuerdo con la naturaleza de las decisiones tomadas, siendo los siguientes niveles:

### ***2.2.1 Estratégicas***

Son las decisiones que tienen el impacto más trascendental en la compañía, en el contexto minero podría representar la elección del método de explotación, capacidad mina y de procesamiento, lo cual tiene impacto directo en la estimación de reservas. Son decisiones que tendrá impacto a lo largo de la vida de la mina. El objetivo de la planificación estratégica es alinear las proyecciones del mercado con el plan estratégico de la compañía.

### ***2.2.2 Tácticas***

Abarcan la descripción de los procesos que se realizaran durante toda la vida útil de la operación minera, considerando los planes de producción de largo plazo y las actividades para hacer un uso eficiente de equipos, plantas de procesamiento y otros activos. Las decisiones tácticas estarán alineado al marco estratégico, y es el nexo con las decisiones operativas. El resultado es el plan minero, que define el cómo y el cuándo se extraerán los recursos, generalmente anuales o quinquenales, estableciendo los recursos a utilizar.

### **2.2.3 Operativas**

Se realizan en intervalos de tiempo corto, por ejemplo, los planes diarios de envío de mineral a planta desde los polígonos de minado. Dentro del planeamiento operativo se incluyen decisiones en intervalos de tiempos cortos. Las decisiones operativas tomadas en este nivel reciben la retroalimentación de las decisiones tácticas, los cuales pueden materializarse en planes mensuales, semanales y diarios para alcanzar los objetivos establecidos.

De acuerdo con la exactitud de la información disponible y la escala espacial correspondiente a los distintos horizontes temporales del plan minero, este se divide en varios niveles de planificación, los cuales sirven como instrumento para gestionar la incertidumbre inherente al proceso de explotación minera. Estos son:

### **2.2.4 Largo plazo**

El plan de largo plazo se definen límites económicos de explotación, y se definen las reservas mineras, a partir de la cual se elabora el plan anual de operaciones. En este se determinan aspectos como la escala de la mina, el método de explotación, la capacidad productiva, la secuencia de minado, el dimensionamiento de los equipos y el perfil de leyes de corte. En esta fase se emplean variables de carácter general y valores promedio, ya que la magnitud del análisis limita el nivel de detalle alcanzable, y la información disponible presenta un grado más elevado de incertidumbre.

### **2.2.5 Mediano plazo**

El plan de mediano plazo suele comprender un horizonte temporal de uno a tres años y genera programas de producción orientados a cumplir las metas operativas de corto plazo derivadas del plan de largo plazo, regularmente se hacen a resolución mensual o trimestral.

Este nivel de planeamiento posibilita garantizar el cumplimiento del presupuesto operativo y proporciona retroalimentación para la actualización del plan de largo plazo.

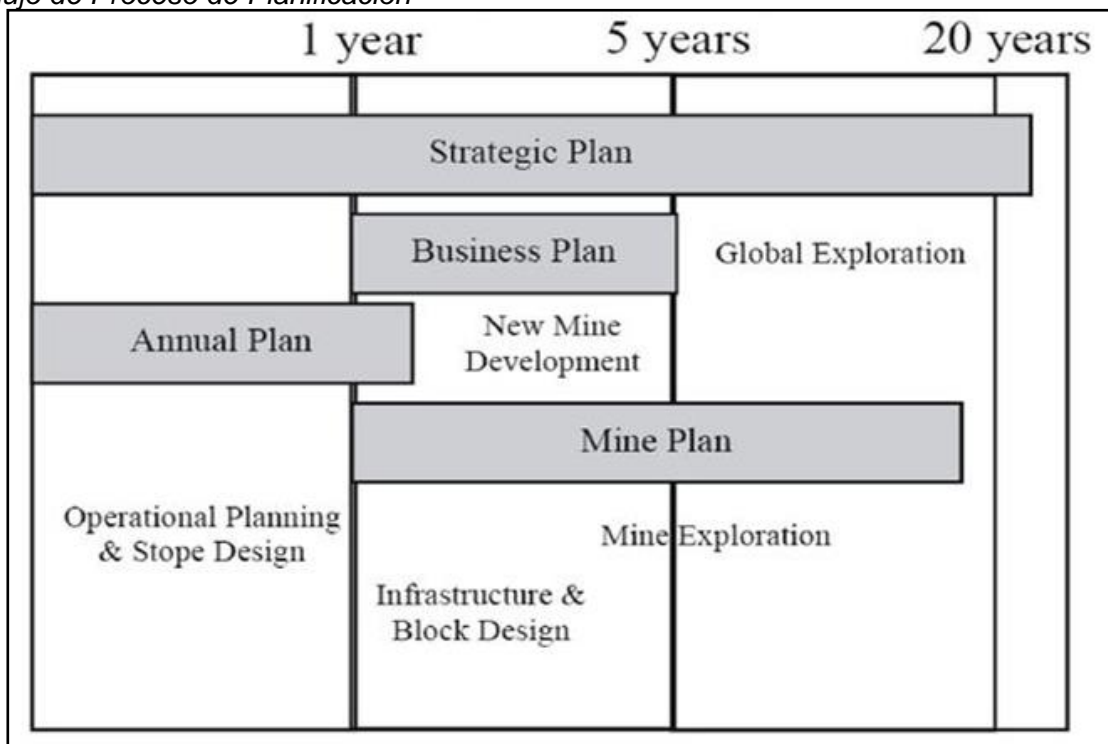
### 2.2.6 Corto plazo

El horizonte de tiempo de este plan es diario, semanal, mensual y trimestral. Es en esta etapa del planeamiento donde se realiza el análisis detallado de los recursos empleados en la operación minera. Es en esta etapa donde se materializa el plan de largo y mediano plazo.

La información operativa recolectada retroalimenta al plan de mediano plazo. La complejidad de elaboraciones de planes estará sujeta a las características propias de cada proyecto u operación, entre los principales factores tenemos: yacimiento, procesos, objetivos de la empresa, asuntos sociales, etc.

**Figura 7**

*Flujo de Proceso de Planificación*



Nota: De "Planificación de minas contexto", por E. Rubio, 2017

### 2.3 Producción de concentrados de cobre

La producción de concentrados de cobre es un proceso complejo que implica varias etapas unitarias desde la extracción del mineral hasta la obtención del concentrado final. Inicialmente, el mineral mena de cobre se extrae mediante métodos de minado a tajo abierto o subterránea, que incluyen perforación, voladura, carguío y acarreo. Una vez

extraído, el mineral es chancado y molido para reducir su tamaño y liberar los minerales de cobre de la roca huésped. Posteriormente, el material molido es sometido a procesos de concentración, principalmente la flotación, donde se separan los minerales de cobre del material estéril utilizando reactivos químicos y aire, formando una espuma que contiene el cobre concentrado.

Este concentrado, que tiene un alto contenido en cobre, se deshidrata para posteriormente enviarse para pasar a las fundiciones y de ahí a la posterior refinación para, finalmente, obtener el cobre metálico. La eficiencia de cada etapa es importante para maximizar el cobre recuperado y asegurarse de que el proceso sea económicamente viable (Wills & Finch, 2016). A continuación, se describen algunas consideraciones en la producción del concentrado de cobre.

### ***2.3.1 Planta concentradora***

Una planta concentradora de cobre, es una instalación industrial que se encuentra en el proceso de tratamiento del mineral extraído, para aumentar la concentración de este metal antes de su envío a las fundiciones; tarea que consta de varias etapas. La primera es el chancado y la molienda del mineral para reducir el tamaño de este al tiempo de liberar los minerales de cobre de la roca huésped. La segunda es la flotación, mediante la cual el mineral molido, con el uso de reactivos químicos y aire, se separa de forma diferencial de los minerales de cobre a partir del material estéril, formando una espuma enriquecida que contiene el concentrado de cobre.

Este concentrado se deshidrata mediante filtración y secado, entregándose así un producto con un alto contenido de cobre. La eficiencia de la planta concentradora depende de la optimización de cada una de estas etapas, así como el control de las variables operativas y el uso de tecnología de avanzada para mejorar la recuperación y la calidad del concentrado (Wills & Finch, 2016).



Los principales factores que la afectan son los siguientes:

- **La granulometría del mineral:**

El tamaño de las partículas del mineral que se ha sometido previamente a una etapa de trituración y molienda, es determinante para garantizar la correcta liberación de los minerales de cobre. Partículas del mineral demasiado grandes no liberan un cobre suficiente. Por otro lado, partículas demasiado finas pueden dar lugar a problemas de manejo y a la eficiencia del proceso de flotación (Wills & Finch, 2016).

- **Mineralógica:**

Debido a que la complejidad, la naturaleza y la variabilidad de la matriz mineralógica del mineral sacado de la zona productiva puede incidir de una forma muy importante en la separación del Cu en flotación, la posible presencia de minerales asociados o gangas puede dificultar dicha separación o bien parciales de la recuperación (Fuerstenau & Kenneth, 2003).

- **Dosificación y tipo de reactivos:**

La selección y la dosificación de los reactivos químicos (colectores, espumantes y modificadores) en la etapa de flotación son referidos como clave, ya que unos reactivos incorrectos o en una incorrecta dosificación pueden disminuir la recuperación y producir espuma no deseada (Wills & Finch, 2016).

- **pH del medio:**

El control del pH en el proceso de flotación también es un factor clave ya que optimiza las condiciones de la superficie de los minerales de las partículas, así como la interacción de estas mismas partículas con los reactivos. Un pH inadecuado puede disminuir la eficiencia de la flotación y afectar negativamente la recuperación del cobre (Wills & Finch, 2016).

- **Calidad del agua de proceso:**

La pureza y composición química del agua utilizada en el procesamiento de minerales puede influir significativamente en la eficiencia de los reactivos y en la

formación de espuma. Impurezas en el agua pueden interferir con el proceso de flotación y reducir la recuperación del cobre (Fuerstenau & Kenneth, 2003).

La recuperación de un mineral en una planta concentradora se calcula generalmente utilizando la siguiente fórmula:

$$(\text{Recuperación } (\%)) = \left( \frac{Cxc}{Fxf} \right) * 100 \quad (1)$$

Donde:

$C$  = Masa del concentrado

$c$  = Ley del concentrado (contenido de metal en el concentrado)

$F$  = Masa de la alimentación

$f$  = Ley de la alimentación (contenido de metal en la alimentación)

Esta fórmula representa la eficiencia con la que el metal valioso se recupera del mineral alimentado a la planta.

### **2.3.3 Comercialización de cobre**

Un concentrado se encuentra como un producto cuyo valor aumenta a expensas de metales con un elevado valor económico. Los concentrados se producen a partir de distintos tratamientos, siendo la flotación y la separación gravimétrica los más conocidos. La forma que recibe un concentrado suele corresponder con el metal de mayor valor del concentrado en cuestión (cobre, zinc, plomo o metales similares). Por este motivo, los concentrados son conocidos por el metal objetivo, aunque también contienen otros elementos y materiales de desecho que tienen un carácter de subproducto (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2025).

Siempre es importante recordar que el contenido de los concentrados es diferente. La existencia de esta variabilidad está condicionada por las características propias del yacimiento del que se obtiene el mineral, porque cada yacimiento tiene unas características estrictamente geológicas distintas.

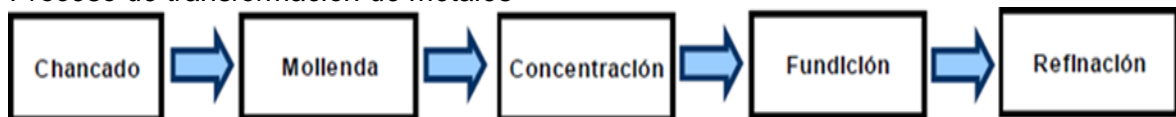
A lo que se añade la composición que en un yacimiento concreto también es naturalmente no uniforme. Por consiguiente, se da la circunstancia de que, aun viniendo

los concentrados de un mismo yacimiento, su composición será similar pero no del todo la misma (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía, 2025). Por tal motivo, el concentrado tendrá un grado de concentración distinto y tendrá un valor distinto de acuerdo con sus características, pudiendo mejorarse este último a través de las mezclas en el stock de los concentrados.

Los concentrados son un producto que se comercializa a nivel mundial y deben pasar por la fundición y refinación para obtener de ellos metales con un mayor nivel de pureza (de modo que puedan ser utilizados en galvanizadoras, acerías, etc.)

### Figura 9

*Proceso de transformación de metales*



Nota. De "Guía para la valorización de concentrados metálicos", por Sociedad Nacional de Minería y Petróleo, 2025.

Los concentrados muchas veces son libres de contaminantes, por lo que las refinерías buscan incrementar su rendimiento aplicando penalidades en sus contratos de compra. Así como contienen impurezas, también muchas veces contiene elementos que le agregan valor al concentrado, y pueden ser recuperados en el proceso de fundición y refinación.

**Tabla 2***Elementos considerados en la valorización de concentrados*

	<b>Conc. de Cobre</b>	<b>Conc. de Zinc</b>	<b>Conc. de Plomo</b>
<b>Elemento Pagables</b>			
Plata		x	x
Oro	x	x	
Cobre	x		
Zinc		x	
Plomo			x
<b>Elemento Penalizable</b>			
Antimonio	x	x	x
Arsénica	x	x	x
Mercurio	x		x
Manganeso		x	
Bismuto	x		x
Plomo			
Cloro	x		
Cadmio		x	
Fluor	x		
Fierro			
Sílice		x	
Zinc	x		x

Nota. De "Guía para la valorización de concentrados metálicos", por Sociedad Nacional de Minería y Petróleo, 2025.

Del contrato de comercialización de concentrados se obtiene el valor del ingreso por tonelada de concentrado, el cual se obtiene de una cierta cantidad de mineral proveniente de mina que ha sido tratado, de esto se puede inferir el valor de una tonelada de mineral en mina.

## 2.4 Ecosistema de datos en procesos mineros

El ecosistema de datos en minería integra fuentes de información provenientes de operaciones unitarias, sistemas de control y sensores distribuidos a lo largo de toda la cadena de valor. Un componente central de este ecosistema es el Data Lake, que permite centralizar grandes volúmenes de datos estructurados y no estructurados en un solo repositorio. Las soluciones basadas en Microsoft Azure Data Lake destacan por su escalabilidad en la nube, su compatibilidad con herramientas de análisis avanzado (Power BI, Synapse Analytics) y su integración con arquitecturas híbridas de cloud y edge computing.

El Data Lake promueve el seguimiento en línea para las variables más relevantes en minería, tales como la roca mineral procesada, la producción en la planta, la condición de equipos de mantenimiento, los consumos energéticos, las condiciones geotécnicas, entre otros. Este ecosistema se estructura en cuatro aspectos fundamentales:

- **Adquisición de datos:**

Comprenden la información que se extrae en la mina y en la planta, usando sensores IoT, equipos con telemetría, sistemas SCADA, ERP y software de planeación. Las variables incluyen producción, mantenimiento, condiciones geotécnicas, consumos de energía y agua, etc.

- **Ingesta y almacenamiento:**

La información que se extrae se envía a plataformas de integración y almacenamiento centralizado. Uno de ellos es el de los Data Lake en la nube, como Microsoft Azure Data Lake Storage, que permite almacenar y organizar información histórica y en línea, de forma estructurada y no estructurada.

- **Procesamiento y análisis:**

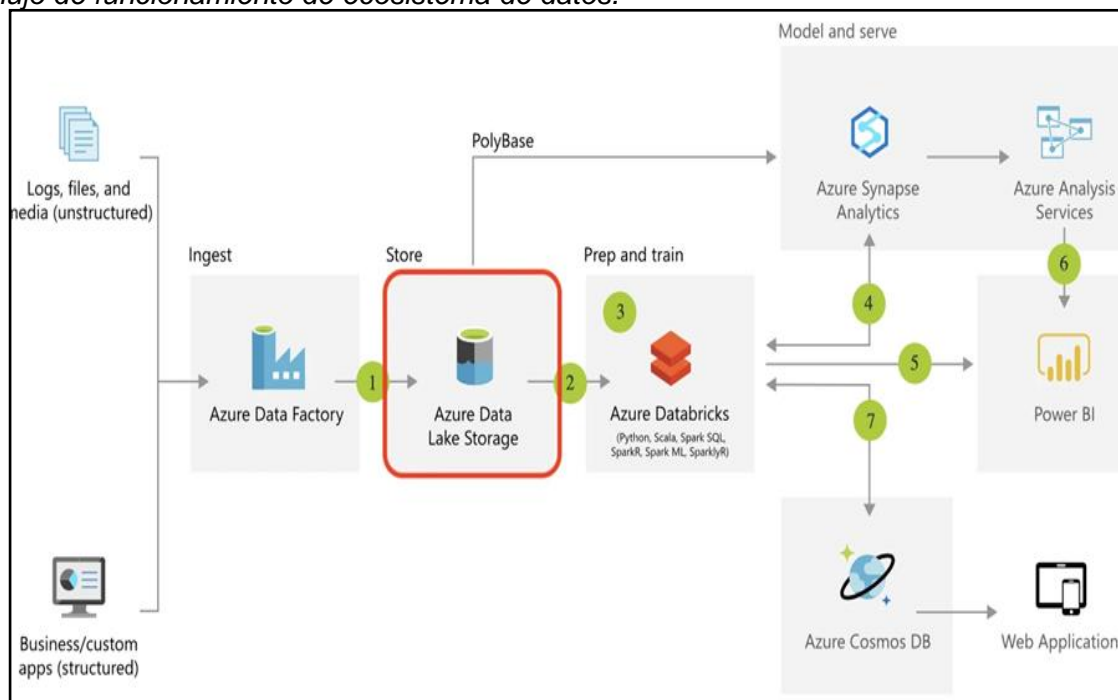
La información almacenada es transformada con herramientas ETL (Extract, Transform, Load) y entornos analíticos, como Azure Synapse o Databricks. Se aplican algoritmos de machine learning y analítica predictiva para identificar patrones de desempeño, predecir fallas y optimizar el proceso productivo.

- **Visualización y control:**

Los resultados se presentan en tableros interactivos (Power BI, Tableau) que consolidan indicadores clave (KPIs) de producción, costos, seguridad y sostenibilidad. La visualización mencionada favorece una pronta toma de decisiones por parte de las áreas operativas y directivas.

**Figura 10**

*Flujo de funcionamiento de ecosistema de datos.*



Nota: De "¿Qué es un Data Lake?", por Lituus, 2025

## 2.5 Evaluación financiera

La evaluación económica y financiera de los casos de negocio es una práctica sobre la que casi no se discute durante la toma de decisiones en el ámbito empresarial, y que consiste en el empleo de varias metodologías y herramientas para determinar la viabilidad y la rentabilidad de proyectos o decisiones estratégicas. Estos son los métodos más usados: el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Período de Recuperación, el Índice de Rentabilidad (IR), o la combinación de análisis de sensibilidad y escenarios.

### 2.5.1 Valor Actual Neto (VAN)

El VAN es un método de descuento que pone en relación el valor presente de los flujos de caja futuros que se esperan con la cantidad de dinero que se destina a la inversión (inversión inicial); en concreto, el VAN es la diferencia entre ambos. Por lo tanto, un VAN positivo significa que el proyecto generará un valor por encima de la inversión inicial, y un VAN negativo significa que el proyecto generará un valor inferior a la inversión inicial. En este sentido, el VAN resulta de utilidad para comparativas distintas de los proyectos en función de su contribución al valor de la empresa (Brealey et al., 2019).

$$(VAN = \sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1+r)^t} - I \quad (2)$$

Donde:

$F_t$  = Flujo de caja en el periodo

$r$  = Tasa de descuento

$t$  = Periodo de tiempo

$I$  = Inversión inicial

### 2.5.2 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La tasa interna de retorno es la tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos de caja futuros de un proyecto con el costo inicial del mismo, haciendo que el valor presente neto (VPN) sea igual a cero. Un proyecto resulta ser viable si la TIR es superior a la tasa de coste de capital que tiene la empresa (Ross, Westerfield, Jaffe, 2018).

$$(VPN = \sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} - I = 0 \quad (3)$$

Donde:

$F_t$  = Flujo de caja en el periodo

$r$  = Tasa de descuento

$t$  = Periodo de tiempo

$I$  = Inversión inicial

## **2.6 Modelo conceptual**

El modelo conceptual es una representación abstracta que describe los elementos clave del sistema de estudio y cómo se relacionan entre sí. En este caso, el modelo conceptual para la reducción de la variabilidad de ley de alimentación a la planta concentradora integra las variables, justificación y diseño del modelo para optimizar el control del proceso y la recuperación.

### **2.6.1 Variables**

- **Variables independientes:**

Incertidumbre y variabilidad de ley de alimentación.

- **Variables dependientes:**

Recuperación metalúrgica.

### **2.6.2 Justificación**

El diseño de un modelo conceptual para la reducción de la incertidumbre y variabilidad de la ley es fundamental por las siguientes razones:

**2.5.2.1 Optimización de procesos.** Permite identificar y controlar las fuentes de variabilidad, reduciendo la dispersión de datos y mejorando la estabilidad del proceso.

**2.5.2.2 Mejoras operativas.** Incrementa la precisión del control de la ley y reduce la dilución en las etapas de minado, con lo cual se tiene una mayor predictibilidad en la ley alimentada a planta concentradora.

**2.5.2.3 Impacto económico.** Genera mayores ingresos debido al incremento de recuperación metalúrgica y a la optimización del uso de los recursos en planta concentradora.

Además, reduce costos por mayor eficiencia en uso de reactivos en planta concentradora.

**2.5.2.4 Sostenibilidad.** Mejora el manejo de recursos, reduciendo desperdicios y optimizando el uso de los activos de planta.

### **2.6.3 *Diseño de un modelo conceptual***

El diseño del modelo conceptual sigue estos pasos:

#### **Identificación de componentes clave:**

- Determinar las variables críticas que afectan la alimentación a planta y su variabilidad e incertidumbre.
- Definir las interacciones entre las etapas del proceso: voladura, acarreo, descarga, remanejo y alimentación.

#### **Representación del sistema:**

- Crear un diagrama que muestre cómo las variables interactúan, desde el modelo de bloques de mina hasta la alimentación a planta.
- Incorporar herramientas tecnológicas como Ore Pro Predict, modelamiento de stocks y herramientas de seguimiento en el proceso; los cuales son integrados en un ecosistema de datos, como un sistema de gestión automatizado.

#### **Simulación de escenarios:**

- Utilizar datos históricos y simulaciones para predecir el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones operativas.
- Ajustar el modelo según los resultados para maximizar la precisión.

#### **Automatización y validación:**

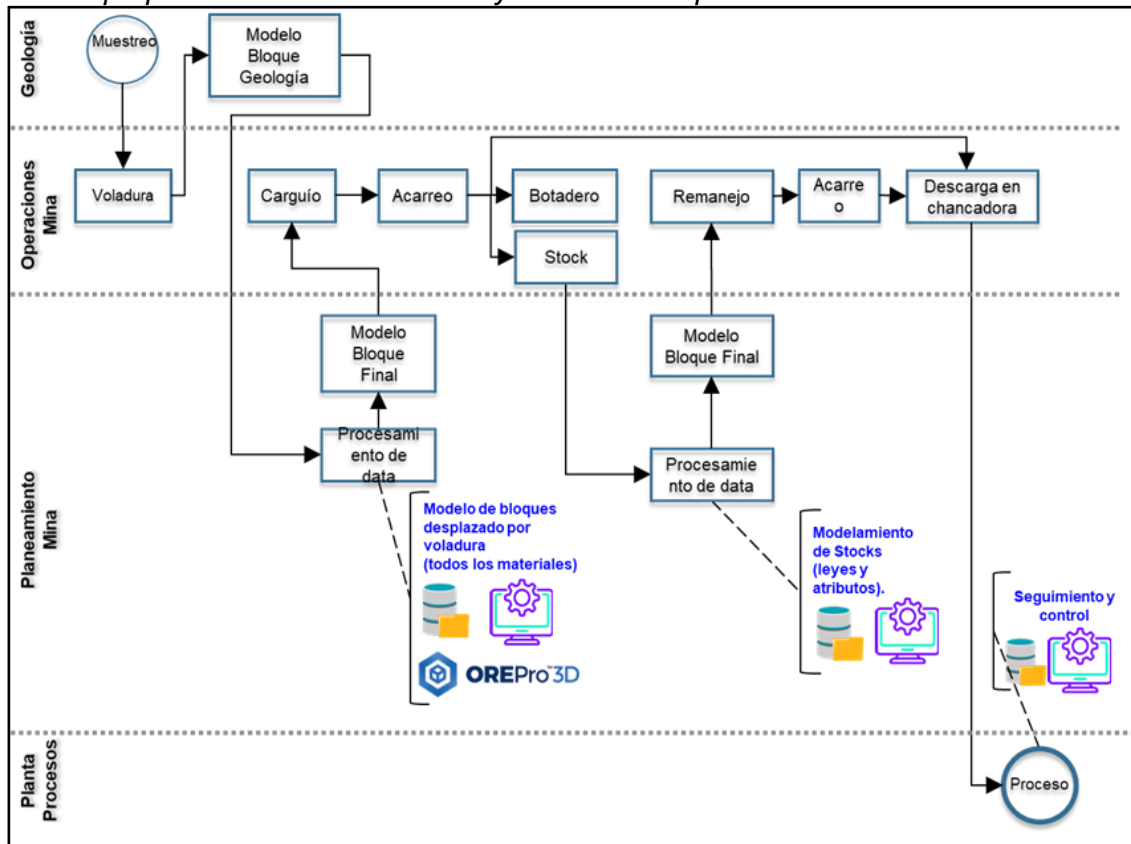
- Implementar herramientas automatizadas para recopilar, procesar y analizar datos en tiempo real.
- Validar el modelo con datos operativos y ajustar según sea necesario para garantizar su aplicabilidad y efectividad.

El modelo conceptual sirve como base para la toma de decisiones estratégicas, permitiendo a los operadores y gerentes mejorar el control del proceso, incrementar la recuperación y maximizar el rendimiento económico de la operación minera.

A continuación, se presentan procesos de ley de alimentación a planta del proceso propuesto (To-Be).

**Figura 11**

*Proceso propuesto de estimación de ley a alimentar a planta.*



Nota: Elaboración propia.

## Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

### 3.1 Enfoque, alcance y diseño de la investigación

#### 3.1.1 *Enfoque de la investigación*

La investigación sigue un enfoque cuantitativo porque utiliza datos numéricos para medir la variabilidad de la ley del mineral, la eficiencia de recuperación, el impacto económico y la optimización de costos antes y después de la implementación del piloto del sistema. Este trabajo busca comprobar la efectividad de un modelo híbrido, que combina el uso de softwares comerciales (OrePro Predict, MinePlan 3D, PI Systems, Despacho mina) con metodologías propias desarrolladas de gestión de data para mineral enviado a planta.

El enfoque cuantitativo se justifica porque la hipótesis central de la investigación plantea que la reducción de la variabilidad e incertidumbre en la ley de alimentación genera una mejora en la recuperación metalúrgica.

#### 3.1.2 *Alcance de la investigación*

La Investigación tiene alcance descriptivo y explicativo que abarca las siguientes áreas:

- Evaluación de la variabilidad e incertidumbre de leyes en los sulfuros de alta ley alimentados a planta concentradora (materiales del piloto), minerales de bornitas y calcopiritas, los cuales representa el 40% del tonelaje total. Dentro de los alcances del piloto, no se analiza el impacto en minerales de baja ley, los cuales representan el 60% del yacimiento.
- Integración de OrePro Predict con un modelo de gestión de datos para mejorar la predicción del desplazamiento por voladura.
- Viabilidad económica de la implementación de un sistema de control de ley avanzado que integre el modelo desplazado por voladura (OrePro Predict), modelamiento de stocks y reportabilidad para seguimiento.

- Evaluación financiera de la propuesta, midiendo impacto en el VAN y la TIR de la operación.

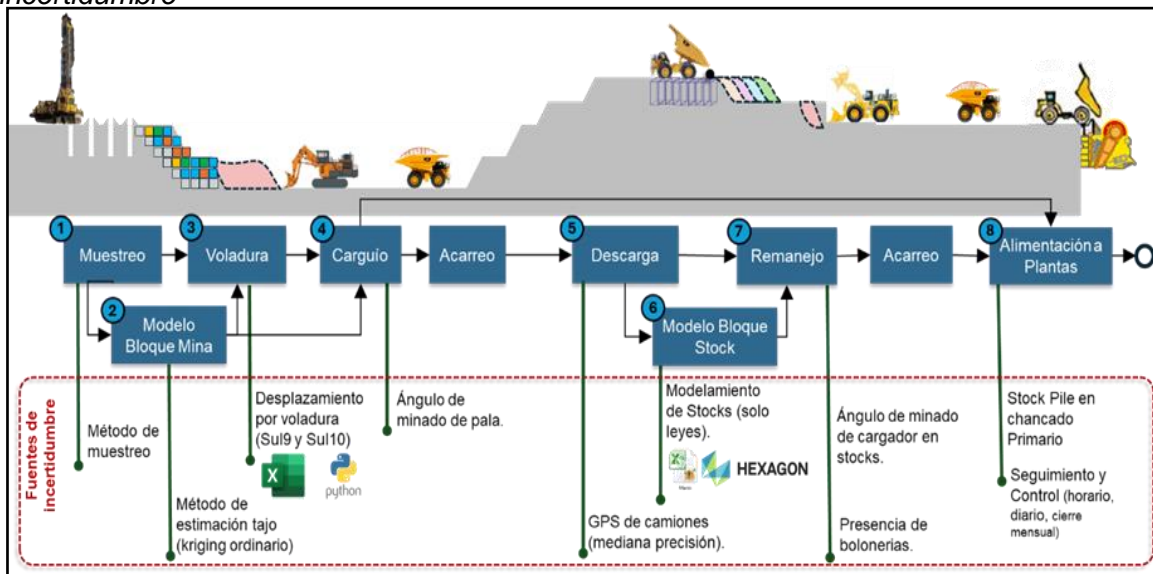
Limitación: el estudio se centra en minerales sulfurados de alta ley, sin considerar óxidos ni materiales de baja ley, los cuales requieren procesos metalúrgicos distintos (lixiviación, SX-EW).

La presente investigación busca reducir la variabilidad e incertidumbre de la ley de alimentación a la planta concentradora, enfocándose en tres de las principales fuentes de incertidumbre: el modelo desplazado por voladura, el modelo de bloques de los stocks y el sistema de seguimiento y control de la ley de alimentación a planta.

En la siguiente Figura 12 se puede observar las principales fuentes de incertidumbre de la ley de alimentación a planta.

**Figura 12**

*Proceso de estimación de ley de alimentación a plantas y principales fuentes de incertidumbre*



Nota: Elaboración propia.

### 3.1.3 Diseño de investigación Cuasi-experimental

Se desarrolla un diseño cuasi-experimental con pretest y postest en un solo grupo de estudio (piloto), ya que no se cuenta con la posibilidad de asignación aleatoria ni con un grupo control, pero se evalúa el impacto de la intervención: antes y después de la implementación de sistema de control de ley avanzado.

**3.1.3.1 Recolección de datos.** Para la investigación se utiliza datos históricos de leyes de alimentación, factor F2 (ley de mina vs planta) y recuperación de minerales sulfurados obtenidos de la base de datos del procesamiento de planta concentradora.

**3.1.3.2 Modelado y simulación.** Durante el piloto se utiliza sistema integral con aplicación de OrePro Predict para modelar el desplazamiento por voladura y modelo automatizado de bloques (leyes) en los stocks. Asimismo, se recopila información de planta para estimar impacto en la recuperación y variabilidad.

**3.1.3.3 Validación.** Se realiza la comparación de los resultados con de la aplicación de sistema integral con datos reales de operación. Además, la revisión del comportamiento de la reconciliación F2 (mina vs planta) para medir la incertidumbre y el coeficiente de variación para medir la variabilidad de ley en la alimentación a planta.

## **3.2 Procedimiento experimental**

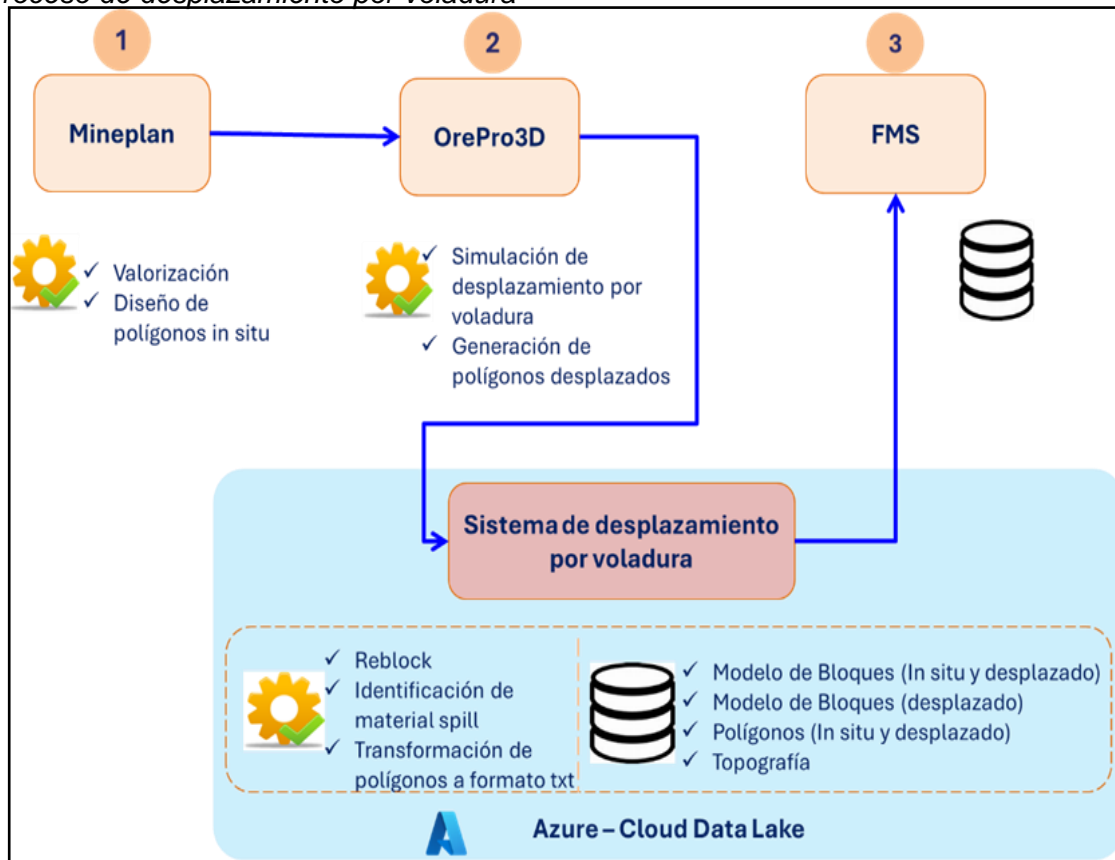
### **3.2.1 *Diseño del ecosistema de datos***

Como parte de la iniciativa de la tesis se planteó un ecosistema de datos que integra los principales procesos relacionados con el control de la variabilidad e incertidumbre de la ley de mina a planta. Este ecosistema se considerará implementar sobre la infraestructura en la nube de Azure, lo que permite centralizar la información, optimizar los tiempos de procesamiento y fortalecer la trazabilidad de los datos. El sistema de control de ley avanzado se estructura en tres módulos principales, cada uno con su respectivo flujo de procesos:

**3.2.1.1 Módulo de desplazamiento por voladura.** Se plantea un sistema para el almacenamiento y procesamiento de la información de desplazamientos de materiales integrando herramientas como MinePlan 3D, OrePro3D y aplicación web php. Asimismo, se incorpora la identificación, gestión y recuperación de material spill, automatizando todo el proceso, una mejora en la calidad de los datos y una gestión centralizada en bases de datos. Los resultados del modelo de bloques desplazado servirán como insumo para la planificación de la ley de alimentación por turno (blending) y para la verificación en tiempo real de las leyes reportadas por el sistema de despacho de mina.

**Figura 13**

*Proceso de desplazamiento por voladura*

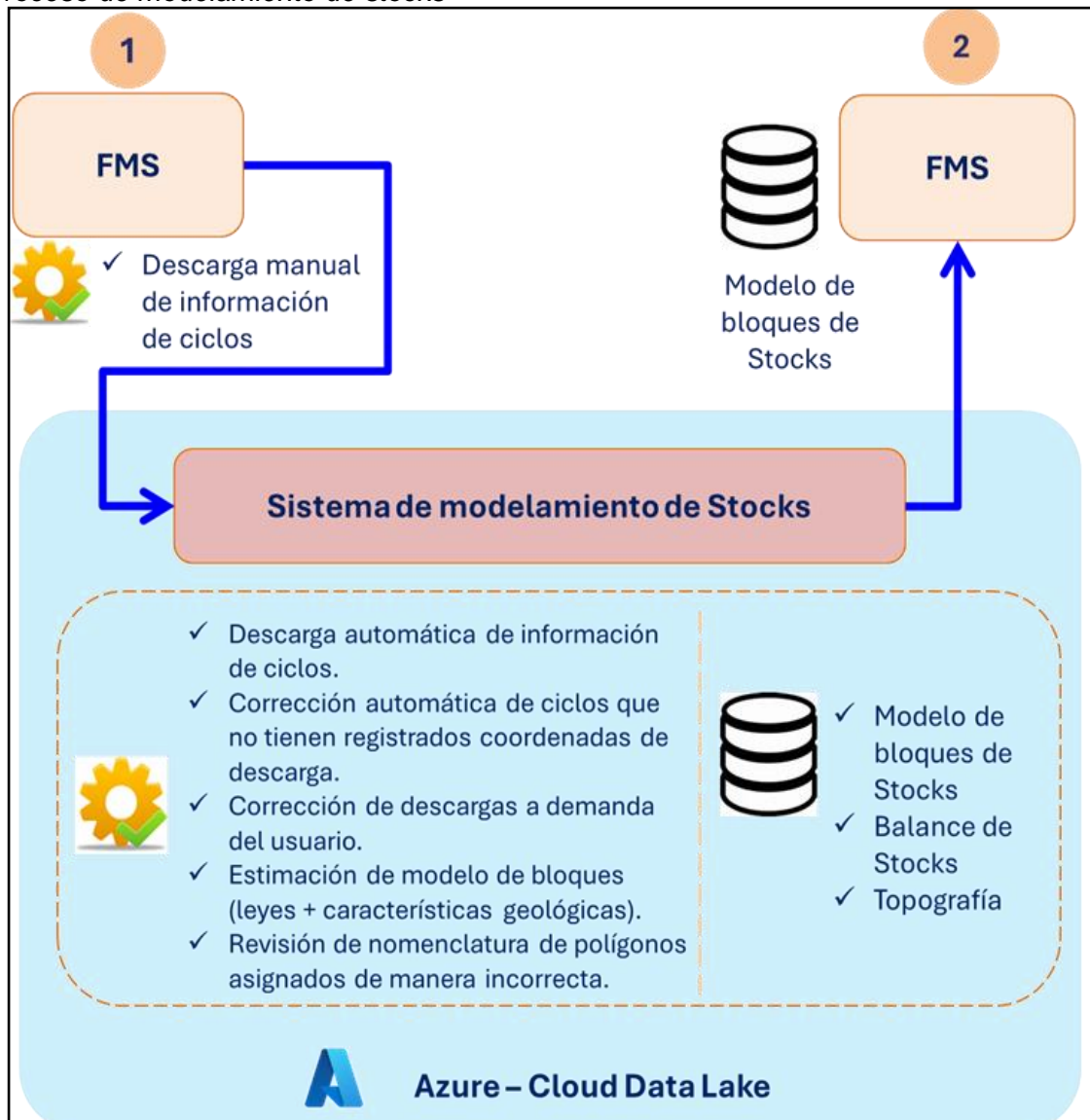


Nota. De Astay Mining Technology, 2025.

**3.2.1.2 Módulo de modelamiento de Stocks.** Se plantea un sistema confiable para el inventario y reconciliación de stocks, en una base de datos, y el desarrollo de algoritmos para la estimación de leyes (inverso a la distancia al cuadrado) y características geológicas (moda estadística) de los stocks, interoperando con información de descargas (GPS de camiones) y topografía. Además, se plantea una aplicación web con el objetivo de tener un control más preciso de cierres e inventarios. Los datos de leyes y características geológicas de los stocks se aplicarán en los planes por turno de la alimentación a planta (blending) y en la validación en tiempo real de las leyes enviadas, según lo reportado por el sistema de despacho de mina.

**Figura 14**

Proceso de modelamiento de stocks

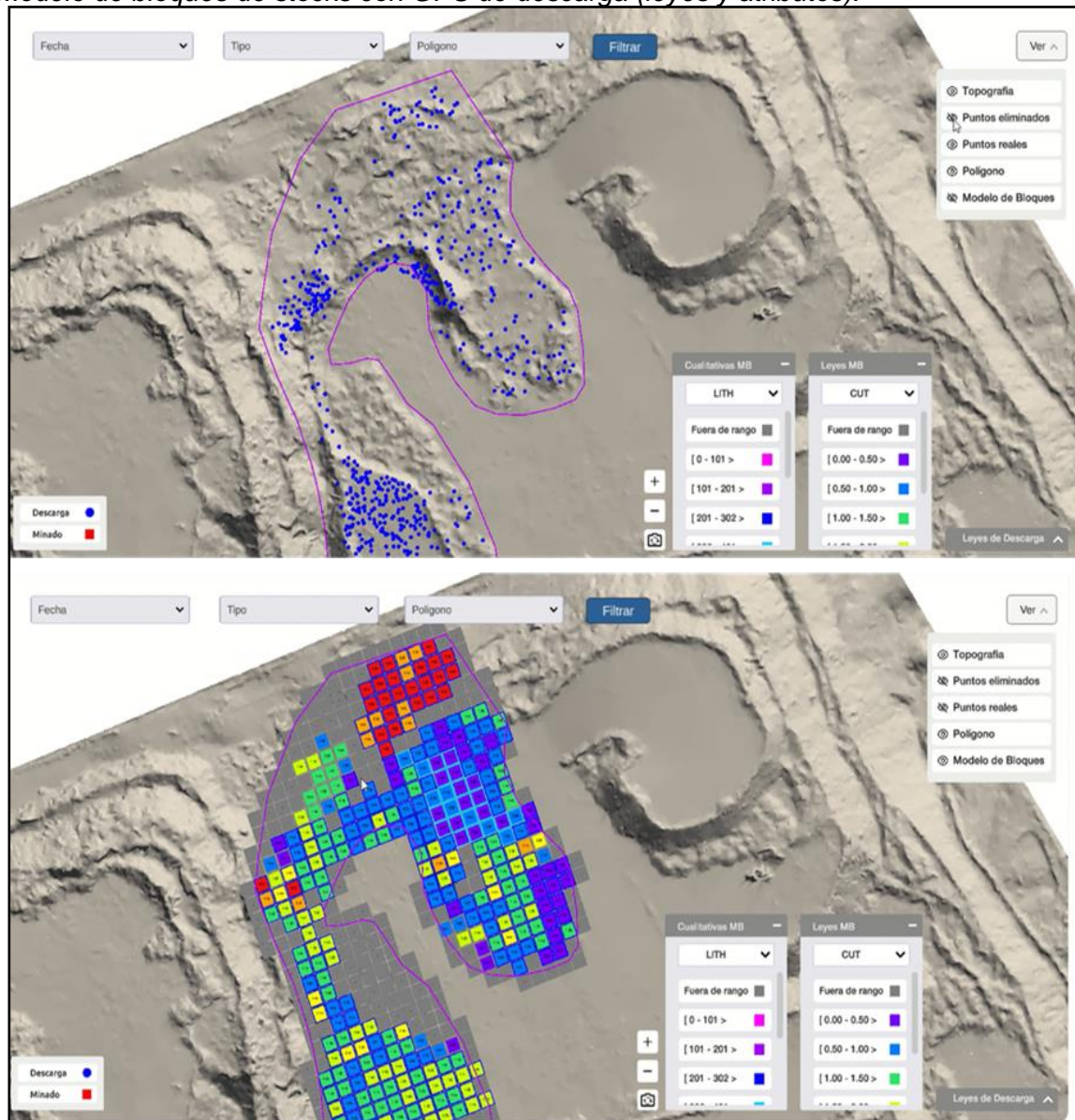


Nota. De Astay Mining Technology, 2025.

Para el modelamiento de stocks es recomendable el método del inverso a la distancia (IDW), ya que permite una interpolación más representativa de la variabilidad inherente al material almacenado. Métodos como kriging o vecino más cercano tienden a generar sesgos: el primero porque requiere una continuidad espacial y por su efecto de suavizado excesivo, y el segundo por asignaciones discontinuas poco realistas ya que un bloque puede estar conformado por más de 15 descargas (dependiendo tamaño de bloque).

**Figura 15**

*Modelo de bloques de stocks con GPS de descarga (leyes y atributos).*

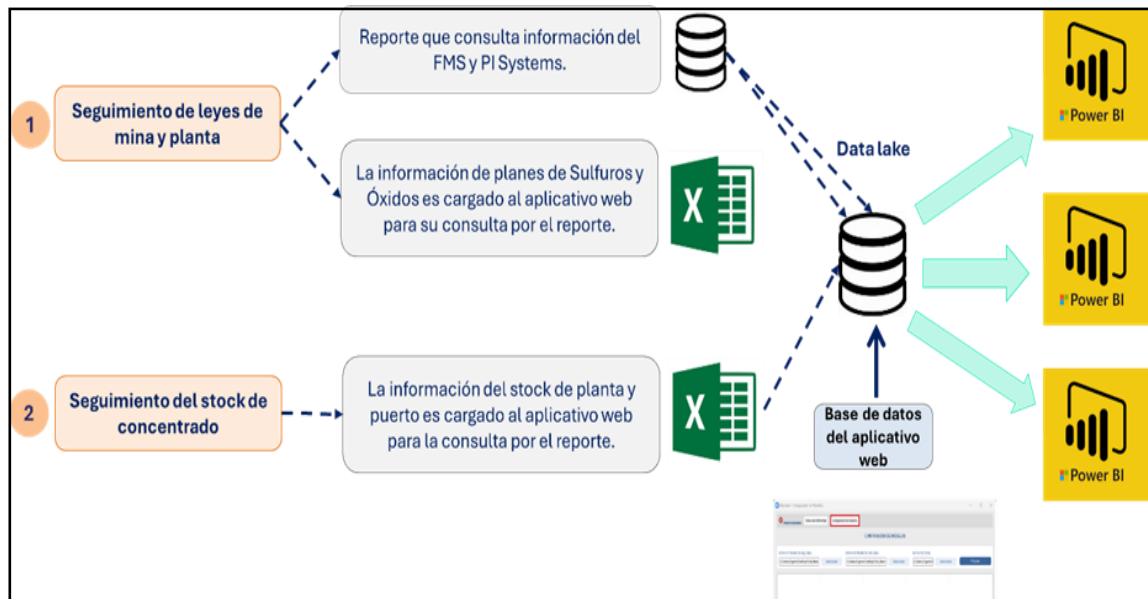


Nota. De Astay Mining Technology, 2025.

**3.2.1.3 Módulo de reportabilidad.** Se plantean reportes automatizados para el seguimiento de leyes de mina y planta, consolidando la información del sistema FMS (sistema de manejo de flota), PI Systems (leyes de planta) y modelos de bloques en una base de datos web que facilita su consulta, casi en tiempo real, por las áreas operativas y de planeamiento. Esto permite la digitalización de reportes, brindando mayor transparencia y un mejor control de la variabilidad.

**Figura 16**

*Proceso de modelamiento de stocks*



Nota. De Astay Mining Technology, 2025.

**3.2.2 Fase Pretest: Data Pre Piloto**

Se realiza en la planta, utilizando la herramienta llamado cortador de muestra se coge la muestra cada 15 minutos y con el rayo XRF se analizan las muestras tomadas que permiten resultados en tiempo real que se registran en el software PI Systems. Después estos datos se analizan con diferentes softwares de estadísticas tales como Excel, Python y Minitab, de esta manera se obtienen los resultados de la variabilidad de ley de alimentación en planta durante 7 meses.

**3.2.2.1 Descripción del proceso.** Las operaciones presentan alta variabilidad en las leyes de alimentación a planta debido a las siguientes causas:

- Efectos de desplazamiento por voladura no modelados.
- Dilución de materiales en etapas de acarreo y remanejo.
- Modelo de bloques de stocks sin la suficiente selectividad para detectar variaciones.
- Limitada sistematización de datos para el control de la variabilidad.
- Simulaciones para estimar el impacto de las mejoras en la recuperación.

**3.2.2.2 Resultados identificados.** El coeficiente de variación (CV) de la ley de alimentación a la planta concentradora se sitúa en el percentil 75, lo que indica una alta variabilidad en el proceso. De acuerdo con los estándares establecidos por Negrón (2017), un CV promedio superior al 15% es considerado indicativo de un proceso inestable. Esta situación se manifiesta especialmente en la el histórico de muestras cada 15 min hacia la planta concentradora, ver Figura 17, donde se observa una variabilidad significativa a nivel de resolución diaria.

### **3.2.3 Fase Pretest: Data Pos Piloto**

Después del análisis en la fase data se obtiene en la fase post data el coeficiente de variación (CV) menor igual a 10% se considera que el proceso es estable. El piloto se realizó entre los meses de octubre y noviembre del 2023 (2 meses).

**3.2.3.1 Análisis del proceso mejorado.** Estas son las medidas implementadas:

- **Incorporación de OrePro Predict**

Para modelar desplazamientos por voladura y generar modelo de bloques desplazados por voladura lo cual será cargado al sistema de despacho mina.

- **Implementación del modelo de bloques de stocks automatizado.**

Con información de despacho mina, coordenadas de descarga, leyes y variables geológicas de descarga en stocks; utilizando alta precisión de las palas en el origen (mina) y GPS de camiones en la descarga (stock).

- **Automatización de reportabilidad**

Para seguimiento y control en tiempo real de la precisión de la ley planificada.

**3.2.3.2 Resultados Observados.** Se obtienen los siguientes resultados:

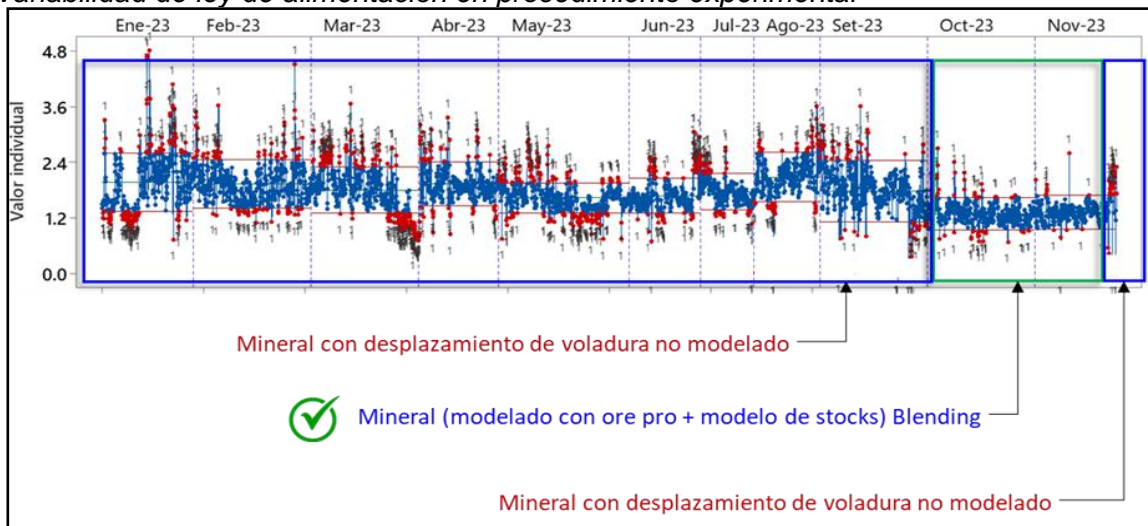
- Reducción del coeficiente de variación al Percentil 50 en la ley de cobre alimentado a planta concentradora, la reducción de variabilidad se evidencia en la Figura 17, esto evidencia la reducción de variabilidad de la ley alimentada a planta durante el piloto.
- Mejora en la reconciliación mina–planta (F2), la desviación entre leyes planificadas y leyes realmente alimentadas a planta se redujo de -4% a -2.5%, evidenciando un

mayor grado de consistencia y trazabilidad en la cadena mina–planta, tal como se puede observar en la Figura 18, lo cual represente la reducción de la incertidumbre en la ley alimentada a planta.

- Incremento en la recuperación metalúrgica de +0.36% en altas leyes alimentadas a planta (transicional, calcosinas, bornitas y calcopiritas), lo que representa incremento del +0.15% en la recuperación de todos los materiales respecto al plan LOM 2023, lo cual se puede observar a mayor detalle en la figura 19.
- Mejoras en la predictibilidad de las leyes de alimentación y una mayor estabilidad en la operación.

**Figura 17**

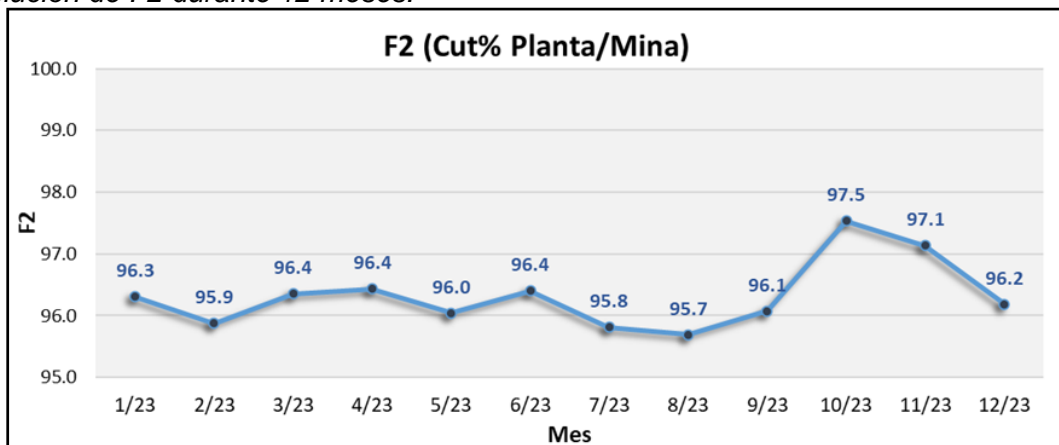
*Variabilidad de ley de alimentación en procedimiento experimental*



Nota: Elaboración propia

**Figura 18**

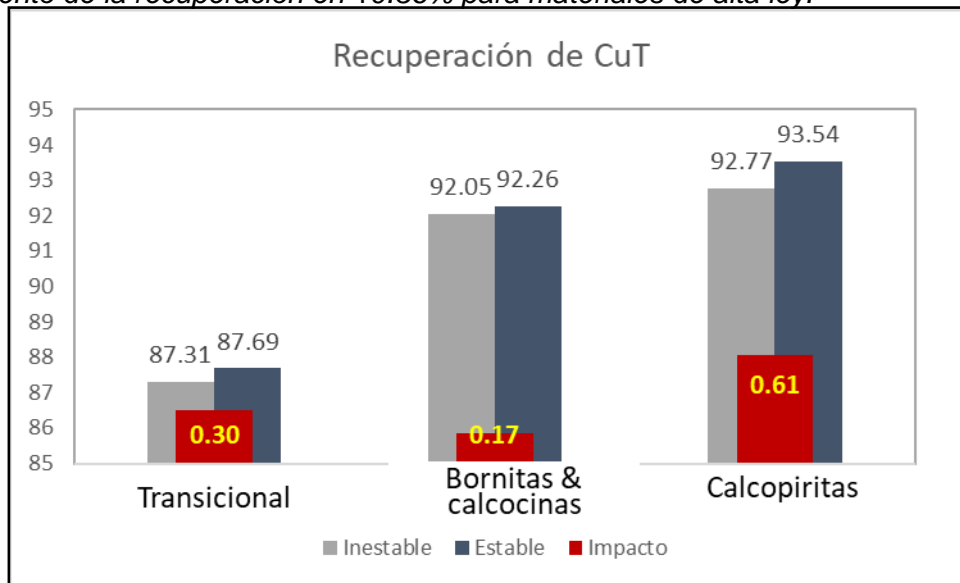
*Evolución de F2 durante 12 meses.*



Nota: Elaboración propia

**Figura 19**

*Incremento de la recuperación en +0.36% para materiales de alta ley.*



Nota: Elaboración propia

### **3.2.4 Impacto general**

La implementación de un sistema de control de ley avanzado en la alimentación a planta concentradora permite optimizar los procesos, incrementando la recuperación metalúrgica debido a la reducción de la variabilidad e incertidumbre de ley de alimentación en la planta concentradora, lo cual, aumenta la eficiencia de la operación.

## Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

### 4.1 Cálculo de indicadores financieros

Este capítulo presenta el análisis detallado de los resultados económicos financieros derivados de la implementación del sistema de control de ley avanzado en el envío de mineral a planta concentradora. Se evalúa la inversión inicial (CAPEX), los costos operativos anuales (OPEX) y los ingresos proyectados derivados del incremento en la recuperación metalúrgica. Asimismo, se desarrollan indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de retorno de la inversión (payback), que permiten validar la viabilidad económica y financiera del proyecto.

#### 4.1.1 Estimación de CAPEX

La inversión destinada a la implementación del sistema de control de ley avanzado asciende a USD 150,000. Este sistema será desarrollado por una empresa especializada y contempla el diseño e implementación de la solución tecnológica, la ejecución de controles de calidad, el acondicionamiento de la infraestructura necesaria para su integración tecnológica, así como el entrenamiento operativo del personal involucrado. Esta inversión es financiada el 100% con capital propio de la empresa minera.

#### 4.1.2 Estimación de OPEX

Los costos operativos anuales asociados a la implementación del sistema de control de ley avanzado se detallan a continuación:

- USD 80,000 anuales destinados al mantenimiento de la licencia de software OrePro Predict, vigente toda la vida útil del proyecto (Life of Mine - LOM).
- USD 3,000 anuales para el mantenimiento del sistema de automatización.
- USD 6,000 anuales correspondiente al mantenimiento del ecosistema de datos, el cual, sustenta la operación continua de una infraestructura tecnológica basada en plataformas como Microsoft, Databricks y Azure Data Factory.

### 4.1.3 Estimación de ingresos

De acuerdo a la Tabla 1, la implementación del sistema de control de ley avanzado permite a la empresa obtener mayores beneficios operativos. En este contexto, se obtiene un incremento de 0.15% de recuperación metalúrgica lo que representa una producción adicional de 1,079 toneladas métricas de finos de cobre. Este aumento en la producción genera ingresos adicionales de USD 7.1 millones anuales. Dichos ingresos permiten compensar la inversión del capital (CAPEX) con un periodo de recuperación (payback) de 0.78 años, lo que significa que la inversión se recupera en un plazo menor a 1 año.

**Tabla 3**

*Resultados económico – expresados en millones de dólares*

<b>RESULTADOS ECONÓMICOS</b>	<b>UM</b>	<b>IMPACTO EN LOM</b>
VAN	\$M real	2.315
Ventas	\$M real	7.065
Opex	\$M real	(0.976)
EBITDA	\$M real	6.089
	%	86.2%
Cobre Pagable	K tmf	1.079
Capex	\$M real	(0.150)
TIR	%	375.1%
FCL	\$M real	3.8
Payback	años	0.78

Nota: Elaboración propia

### 4.1.4 Estimación de VAN y TIR

La implementación del sistema de control de ley avanzado genera un Valor Presente Neto (VAN) de USD 2.315 millones, significa que la inversión de USD 150,000 genera un adicional de USD 2.315 millones. Este resultado es positivo y mayor a cero lo

que implica que esta propuesta de mejora es altamente rentable y viable desde el punto de vista financiero (Anexo 1).

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es 375.1%, siendo un valor significativamente superior al Costo de Oportunidad del Capital (COK) del 10%. Esta diferencia indica que la propuesta de mejora genera una rentabilidad considerablemente superior al rendimiento mínimo exigido por la inversión. En consecuencia, refleja un alto nivel de eficiencia en la utilización del capital invertido, lo cual, respalda la viabilidad y rentabilidad del proyecto con relación al riesgo del mercado (Anexo 1).

#### **4.1.5 Análisis de sensibilidad**

La implementación del sistema de control de ley avanzado propuesto, en el escenario base, muestra indicadores financieros muy atractivos (VAN de 2.31 MUSD y TIR de 375 %). Sin embargo, para validar su viabilidad se analizó distintos escenarios, considerando los cambios en la recuperación metalúrgica y la sensibilidad a los precios del cobre.

- **Escenario 0 (base):**

Mejora de 0.15 % en recuperación, VAN = 2.31 MUSD, TIR = 375 %, payback < 1 año.

- **Escenario 1 (conservador):**

Mejora de 0.05 % en recuperación, VAN = 0.35 MUSD, TIR = 60 %, payback = 3.1 años.

- **Escenario 2 (moderado):**

Mejora de 0.10 % en recuperación, VAN = 1.55 MUSD, TIR = 220 %, payback = 1.2 años.

Estos escenarios demuestran que, incluso bajo supuestos más conservadores, el proyecto sigue siendo financieramente viable, aunque con menor rentabilidad.

Dado que los ingresos dependen fuertemente del precio del cobre, se evaluó un rango de  $\pm 20$  % respecto al precio de cobre base (3.6 \$/lb):

- Escenario pesimista (-20 % precio): VAN = 1.38 MUSD, TIR = 260 %.
- Escenario neutro (precio base): VAN = 2.31 MUSD, TIR = 375 %.
- Escenario optimista (+20 % precio): VAN = 3.25 MUSD, TIR = >500 %.

Esto evidencia que, aun bajo condiciones desfavorables de mercado, el proyecto sigue generando valor, aunque reducido.

#### 4.2 Pruebas de significancia

La reconciliación mina-planta (F2) mostró una mejora sustancial tras la implementación del sistema. El error promedio de reconciliación se redujo de 4 % en la etapa pretest a 2.5 % en la etapa posttest. Esta diferencia fue estadísticamente significativa (t de Welch,  $p < 0.01$ ), con un tamaño de efecto medio (Cohen's  $d = 0.55$ ), lo que confirma que la mejora no es atribuible a fluctuaciones aleatorias. De forma complementaria, el coeficiente de variación (CV) de la ley de alimentación disminuyó de 21 % a 9.5 %, lo que representa una reducción superior al 50 % en la dispersión de los datos. La prueba de igualdad de CVs y el test de Levene confirmaron la diferencia de varianzas como altamente significativa ( $p < 0.01$ ).

**Tabla 4**

*Resultados de significancia estadística en indicadores (pretest vs posttest)*

Indicador	Pretest	Posttest	$\Delta$ (Cambio)	Prueba aplicada	Resultado
Reconciliación mina-planta (F2)	4.00%	2.50%	-1.5 pp (-37.5%)	t de Welch (una cola)	$p < 0.01$ (significativo)
Coeficiente de variación (CV) de ley de alimentación	21%	9.50%	-11.5 pp (-55%)	Prueba de igualdad de CVs / Levene	$p < 0.01$ (significativo)
Recuperación metalúrgica	85.3 % (prom.)	85.5 % (prom.)	+0.15 pp	Regresión GLS con covariables	$p = 0.002$ (significativo)

*Nota:* Elaboración propia.

### **4.3 Impactos operativos**

La reducción de la variabilidad en la alimentación a planta no solo se refleja en un incremento global de la recuperación, sino también en mejoras específicas a lo largo del proceso metalúrgico.

- En molienda, la predictibilidad y homogenización de la ley y de las características mineralógicas permite una operación más estable de la molienda. Tienen efectos en menos consumo energético, mayor uniformidad granulométrica y reducción en la necesidad de ajustes frecuentes, lo que prolonga la vida de los revestimientos.
- En flotación, la alimentación más consistente favorece una dosificación uniforme de reactivos, estabilizando el perfil de espuma y mejorando la selectividad en la recuperación de sulfuros de cobre, disminuyendo la dilución del concentrado. Estos factores contribuyeron también a una leve reducción en el consumo de cal y colectores, lo que representa ahorros acumulativos.
- En términos de estabilidad operativa, los operadores requirieron menos intervenciones para corregir desviaciones, con mayor tiempo efectivo de operación y menor variabilidad diaria de indicadores clave (ley de cabeza, recuperación instantánea). Esto genera mayor predictibilidad en los resultados y confianza en la programación de producción.

La reducción de la variabilidad e incertidumbre en la alimentación a planta no solo se refleja en un incremento global de la recuperación, sino también en mejoras específicas a lo largo del proceso metalúrgico.

### **4.4 Análisis de riesgos y mitigaciones**

El proceso de implementación de nuevas tecnologías en el sector minero conlleva una serie de riesgos que deben ser identificados, cuantificados y gestionados adecuadamente. En esta sección se describen los principales riesgos asociados al proyecto, sus posibles impactos y las estrategias de mitigación diseñadas para garantizar el cumplimiento de los objetivos del sistema de control de ley avanzado.

#### **4.4.1 Riesgos identificados**

A continuación, se identifican los principales riesgos asociados al proyecto, junto con sus respectivas acciones de mitigación, con el propósito de reducir su impacto potencial y asegurar la viabilidad operativa y financiera de la propuesta:

- **Demoras en la implementación Mitigación.**

Planificación detallada y selección de proveedores con experiencia en minería.

- **Resistencia al cambio en el personal operativo. Mitigación:**

Programas de capacitación continua y sensibilización.

- **Problemas técnicos con equipos y software. Mitigación:**

Establecimiento de protocolos de mantenimiento y soporte técnico.

- **Incertidumbre en la integración de tecnologías. Mitigación:**

Involucramiento del equipo de TI desde las etapas iniciales del proyecto.

#### **4.4.2 Estrategias de mitigación**

- Implementar pilotos para validar tecnologías antes de la adopción a gran escala.
- Establecer un comité de seguimiento que evalúe periódicamente el progreso y los riesgos.

#### **4.4.3 Análisis de oportunidades**

Los resultados obtenidos demuestran la efectividad de las medidas implementadas en una planta de mina.

##### **4.2.3.1 Oportunidades operativas.** Destacan las siguientes:

- **Mayor predictibilidad:**

La implementación de herramientas avanzadas reduce la variabilidad y mejora la toma de decisiones.

- **Escalabilidad:**

Posibilidad de replicar el modelo en otras operaciones mineras con características similares.

- **Optimización del blending:**

Mejor combinación de materiales para maximizar la recuperación y minimizar la dilución.

- **4.2.3.2 Oportunidades financieras.** Son las siguientes:

- Reducción de costos por mejora en la eficiencia operativa y reducción de reprocesos.
- Incremento de ingresos mediante el aprovechamiento óptimo de sulfuros de alta ley.

- **4.2.3.2 Oportunidades tecnológicas.** Se mencionan a continuación:

- Incorporación futura de inteligencia artificial para mejorar la predictibilidad y el control en tiempo real.
- Desarrollo de modelos de análisis integrados para optimizar los procesos en toda la cadena operativa.

## Conclusiones

La presente investigación tuvo como objetivo principal evaluar el impacto de la implementación de un sistema de control de ley avanzado en el envío de mineral a planta concentradora, bajo una metodología integral que conecta mina y planta bajo un esquema de control predictivo de ley, validado en condiciones reales y con capacidad de escalamiento a otras operaciones. con énfasis en la reducción de la variabilidad e incertidumbre de la ley de alimentación. A lo largo del estudio, se analizaron indicadores clave como el coeficiente de variación (CV), Factor F2 (mina vs planta) y la recuperación metalúrgica, con el fin de determinar la efectividad de las tecnologías predictivas y de automatización aplicadas. Las conclusiones principales extraídas de este ensayo son:

- La aplicación de tecnologías de control predictivo y sistemas de automatización para el control de la ley comprobó su efectividad en la reducción de la variabilidad en las leyes de alimentación a planta. Este proceso se vio beneficiado por la disminución del coeficiente de variación, pasando del Percentil 75 al Percentil 50, estabilizando así el proceso de alimentación a planta y logrando una mejora notable e importante en cuanto a la eficiencia de las operaciones de la planta, todo ello consolidando los beneficios técnicos y económicos que aportó el sistema incorporado.
- La implementación del sistema de control de ley significó un incremento en la recuperación metalúrgica del 0,15% al compararlo con lo proyectado en el plan LOM, lo cual sólo porcentualmente no es demasiado, aunque generó un efecto bien considerable en la producción pues se tradujo en 1.079 toneladas métricas de concentrado fino cobre, lo que deja claro que el sistema tiene un buen impacto en las operaciones de la planta y el rendimiento del mismo.
- La puesta en práctica de la propuesta tuvo un efecto económico positivo, con ingresos adicionales estimados en 7.1 millones de dólares. Las métricas financieras logradas son prueba de las fortalezas y rentabilidades de la inversión, que indican

un Valor Actual Neto (VAN) de 2.315 millones de dólares, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 375% y un período de recuperación menor a un año. Estos resultados son coherentes con una viabilidad económica y altos retornos de la mejora implementada.

- La sistematización y automatización del manejo de datos permitió una mejora significativa en las operaciones de planta al mejorar la toma de decisiones en tiempo real. Esta mejora tuvo una mejora en la reducción de los errores humanos y las confiabilidades del proceso operativo, consolidando así un entorno más eficiente, fidedigno y orientado a la proactividad del control de la variabilidad.
- Como resultado, el modelo conceptual puesto a punto fue validado como una herramienta muy útil para el control de la variabilidad en la ley de alimentación, su aplicación quedó demostrada también para la optimización de la eficiencia operativa y para obtener los resultados económicos esperables para la planta concentradora, haciendo constar su utilidad práctica para la toma de decisiones y para la mejora continua de un proceso.

## Recomendaciones

A raíz de la información recuperada y de las conclusiones discutidas, se propone a continuación un conjunto de recomendaciones con la finalidad de contribuir a la sostenibilidad y continuidad de los beneficios logrados con la puesta en práctica del sistema de control de ley avanzado:

**Ampliación del Alcance de la Tecnología:** Se propone extender el uso de las tecnologías implantadas como OrePro Predict y modelamiento de stocks, a materiales con ley inferior y a depósitos geológicamente más difíciles. Esta ampliación permitirá aumentar la aplicabilidad y robustez del modelo conceptual, logrando que el mismo sea más fácilmente adaptado a diferentes escenarios de operación y contribuyendo a una gestión más holística de la variabilidad del mineral.

**Fortalecimiento de Capacidades del Personal:** Se propone llevar a cabo programas de formación continua aplicables a operadores y supervisores (Anexo 2) y con el foco puesto en el uso de herramientas de tecnología avanzada y análisis de datos. Esta acción contribuirá a la mejora de la comprensión y aprovechamiento de los sistemas que se implantan, logrando una operación más eficiente, precisa y enfocada hacia la toma de decisiones basadas en información disponible en tiempo real.

**Monitoreo y Evaluación Constante:** Se recomienda llevar a cabo un sistema de seguimiento periódico para la validación y la actualización de los modelos predictivos, garantizando la evolución y adecuación a las condiciones de operación.

**Incorporación de Inteligencia Artificial:** Se propone valorar la incorporación de algoritmos de inteligencia artificial y Machine Learning para mejorar la predictibilidad de las leyes y optimizar el blending en tiempo real y así aumentar la rentabilidad y adaptabilidad del sistema.

**Mitigación de Riesgos Tecnológicos:** Se propone el establecimiento de protocolos de mantenimiento preventivo y correctivo claramente definidos para las herramientas

tecnológicas con el fin de mitigar los riesgos de fallas de los equipos o cortes de los sistemas.

Escalabilidad de la Propuesta: Se sugiere la replicación de esta metodología en otras operaciones mineras con características similares, lo que mejorará la estandarización de procesos, la réplica de buenas prácticas y maximización de los beneficios en distintos contextos operativos.

## Referencias bibliográficas

- Angloamerican. (2025). *La planta que produce cobre* [Fotografía].  
<https://peru.angloamerican.com/quellaveco/el-proyecto/la-planta-que-produce-el-cobre.aspx>
- Brealey, R., Myers, S., & Allen, F. (2019). *Principles of Corporate Finance* (13a ed.). McGraw-Hill Education.
- Fuerstenau, M. & Kenneth, N. (2003). *Principles of Mineral Processing*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- Hartman, H., & Mutmanský, J. (2002). *Introductory Mining Engineering* (2a ed.). John Wiley & Sons.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (6a ed.). Mc Graw Hill Education.
- Hustrulid, W. (2013). *Open Pit Mine Planning and Design* (3a ed.). CRC Press.
- Julian, L., Hunt, W., La Rosa, D., & Ruiseco, J. (2022). *A novel innovation for reconciliation*. Proceedings of the International Mining Geology Conference 2022 (pp. 326-337). AusIMM.
- McKinsey & Company (2022). *Technology Trends Outlook 2022: Digital ecosystems in mining*
- Newman, A., Rubio E., Rodrigo C., L. F., Weintraub, A., & Eureka, K. (2010). *A review of operations research in mine planning*. Interfaces, 40(3), 222-245.  
<https://doi.org/10.1287/inte.1090.0492>
- Pedhazur, E. & Schmelkin, L. (2013). *Measurement, design, and analysis*. An integrated approach. Behavioral Sciences, Education
- Poupeau, B., & Hunt, W. (2019). *Blast induced ore movement: The missing step in achieving realistic reconciliations*. Proceedings of the 11th International Mining Geology Conference (pp. 309-327). AusIMM.

Rubio, E. (2017). *Planificación de minas contexto*. <https://es.slideshare.net/slideshow/02-horizontes-deplanificacion/4659711#2>

Ross, S., Westerfield, R., & Jaffe, J. (2018). *Corporate Finance* (12a ed.). McGraw-Hill Education.

Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. (2025). *Guía para la valorización de concentrados metálicos*. Recuperado el 22 de junio de 2025, de <https://www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones/temas-de-interes/4767-valor-de-los-concentrados-de-minerales.html>

Wills, B., & Finch, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (8a ed.). Elsevier.

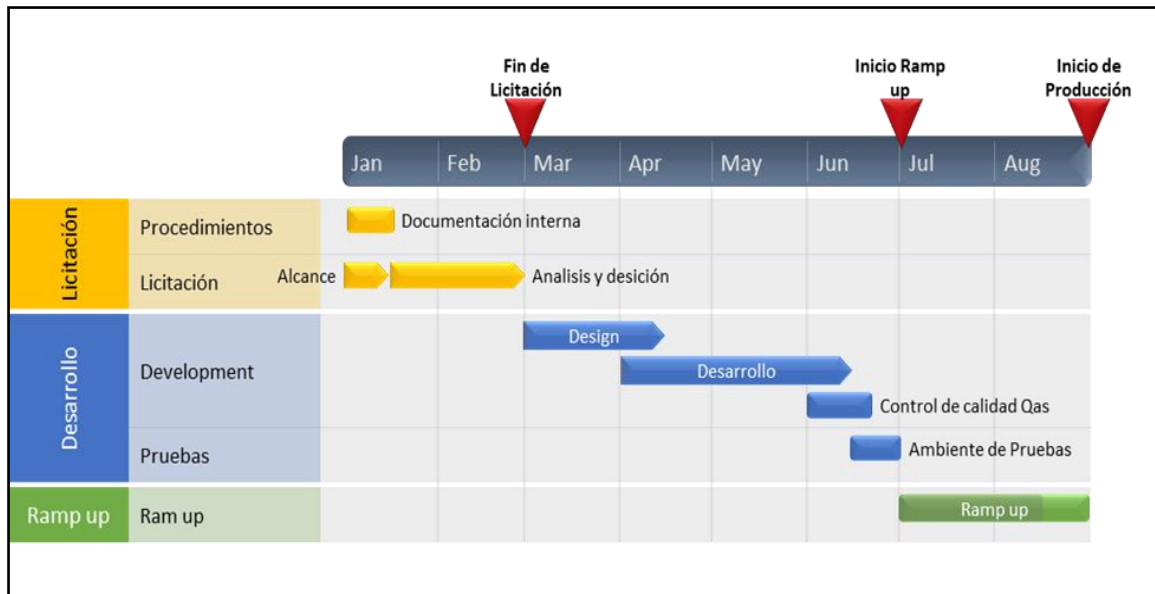
## Anexos

	Pág.
Anexo 1: Flujo de caja económico .....	1
Anexo 2: Cronograma de Implementación de Iniciativa .....	2
Anexo 3: Diagrama de movimiento de material por voladura .....	3
Anexo 4: Publicación sobre reconciliación de leyes (Ángeles & La Rosa, 2022).....	4
Anexo 5: Analítica avanzada en minería (van Zyl, 2022). .....	6
Anexo 6: Block Grade de Antapaccay.....	13
Anexo 7: Matriz de consistencia. ....	14
Anexo 8: Fuentes de incertidumbre analizadas en tesis. ....	15
Anexo 9: Costos hundidos y estimación de implementación de un sistema de gestión de flota (FMS).....	17

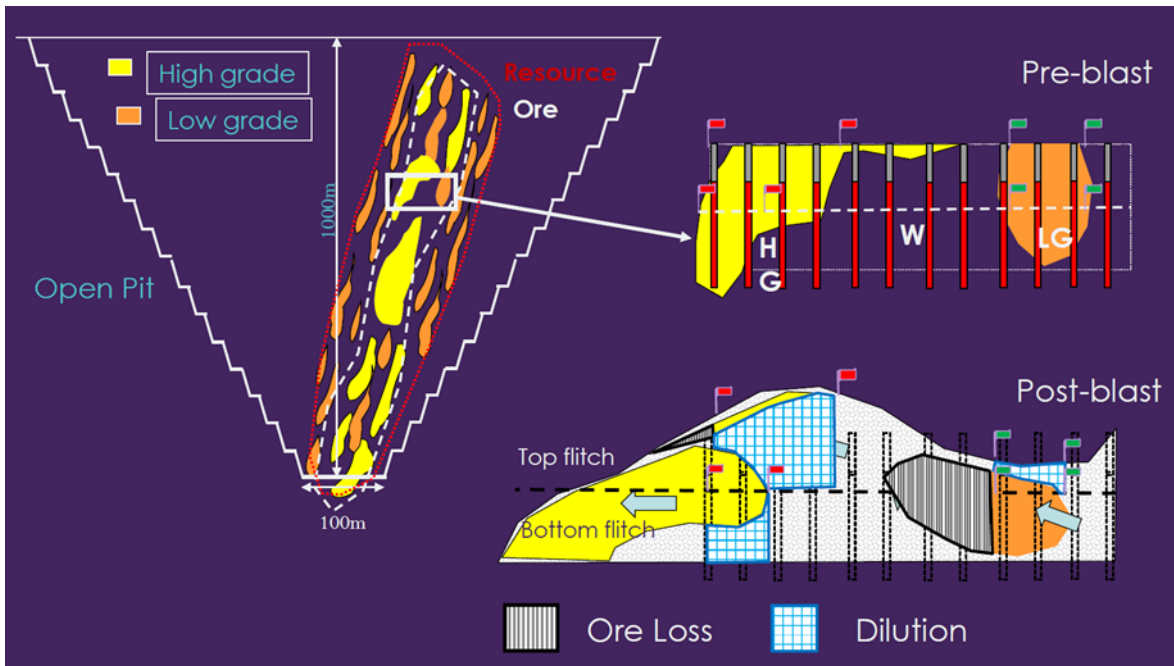
Anexo 1: Flujo de caja económico

LOM		
Variación en Ingreso	\$M real	8.04
(-) Variación en Cargos / Gasto de Venta	\$M real -	0.97
<b>Variación en Ingreso Neto</b>	<b>\$M real</b>	<b>7.07</b>
(-) Variación en Costo	\$M real -	0.98
(-) Regalías e IEM	\$M real -	0.22
(-) IR, Participaciones, FJM	\$M real -	1.96
Var Capital de trabajo	\$M real -	0.00
(-) Capex	\$M real -	0.15
<b>Flujo de caja después de impuestos</b>	<b>\$M real</b>	<b>3.75</b>
Fecha de Valoración	1/9/2023	
Discount rate (A)	10%	
Discount rate (Q)	2.4%	
Periodos de dcto		
Factor de valor presente		
Flujo de caja descontado	\$M real	2.32
NPV	\$M real	2.32
IRR	%	375.1%
PayBack		-
Flujo de caja descontado acumulado		
<b>Indicadores Financieros</b>		
Ingreso Neto Incremental	\$M real	7.07
Ingreso Neto des contado	\$M real	4.05
Costo Incremental	\$M real -	0.98
Costo descontado	\$M real -	0.50
<b>EBITDA</b>	<b>\$M real</b>	<b>6.09</b>
		86.2%

## Anexo 2: Cronograma de Implementación de Iniciativa




Anexo 3: Diagrama de movimiento de material por voladura



Nota: De "Reduce ore los and dilution: Measurement and modelling of blast movement", por Wayne Roger AMC, 2020

# Anexo 4: Publicación sobre reconciliación de leyes (Ángeles & La Rosa, 2022)

PERUMIN 35 CONVENCION MINERA **ORICA TECNOLOGIA** INNOVACION Y SOSTENIBILIDAD 26 AL 30 DE SETIEMBRE - 2022



## OPTIMIZING DAILY GRADE CONTROL AND BLOCK MODEL RECONCILIATION IN REAL-TIME

Enzo Angeles<sup>1</sup>, David La Rosa<sup>2</sup>  
<sup>1</sup> Senior Engineer, Orica, Canada (enzo.angeles@orica.com)  
<sup>2</sup> Technology Manager, Orica, Australia (david.larosa@orica.com)

CONSTRUYENDO JUNTOS UN PERÚ MEJOR

PERUMIN 35 CONVENCION MINERA **ORICA TECNOLOGIA** INNOVACION Y SOSTENIBILIDAD 26 AL 30 DE SETIEMBRE - 2022

## BLAST MOVEMENT AND GRADE CONTROL

Many published works have shown how blast movement varies in different regions of a blast (Hunt 2015, La Rosa 2011, Thornton 2009)

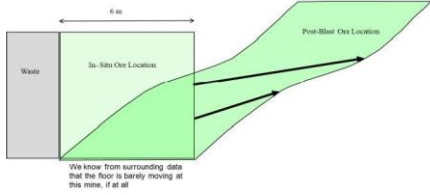


Figure 1 - Pre-blast dip vs post-blast dip (Hunt and La Rosa 2019)

Blast-induced ore movement may vary significantly throughout a blast. Therefore, an ore structure's dip and strike may change from the in-situ to the post-blast state due to blast-induced movement.

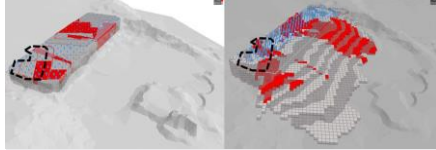


Figure 2 - Blast Movement's effect on Grade Control

PERUMIN 35 CONVENCION MINERA **ORICA TECNOLOGIA** INNOVACION Y SOSTENIBILIDAD 26 AL 30 DE SETIEMBRE - 2022

## METHODS TO ADDRESS BLAST MOVEMENT AND GRADE CONTROL

### 1. BLAST VECTOR INDICATORS (BVIs) AND SLIDING POLYGONS:

It consists of the use of devices that are inserted in the blast to be able to track the movement at specific points. Vectors of displacement are generated by connecting pre and post-location of devices




Figure 3: Use of devices to measure blast movement

After the post-blast location of the device has been determined, ore control polygons are displaced using the horizontal vectors measured (Figure 4). However, the main flaw with the use of BVIs is that it offers a 2D solution to solve blast movement, which is a 3D phenomenon (Poupeau et al., 2019).

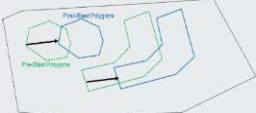


Figure 4: Representations of the 2D Method to slide polygons

PERUMIN 35 CONVENCION MINERA **ORICA TECNOLOGIA** INNOVACION Y SOSTENIBILIDAD 26 AL 30 DE SETIEMBRE - 2022

## METHODS TO ADDRESS BLAST MOVEMENT AND GRADE CONTROL

### 2. MOVING THE SHORT-TERM MODEL (3D)

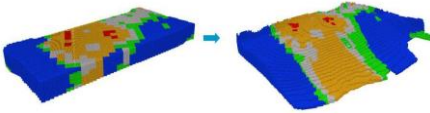


Figure 5: In-situ and post-blast grade control models for a real blast

Blasting changes everything: Moving the grade control model enables optimization on the post blast reality

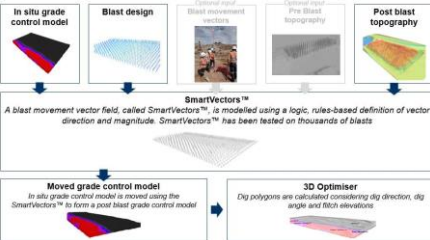


Figure 6: OREPro 3D Workflow

## 3-MONTH CASE STUDY: TASIAST MINE (KINROSS)

- Tasiast is an open pit gold mine located in Mauritania, West Africa and 100% owned and operated by Kinross.
- The aim of the trial was to compare the polygons generated by OREPro 3D with the reconciled gold at the mill, and to then compare those results with the recoveries that would have been obtained had the mine excavated the in-situ (non-moved) or 2D translated polygons.

Polygons	OREPro™ 3D Polygons	Reconciliation to OREPro™ 3D Polygons	In-Situ Polygons Designed by Hand	In-Situ Polygons Moved in 2D – Old Method
Tonnage	1,035,838	1,030,994	962,088	880,647
Grade	2.63	2.61	2.69	2.71
Ounces	87,688	86,435	83,254	76,795
Δ Ounces	1,253 (1.4%)	-	-3,181 (-3.7%)	-9,640 (-11.2%)

Table 2: 3-Months Case Study Results

- The variation in tonnage between OREPro 3D ore polygons sent to dispatch and the reported tonnes in each polygon is now down to nearly 1%. Table 2 shows the OREPro 3D approach side-by-side to the old 2D approach.
- This had an impact of ~\$17M at Tasiast in 3 months

## CONCLUSION AND FUTURE WORK

- Accounting for blast movement is a requirement of grade control and it is critical to get the best value from each blast
- Blast movement is a 3D issue, and 2D methods to estimate blast movement have several limitations
- Blast Movement Models offer speed, safety, and high accuracy
  - They enable strong linkage between the short-term model and the post blast polygons
  - OREPro™ 3D generated ~\$17M at Tasiast in 3 months
- In-Situ Diluted Polygon Block Model (IDPBM) has limitations but is a good stop-gap that meets current methodology requirements
- A Model-in-Time or Digital Twin based reconciliation –OREPro 4D, is more accurate and efficient than current methods of reconciliation

CONSTRUYENDO  
JUNTOS UN  
PERÚ MEJOR

Anexo 5: Analítica avanzada en minería (van Zyl, 2022).



**PERUMIN** 35 CONVENCION MINERA | **FORO DE TECNOLOGIA** INNOVACION Y SOSTENIBILIDAD

## Minerales 4.0: Analítica Avanzada para optimizar el procesamiento de minerales

Impulsar mejoras en rendimiento y recuperación a través de operaciones lean basadas en Analítica Avanzada

Septiembre 2022

**CONSTRUYENDO JUNTOS UN PERÚ MEJOR**

### Hay una serie de factores que ponen lo digital en la agenda de los líderes mineros

**Disponibilidad y costo de los datos**

**>95%**  
de los datos del mundo actual se ha creado **en los últimos 3 años!**

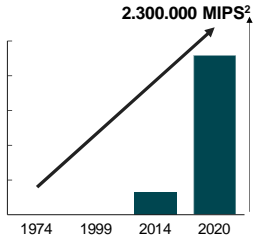
Los costos de almacenamiento de datos se han reducido en **>95%**

El costo de los nodos de IoT<sup>1</sup> ha bajado y se espera siga bajando **~50%**

**Velocidad de procesamiento**

La velocidad de los procesadores ha incrementado sustancialmente

**Velocidad de procesadores, MIPS<sup>2</sup>**

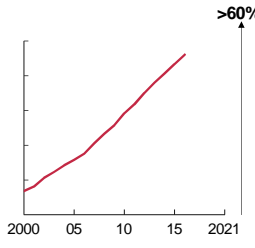


**Adopción de la sociedad**

La cantidad de de usuarios de Internet ha incrementado sustancialmente

**Adopción de internet, % de la población**





**>60%**



1. Internet Of Thing  
2. Millones de instrucciones por segundo  
Fuente: V&C, Agenda Digital de la UE, Internet live stats, McKinsey

### Existe una amplia variedad de tecnologías con gran potencial en la minería

■ Foco de presentación

Tecnologías	Ejemplos de iniciativas
 <b>Automatización, robótica y hardware operativo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Operaciones autónomas y robótica</li> <li>Impresiones 3D</li> <li>Sensores inteligentes</li> </ul>
 <b>Fuerza de trabajo habilitada digitalmente</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Centro de operaciones centralizado (iROC)</li> </ul>
 <b>Sistemas integrados de empresa, plataformas y ecosistema</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IT/OT Convergence</li> <li>Ciberseguridad</li> <li>Sourcing, Data Exchange</li> </ul>
 <b>Analítica Avanzada</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analítica Avanzada y simulaciones</li> <li>Inteligencia Artificial</li> </ul>

PERUMIN | FORO DE TECNOLOGIA

La Analítica Avanzada (AA) para optimizar el procesamiento de minerales representa una oportunidad de ~25-30 mil millones de dólares



**Stephan van Zyl**  
Experto Socio Asociado  
Vancouver

"La minería tiene una gran oportunidad (~25-30 mil millones de dólares) para aumentar el rendimiento y la recuperación con analítica avanzada (AA) permitiendo realizar operaciones *lean* en toda la cadena de valor.

Capturar beneficios de productividad a partir de la tecnología en la minería requiere una visión holística de las operaciones *lean* en toda la cadena de valor y la mayor parte del impacto se debe a las mejoras en las operaciones.

La Analítica Avanzada es la palanca de mayor impacto, habilitada por la tecnología y capta el ~50% del valor total en juego"



**10 15%**

de aumento promedio de los resultados anuales del EBITDA



**~50%**

del valor total podría provenir de AA y digital



**Sondeo:**

¿En qué punto se encuentra su empresa en el recorrido digital/analítica?

- A** Apenas estamos comenzando
- B** Estamos probando/implementando en algunas áreas
- C** Se ha convertido en un elemento central para mejorar nuestras operaciones
- D** Es un verdadero diferenciador para nosotros

## El potencial integrado de una operación puede realizarse con analítica avanzada, controles dinámicos y operaciones *lean*

Optimización de la extracción y el procesamiento de mineral

**1** Perforación y voladura

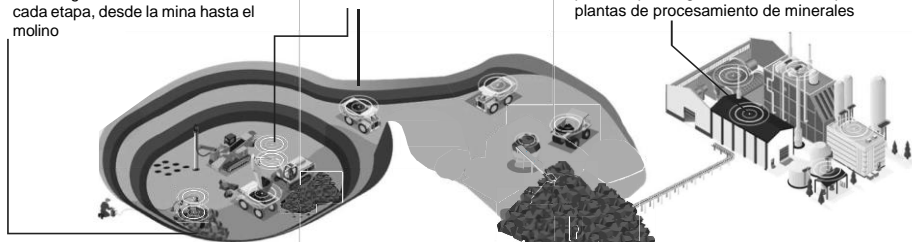
**2** Carguío y transporte

**3** Conminución y procesamiento

**Optimización de la fragmentación:**  
Captura el valor de la optimización de la fragmentación en cada etapa, desde la mina hasta el molino

**Optimización de la carga:**  
Habilita el mejor rendimiento de flota móvil

**Optimización de la planta:**  
Aprovecha la Inteligencia Artificial y los controles precisos para lograr un rendimiento óptimo en las plantas de procesamiento de minerales



**Rastreo de mineralogía y optimización de la mezcla:** Optimiza la mezcla de minerales mediante el modelado y la integración de datos para predecir los atributos del mineral y describir el inventario de *stockpile*

## Tres palancas impulsan la oportunidad en la cadena de valor

### Analítica Avanzada

Las palancas de analítica avanzada ayudan a optimizar el proceso de toma de decisiones a través de la gestión eficiente de los datos, los resultados en tiempo real y las visualizaciones informativas



### Control

Las palancas de control permiten utilizar eficazmente las máquinas y tecnologías existentes (p. ej., APC, Dispatch) para optimizar los resultados operativos

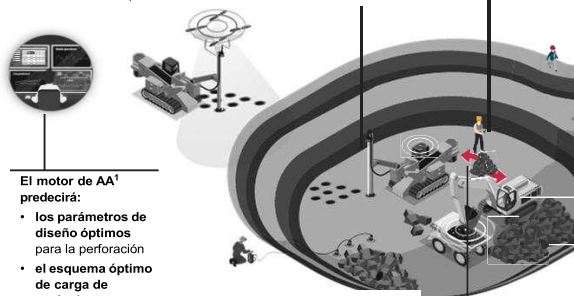
### Operaciones lean

Las palancas de operaciones Lean ayudan a estabilizar los procesos existentes y a mejorar la eficiencia mediante la aplicación de un enfoque de mejora continua

## 1: Optimización de la perforación & voladura

Reducir las pérdidas y la dilución impulsadas por perforación & voladura, por ejemplo, ajustar la carga y el tiempo utilizando los datos de dureza del material capturados por la perforadora

Los dashboards muestran los datos de rendimiento de perforación & voladura en tiempo real



El motor de AA<sup>1</sup> predecirá:

- los parámetros de diseño óptimos para la perforación
- el esquema óptimo de carga de explosivos

Retroalimentación automatizada desde la pala hasta el proceso de perforación & voladura, por ejemplo, incorporando inmediatamente retroalimentación sobre el material sobredimensionado observado en el bloque x

1. Analítica Avanzada

Inteligencia Artificial para optimizar el tamaño del mineral que llega a la planta de procesamiento



Los principios Lean & Agile están incrustados en las operaciones diarias para optimizar la perforación & voladura impulsado por las necesidades de la planta de procesamiento

## 1: La optimización de la fragmentación basada en la IA<sup>1</sup> permitió aumentar el rendimiento de la planta en un 8% Ejemplo de caso

### Contexto

- Una mina de cobre canadiense
- > 90% de las rocas in situ necesitan actividades de perforación & voladura para facilitar la extracción del mineral y la sobrecarga
- Más de 5 perforadoras de gran tamaño para apoyar múltiples actividades de voladura realizadas semanalmente
- Las perforadoras están conectadas al sistemas de gestión de flotas y algunas palas tienen instalados sistemas de shovel-sense para monitorear la calidad del mineral

1. Inteligencia Artificial

### Enfoque

Se ha desarrollado:

- Un diseño centrado en el usuario, que proporciona al ingeniero de perforación & voladura información relevante de la cadena de valor minera y prescribe los parámetros óptimos de voladura:
- Modelos predictivos de fragmentación; para predecir con exactitud la fragmentación y el costo de las voladuras a partir de los datos históricos del modelo de bloques, perforación & voladura, fragmentación, carga & transporte, molinos y finanzas
- Un motor de recomendación de Analítica Avanzada Integrada; para proporcionar parámetros de perforación & voladura
- Dashboards de control; para mostrar los datos de rendimiento de perforación & voladura en tiempo real

## Mina de cobre canadiense

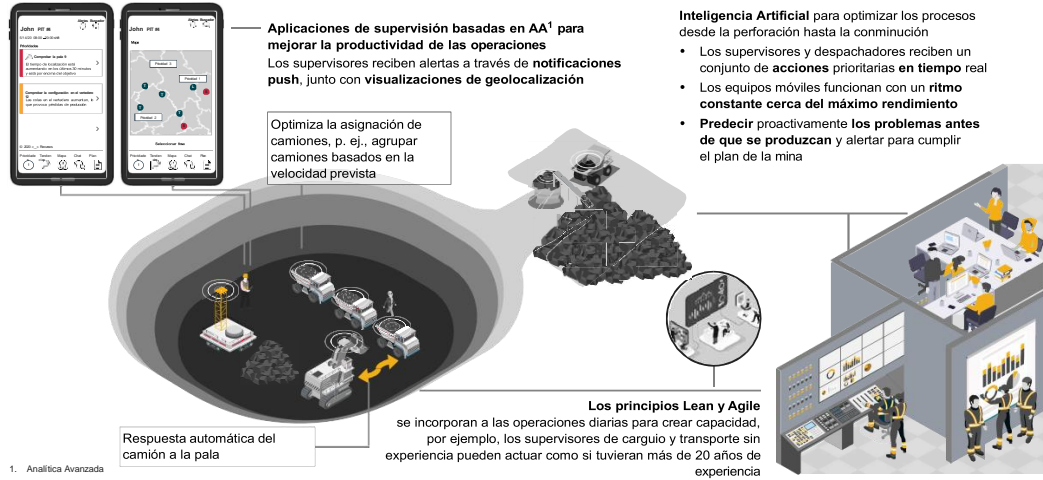
### Impacto

**8%**  
mejora en rendimiento

**15%**  
aumento de la productividad de palas

**10%**  
disminución del opex de voladuras

## 2: Optimización de carguío y transporte



## 2: La aplicación de analítica avanzada permitió reducir el tiempo del ciclo de carga y transporte en un 10-15%

Ejemplo de caso

### Contexto

- Una gran minera de Norte América entrega más de 50 millones de toneladas de carbón al año en sus múltiples operaciones
- Múltiples operaciones con operaciones limitadas por la planta
- Más de 40 camiones con diferentes potencias, más de 5 palas con diferente capacidad y más de 300 operarios con diferente antigüedad, niveles de habilidad y motivaciones
- Existen sistemas de gestión de flotas modulares, pero no se utilizan totalmente

### Enfoque

- Se ha desarrollado:
- Casos de uso para ayudar a optimizar el tiempo de ciclo de carga; se abordaron más de 20 casos de uso digitales y de analítica avanzada en todas las operaciones.
  - La analítica avanzada para optimizar la toma de decisiones en los tajos abiertos; los supervisores reciben alertas a través de notificaciones push, junto con visualizaciones de geolocalización y acciones a tomar prioritizadas
  - La analítica avanzada para optimizar la asignación de los camiones a las rutas maximizando la producción
  - La analítica avanzada aplicada para resolver los retos de seguridad - El conjunto de herramientas de seguridad reduce los incidentes

## Portafolio de minas a tajo abierto

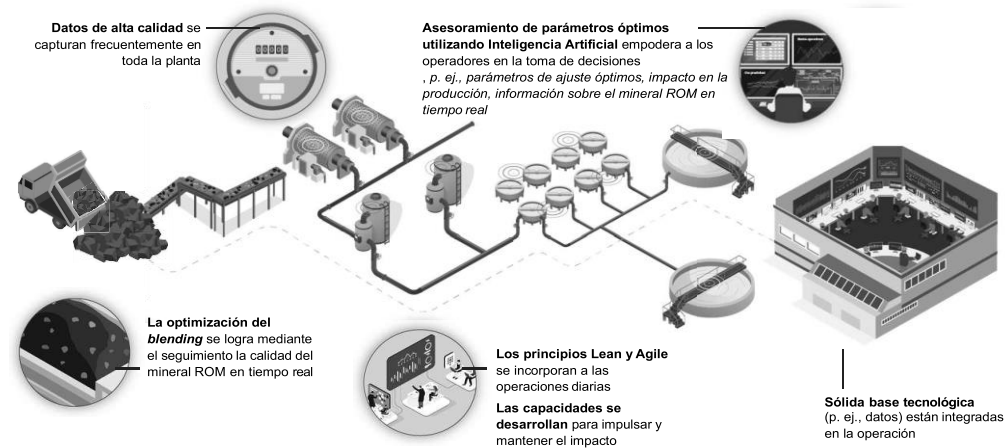
### Impacto

**10-15%**  
reducción del tiempo de ciclo de carga y transporte

**5-8%**  
mejora del rendimiento

**30+**  
FTEs digitales del cliente fueron entrenados en las mejores prácticas

## 3: Optimización de la conminución y procesamiento



### 3: La optimización de la planta de procesamiento genero un impacto de +US\$30 millones en el EBITDA anual

Ejemplo de caso

#### Contexto

- Planta de procesamiento **polimetálica** de oro, plata, zinc y plomo
- Experiencia previa con AA que tardó entre 6-8 meses y **sólo dio respuestas teóricas**
- Yacimiento complejo** con una gran variación en la ley de alimentación y en las características del mineral
- Mejoras continuas** de los sistemas de control y actualización de los equipos

#### Enfoque

- Se definió los **modelos de analítica avanzada y estimo impacto**; definición de los regímenes de funcionamiento de la fábrica y de los límites físicos, junto con la evaluación de la producción histórica y la variabilidad de la recuperación
- Desarrollo de modelos predictivos para maximizar el rendimiento del molino SAG, definiendo las características y restricciones clave**; el modelo utilizó 136 puntos de datos y 14 variables optimizables para predecir el rendimiento con una precisión del 99,3%
- Se ha desarrollado un **modelo de optimización para maximizar el rendimiento**; el modelo ha demostrado que si se modifican los parámetros de ajuste, el rendimiento puede aumentar entre un 4-6% cuando se compara con un conjunto de datos históricos
- Se ha llevado a cabo **ore clustering para definir el potencial de mejora de la recuperación**; es posible un aumento de 2-3 p.p. basado en la variabilidad observada

Productor mundial de oro

#### Impacto

**US\$30-50m**

Impacto anualizado basado en el aumento de la producción de oro por el incremento del rendimiento y la mejora de la recuperación

**4-6%**

potencial de aumento del rendimiento

**2-3 p.p.**

potencial de mejora de la recuperación

PERUMIN | TECNOLOGÍA 13

### 3: Optimización end-to-end de la planta mediante la implementación de Analítica Avanzada y la creación de un centro de operaciones integrado en Codelco

Ejemplo de caso

#### Contexto

- La división de Chuquibambilla de Codelco es una **mina de cobre y oro a tajo abierto considerada la más grande de su tipo en el mundo**
- Los minerales se extraen de 3 fuentes diferentes** (es decir, a tajo abierto, subterráneo) con **diversidad de características de cada una de las fuentes minerales**, lo que implica cambios importantes en la forma de operar la planta
- La falta de visibilidad y comprensión de los minerales que entran en la planta generó que la optimización se hiciera sobre cada uno de los procesos de forma individual**, sin tener una visión holística del impacto y resultados a nivel global de la planta

#### Enfoque

- El **enfoque para optimizar las operaciones fue asegurar una visión End-to-End de la mina y la planta que iba a ser controlada desde un centro de operaciones centralizado (IROC)**
- Los sistemas ore-tracer de mineral y los modelos Analítica Avanzada fueron implementados para predecir las propiedades del mineral** en los diferentes puntos de la cadena de valor: mina, despacho, reservas de mineral, cintas transportadoras, acopios y planta
- Se generaron **modelos de optimización de blending para recomendar la combinación óptima**
- Se creó un **nuevo centro de operaciones (IROC) que gestiona la planta de forma centralizada** con visibilidad en tiempo real de la ley del mineral entrante/saliente y del **blending**
- Se desplegaron **dashboards** en las operaciones para **garantizar la visibilidad en toda la planta, dando recomendaciones** a los operadores de los diferentes procesos para aumentar la producción

Compañía minera de cobre sudamericana

#### Impacto

**+4%**

Aumento del rendimiento

**+120 mm USD**

tasa anual de producción de cobre fino

**+32**

Modelos de analítica avanzada en toda la planta

**3 minas + 3 plantas**

Optimización del proceso *End-to-End* mediante el control centralizado

PERUMIN | TECNOLOGÍA 14

### 3: Se implemento analítica avanzada en la sala de control de la planta para modelar el rendimiento y la recuperación del mineral en tiempo real

Ejemplo de caso

#### Contexto

- Una **empresa minera de cobre** centrada en la minería a gran escala, de bajo costo y a tajo abierto
- La ley de cobre **disminuyendo cada año**, tal y como se prevé en el plan minero, lo que provoca una disminución de la producción
- La empresa minera buscaba una solución para optimizar el **rendimiento y la recuperación** sin grandes gastos de capital

#### Enfoque

- Desplegamos el **modelo analíticas avanzadas de la sala de control de la planta**. Se desplegaron **modelos de recuperación, rendimiento y seguimiento de minerales**. Los modelos son utilizados cada 3 horas por los operadores de planta y los metalúrgicos
- Cada 24 horas se llevan a cabo 6 sesiones de recomendación del modelo analíticas avanzadas para garantizar que los parámetros de la planta sean óptimos**, lo que se traduce en un aumento de la recuperación y rendimiento.
- Se han puesto en marcha 9 iniciativas de mejora operativa, con un **impacto total preliminar de \$50 millones** en términos anuales
- La **aceleración de las recomendaciones previstas** permitió empezar a captar un **impacto semanal de -US\$1 millón** desde la octava semana del proyecto

Importante empresa minera de cobre de la EMEA

#### Impacto

**+1.2 p.p.**

En la recuperación

**+5%**

En rendimiento de la planta

**US\$50 millones**

en EBITDA anualizado

PERUMIN | TECNOLOGÍA 15

## Muchas cosas han cambiado en los últimos 3 años...

Hace 3 años Digital y Analítica era sólo un sueño...



## ... hoy en día, casi todas las grandes casas mineras han anunciado algún tipo de programa digital y analítica



... la tecnología será nuestro objetivo. Ya sea el transporte automatizado, la robótica, los drones, big data o la inteligencia artificial, estamos cambiando la forma de trabajar.

**Mike Henry, director general, noviembre de 2019**



... utiliza los datos de los sensores de la mina y sugiere nuevas formas de mejorar el rendimiento... El desarrollo ha sido "un éxito notable".

**Richard Adkerson, director general, noviembre de 2019**



... no hay duda de que lo digital y los datos serán el cambio fundamental en nuestra industria... lo digital y los datos tocarán cada parte de la cadena de valor de la industria

**Jean-Sebastien Jacques, CEO, Oct 2018**



... acelerar el programa de autonomía y robótica para crear un cambio transformador en la seguridad... también reducir los costos por tonelada de la minería

**Andrew Milner, director de transformación, diciembre de 2019**



... la Inteligencia Artificial tiene el potencial de generar valor para todas las áreas de negocio. Estamos dando otro paso importante hacia la transformación digital

**Afzal Jessa, director de transformación digital, enero de 2019**



16

## Pocos mineros extrajeron beneficios significativos y pudieron escalar la implementación de Digital & Analítica...

NO EXHAUSTIVO



"Freeport recurre a la inteligencia artificial para aumentar la producción de cobre en 90.000 toneladas; la empresa estadounidense desplegará la tecnología en todas sus minas de América"

*Financial times coverage - Noviembre de 2019*



"La transformación tecnológica de TECK mejora el rendimiento, la seguridad y la sostenibilidad; se espera que genere 1.100 millones de dólares en beneficios anuales"

*Comunicado de prensa de Teck - Abril 2022*

## ...la mayoría de los mineros lo han intentado pero aún no han escalado

Muchos mineros han llevado a cabo algún tipo de programa de Digital & Analítica, pero aún no han aprovechado todo su potencial. Hemos observado algunos puntos de dolor comunes en varias mineras:



La minería se considera un **proceso complejo, con interacciones no lineales** a lo largo de la cadena de valor a través de **miles de variables** en un momento dado



Las decisiones se **toman de forma independiente**, basándose en **la propia experiencia de los operadores**



Se generan **enormes cantidades de datos** que a menudo **no se aprovechan del todo**



17

## La habilitación tecnológica debe...

Centrarse en las palancas de valor...



**Rendimiento y recuperación**



**Cadena de suministro y planificación**



**Sustentabilidad**



**Mantenimiento**



**Productividad de los empleados**



**Compras/Procurement**



...empezar con las Personas...



**Alineación de la organización**  
*Visión y hoja de ruta*



**Talento**  
*Digital + Técnico + Operaciones*



**Nuevas formas de trabajar**  
*Agile + Design thinking + Lean*



**Adopción y ampliación**  
*Infraestructura de rendimiento, mentalidad y comportamiento*



...y, por supuesto, la Tecnología



**Pila tecnológica**  
*Infraestructura, automatización, seguridad*



**Datos**  
*Enfoque basado en el valor, enriquecimiento, gobernanza*



18

## Lo que hemos aprendido al ayudar a las empresas mineras en sus transformaciones digitales y de analítica avanzada



**A**

### Funciona

La aplicación de la tecnología digital y analítica avanzada a las palancas de valor ofrece un rápido impacto en los resultados.



**B**

### No se trata de objetos brillantes

Es necesario un enfoque holístico para conseguir un impacto sostenible a gran escala. No se trata de la miopía del "caso de uso".



**C**

### Personas, personas, personas

Es fundamental conseguir los conocimientos adecuados y cambiar la forma de trabajar; muchos de los conocimientos necesarios son nuevos en la minería



**D**

### Sólo se está tocando la superficie

Hay más potencial de impacto de una variedad de tecnologías y la oportunidad de involucrar a la primera línea

Anexo 6: Block Grade de Antapaccay.

# BLOCKGRADE



**Implementación** desde el 1 de noviembre de 2023.

Cruza la información del modelo de bloques y asigna la ley de mineral que le corresponde a cada camión una vez cargado desde el equipo en la operación.

Se alcanzó una acumulación de más de **880 toneladas de cobre fino** en el periodo 2024.

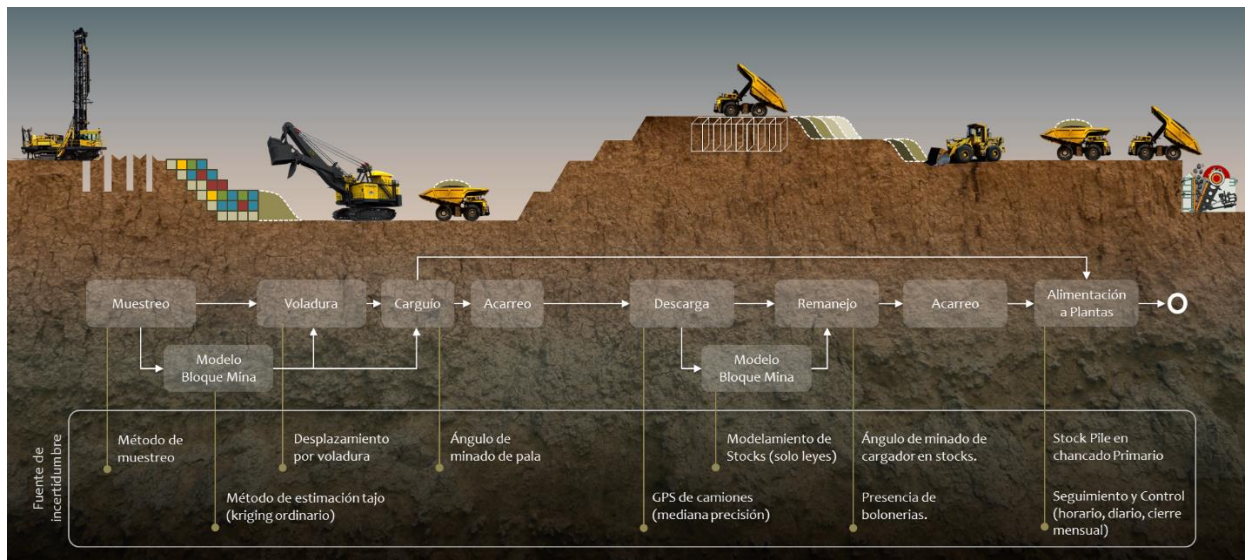
Se dio capacitación en dos procesos a 16 ingenieros de Control de Mineral y de Dispatch.

Anexo 7: Matriz de consistencia.

Componentes	Problema	Objetivos	Hipótesis
General	La variabilidad e incertidumbre de la ley de alimentación a planta afecta la recuperación metalúrgica y la eficiencia del proceso.	Evaluar el impacto de un sistema avanzado de control de ley en la recuperación metalúrgica en una planta concentradora.	La implementación de un sistema avanzado de control de ley incrementa la recuperación metalúrgica en planta concentradora.
Específico 1	Incertidumbre elevada del modelo de bloques por desplazamiento de voladura.	Determinar la mejora en la recuperación después de implementar el modelo de bloques desplazado por voladura.	La recuperación posterior a implementación es mayor que la recuperación previa.
Específico 2	Alta incertidumbre en la composición de los stocks y remanejos.	Implementar y validar un modelo de gestión y modelamiento de stocks que reduzca la incertidumbre de ley.	El modelamiento de stocks reduce significativamente la incertidumbre en la ley de alimentación.
Específico 3	Limitada precisión y trazabilidad en el monitoreo de la ley en tiempo real.	Develop and calibrate a predictive real-time grade estimation model.	El sistema de medición en tiempo real mejora la precisión del monitoreo de ley y toma de decisiones más adecuada.
Específico 4	Impacto económico no cuantificado de las mejoras operativas.	Evaluar el impacto económico-financiero derivado de la reducción de variabilidad e incertidumbre.	La reducción de variabilidad genera un impacto económico y financiero positivo.

## Anexo 8: Fuentes de incertidumbre analizadas en tesis.

Se han identificado diferentes fuentes de incertidumbre de la ley en el proceso minero, en la investigación se seleccionaron tres fuentes principales de incertidumbre, desplazamiento por voladura, remanejo y modelamiento de stocks, y seguimiento/control en tiempo real de la ley, porque, dentro del proceso mina-planta, son las que aportan el mayor impacto directo en la variabilidad de la ley de alimentación y, por lo tanto, en la recuperación metalúrgica. Además, son las etapas donde la integración de datos operativos, modelamiento y herramientas predictivas permite reducir significativamente la variabilidad, generando impactos medibles en F2, en el coeficiente de variación y, finalmente, en la recuperación de cobre.



La elección responde a tres criterios técnicos:

1. Son las fuentes que más distorsionan la ley antes de llegar a planta, durante la revisión operativa se observó que estas tres etapas son las que generan las mayores diferencias entre leyes de mina-planta, son los puntos donde la ley “se pierde, se mezcla o se altera” sin que exista un control adecuado. Por eso, su efecto sobre el factor de reconciliación F2 y sobre el coeficiente de variación (CV) es mucho mayor que el de otras operaciones unitarias.
2. Representan eslabones donde existe incertidumbre estructural, no solo variabilidad natural, cada uno de estos procesos introduce errores sistemáticos, los factores analizados:
  - El desplazamiento por voladura mueve físicamente el mineral fuera de su posición original.

- El remanejo de stocks mezcla mineral que originalmente tenían leyes distintas.
  - La falta de trazabilidad en tiempo real impide corregir desvíos operativos al momento en que ocurren.
3. Son las áreas donde las tecnologías modernas permiten una mejora cuantificable y verificable, estas son justamente las etapas donde existe tecnología disponible para reducir la incertidumbre:
- OrePro Predict, simula desplazamiento de material por voladura.
  - Modelo de bloques de stocks + GPS, reconstruye el modelo del stockpile.
  - Sistemas de despacho + PI System, generan trazabilidad en tiempo real.

La intervención piloto se ejecutó como un sistema integrado (modelado de voladura, modelamiento de stocks y monitoreo en tiempo real), el efecto conjunto del sistema completo sí pudo cuantificarse: el coeficiente de variación disminuyó de 21% a 9.5% y el error de reconciliación mina-planta F2 se redujo de -4.0% a -2.5%. A juicio de experto se realizó una estimación del impacto de cada uno en el impacto total, el cual se explica en la siguiente tabla.

<b>Componente</b>	<b>Indicador principal afectado</b>	<b>Valor pre-test</b>	<b>Valor post-test</b>	<b>Reducción atribuible</b>	<b>% de aporte sobre reducción total</b>
Modelado de desplazamiento por voladura	Reconciliación F2 Coeficiente de variación (CV) de ley	F2 = -4.0% CV = 21%	F2 = -2.5% CV = 9.5%	F2 = -1.5% CV = 6.90%	F2 = 60% CV = 60%
Modelamiento de stocks	Reconciliación F2 Coeficiente de variación (CV) de ley	F2 = -4.0% CV = 21%	F2 = -2.5% CV = 9.5%	F2 = -0.75% CV = 3.45%	F2 = 30% CV = 30%
Monitoreo y trazabilidad en tiempo real	Reconciliación F2 Coeficiente de variación (CV) de ley	F2 = -4.0% CV = 21%	F2 = -2.5% CV = 9.5%	F2 = -0.25% CV = 1.15%	F2 = 10% CV = 10%
<b>TOTAL SISTEMA</b>	Reconciliación F2 Coeficiente de variación (CV) de ley	<b>F2 = -4.0% CV = 21%</b>	<b>F2 = -2.5 % CV = 9.5 %</b>	<b>F2 mejora: +1.5 pp CV mejora: 11.5 pp</b>	<b>100 %</b>

Anexo 9: Costos hundidos y estimación de implementación de un sistema de gestión de flota (FMS).

La tesis presenta la implementación del sistema en una mina que cuenta con sistema de gestión de flota (FMS por si siglas en ingles), asumiendo que son costos/capital hundido todo lo que eso involucra. Este anexo presenta el análisis de los costos/capitales hundidos necesarios para la implementación del sistema de control de ley. Se considera que, para la correcta operación del sistema, la mina debe contar con un Sistema de Gestión de Flota (Fleet Management System - FMS) y equipos de carguío equipados con GPS de alta precisión.

#### 1. Costos hundidos considerados

Los siguientes costos se consideran hundidos, dado que forman parte de la infraestructura mínima que cualquier operación minera de tajo abierto debe poseer para operar con estándares modernos:

- Servidores y redes de comunicación internas.
- Infraestructura de radioenlaces y repetidoras.
- Centros de control o despachos operativos.
- Equipamiento básico de sensores y conectividad de los equipos mineros.

#### 2. Costo estimado de implementación de un Sistema de Gestión de Flota (FMS)

El costo de un FMS depende del tamaño de la flota, el proveedor (Modular, Hexagon, MineStar, Wenco), y el nivel de integración. Rango típico de costos de implementación:

- Licenciamiento inicial FMS: USD 1.2 - 2.0 millones.
- Infraestructura (servidores, antenas, repetidoras): USD 350,000 - 600,000.
- Instalación y puesta en marcha: USD 150,000 - 300,000.
- Entrenamiento y soporte inicial: USD 50,000 - 120,000.

Total típico de implementación: USD 1.8 - 3.0 millones.

### 3. Costo estimado de equipar palas y cargadores con GPS de alta precisión

Los equipos de carguío como palas eléctricas o hidráulicas requieren GPS submétrico o RTK, además de sensores para control de posición de balde, orientación y ciclos operativos. Costos estimados por equipo:

- Kit GPS RTK de alta precisión: USD 45,000 – 65,000.
- Sensores de ángulo, orientación, IMU y sistema hidráulico: USD 20,000 - 35,000.
- Integración con FMS: USD 10,000 - 20,000.
- Instalación y calibración: USD 8,000 - 12,000.

Costo por pala o cargador equipado: USD 70,000 - 120,000.

### 4. Costo total para una operación estándar

Considerando 2 palas y 1 cargador frontal:

- Equipamiento de 3 unidades: USD 210,000 – 360,000.
- Costo total del sistema con FMS completo: USD 2.0 – 3.3 millones.

### 5. Conclusión

Para implementar el sistema avanzado de control de ley presentado en esta tesis, la operación minera debe contar con un FMS y con equipos de carguío con GPS de alta precisión. El costo inicial de esta infraestructura oscila entre USD 2 y 3.3 millones, los cuales se consideran costos hundidos para el caso de la presente investigación, necesarios para garantizar la exactitud en la trazabilidad del mineral, el modelamiento de stocks y la reducción de la incertidumbre en la ley de alimentación a planta.