

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

**MINADO DE ALTA PRECISIÓN POR BLOQUES (HPGPS) CON EL
SISTEMA ORE SORTING, PARA UN CONTROL EN EL MINADO EN
LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA HUSBAY-CHUMBIVILCAS**

PRESENTADO POR:

Br. HELEN KASSANDRA ALVAREZ FARFAN

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**

ASESOR:

Dr. MIGUEL VERA MIRANDA

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor DR. MIGUEL VERA MIRANDA
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: MINADO DE ALTA PRECISIÓN POR
BLOQUES (MPGPS) CON EL SISTEMA DRE SORTING, PARA UN
CONTROL EN EL MINADO EN LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA
HUDBAY - CHUMBIWILLCAS

Presentado por: HELEN KASSANDRA ALVAREZ FARFAN DNI N° 72079061;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO DE MINAS

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 6%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 12 de AGOSTO de 2026

Firma

Post firma DR. MIGUEL VERA MIRANDA

Nro. de DNI 23876027

ORCID del Asesor 0000-0002-2668-0652

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259 : 613896427

HELEN KASSANDRA ALVAREZ FARFAN

MINADO DE ALTA PRECISIÓN POR BLOQUES (HPGPS) CON EL SISTEMA ORE SORTING, PARA UN CONTROL EN EL MINADO ...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:613896427

Fecha de entrega

12 ago 2026, 9:46 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

12 ago 2026, 9:58 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

MINADO DE ALTA PRECISIÓN POR BLOQUES (HPGPS) CON EL SISTEMA ORE SORTING, PARA UN C....pdf

Tamaño del archivo

5.5 MB

137 páginas

25.869 palabras

154.413 caracteres

6% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 9 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

- 5%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 5%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

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

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

DEDICATORIA

A Dios, por guiar cada paso en mi camino y darme
la fortaleza y sabiduría necesaria.

A Papá, Mamá y Adriano, por su amor, confianza
y por enseñarme el valor del esfuerzo y la
perseverancia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por ser mi guía y darme la fuerza necesaria para llegar hasta aquí; sin su bendición nada de esto sería posible.

A mis padres, por su apoyo incondicional y comprensión. Gracias por confiar en mí, son mi fuente de inspiración y la razón de mi perseverancia.

A mi familia y amigos, por estar siempre a mi lado dándome ánimos en cada paso y por sus palabras de aliento en los momentos difíciles.

A mi Alma Máter, la UNSAAC, a mis docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por la formación recibida y por brindarme los conocimientos y las herramientas necesarias para ejercer esta profesión.

Al Dr. Miguel Vera Miranda, por su guía. Gracias por su compromiso y por transmitirme la confianza necesaria para culminar este reto.

Finalmente, a la Unidad Minera Constancia - Hudbay, por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de crecer profesionalmente.

INTRODUCCIÓN

La minería a tajo abierto enfrenta uno de sus mayores desafíos operativos en la correcta segregación del mineral respecto al desmonte, especialmente en yacimientos con alta variabilidad geológica como los depósitos tipo Skarn, donde los contactos entre zonas mineralizadas y estériles son irregulares y cambian abruptamente en distancias cortas. En la Unidad Minera Constancia – Hudbay, ubicada en la provincia de Chumbivilcas, Cusco, esta característica geológica se traduce en niveles de dilución operativa que alcanzan entre 10% y 13% en las fases de transición del tajo, superando el límite técnico del 9% establecido. Esta inexactitud en la clasificación tiene un doble efecto: por un lado, material estéril diluye el mineral enviado a planta, reduciendo su ley y aumentando el tonelaje a procesar sin generar valor; por otro, mineral económico es clasificado como desmonte y enviado a botaderos, reduciendo el mineral disponible para recuperación. Como consecuencia, disminuye el factor de recuperación efectivo del yacimiento, mientras que los costos de acarreo y procesamiento se incrementan afectando directamente la rentabilidad del proyecto.

En la Unidad Minera Constancia, el sistema Ore Sorting (ShovelSense) se encuentra instalado en los equipos de carguío como herramienta de clasificación del material en tiempo real mediante sensores de fluorescencia de rayos X (XRF). Sin embargo, en el contexto del yacimiento tipo Skarn, este sistema ha presentado limitaciones al subestimar las leyes de cobre y generar ciclos de carguío sin lectura válida de ley. En estos casos, la ausencia de información sensorial compromete la correcta asignación del destino del material, incrementando el riesgo de enviar mineral económico a botaderos. Por ello, la presente investigación propone la integración del sistema de Minado de Alta Precisión por Bloques (HPGPS) como mecanismo de respaldo activo, el cual entra en operación precisamente en aquellos ciclos donde el Ore Sorting no genera lectura válida, apoyándose en el modelo de bloques y los polígonos de minado para garantizar la continuidad de la clasificación. Esta integración permite recuperar

mineral que previamente era enviado a botadero por falta de información sensorial, asegurando una toma de decisiones dinámica que mejore la eficiencia técnico-operacional del proceso minero.

Para desarrollar esta propuesta, la investigación se estructura en cuatro capítulos. El Capítulo I presenta el planteamiento del problema, detallando el impacto cuantificable de la dilución en los indicadores operativos de Constancia, la formulación de los objetivos y la justificación técnica y económica del estudio. El Capítulo II establece el marco teórico, abordando los fundamentos de dilución, factor de recuperación, relación estéril/mineral y ley de corte, así como las bases conceptuales y tecnológicas de los sistemas HPGPS y Ore Sorting. El Capítulo III describe la metodología de investigación de tipo aplicada y cuantitativa, con diseño no experimental, sustentada en el análisis de registros operativos del sistema FMS correspondientes a las Fases V y VI del tajo Constancia durante el periodo agosto 2025 – enero 2026, e incluye la descripción operativa de ambos sistemas, la lógica de decisión implementada en la plataforma R4M, el árbol de decisiones para la clasificación del material y los flujos de comunicación de datos entre sistemas. Finalmente, el Capítulo IV expone el análisis e interpretación de los resultados obtenidos, la discusión en relación con los objetivos planteados de la investigación.

RESUMEN

Esta investigación determinó el efecto de integrar los sistemas Ore Sorting (ShovelSense) y Minado de Alta Precisión por Bloques (HPGPS) en la reducción de la dilución operativa y el incremento del Factor de Recuperación en la Unidad Minera Constanca – Hudbay (Chumbivilcas, Cusco). El estudio tuvo enfoque cuantitativo, tipo aplicado y diseño no experimental, con una muestra de registros operativos del sistema FMS correspondientes a ciclos de carguío entre agosto 2025 y enero 2026. Se analizaron la ley de cobre estimada por sensores, la ley del modelo de bloques, la clasificación del material y su destino final, según la ley de corte de Cu para diferenciar mineral de desmonte.

Los resultados mostraron que, cuando el Ore Sorting no generó lectura de ley, el HPGPS asumió la clasificación del material apoyándose en el modelo de bloques y los polígonos de minado, garantizando continuidad operativa. Esta integración alcanzó una coherencia del 91.1% en la clasificación del material, contribuyendo a reducir la dilución operativa. Asimismo, el HPGPS actuó como respaldo activo en ausencia de lectura válida, incrementando el Factor de Recuperación en aproximadamente 4.3% durante el periodo de estudio, al identificar mineral previamente clasificado como desmonte por falta de información sensorial, mejorando los indicadores operativos y reduciendo la brecha frente al presupuesto.

Se concluye que la integración de ambas tecnologías constituye una estrategia efectiva de control operativo, donde el HPGPS respalda las limitaciones del Ore Sorting en depósitos de alta variabilidad geológica tipo Skarn.

Palabras clave: HPGPS, Ore Sorting, Dilución, Factor de recuperación, Modelo de bloques.

ABSTRACT

This research determined the effect of integrating the Ore Sorting (ShovelSense) and High-Precision Grade-control Positioning System (HPGPS) technologies on reducing operational dilution and increasing the Recovery Factor at the Constancia Mining Unit – Hudbay (Chumbivilcas, Cusco). The study followed a quantitative, applied approach with a non-experimental design, using FMS operational records from loading cycles between August 2025 and January 2026 as the sample. Variables analyzed included sensor-estimated copper grade, block-model grade, material classification, and final destination, based on the Cu cut-off grade used to differentiate ore from waste.

Results showed that, in cycles where Ore Sorting produced no grade reading, HPGPS assumed material classification based on the block model and mining polygons, ensuring operational continuity. This integration achieved 91.1% coherence in material classification, directly contributing to reduced operational dilution. Additionally, HPGPS acted as an active backup mechanism when Ore Sorting readings were unavailable, increasing the Recovery Factor by approximately 4.3% during the study period by identifying ore previously misclassified as waste due to lack of sensor data, thereby improving operational indicators and narrowing the production gap relative to budget.

The study concludes that integrating both technologies constitutes an effective operational control strategy, with HPGPS serving as a backup system for Ore Sorting limitations in geologically variable Skarn-type deposits.

Keywords: HPGPS, Ore Sorting, Dilution, Ore recovery, Block model.

ÍNDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INTRODUCCIÓN	iv
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
CAPÍTULO I PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
1.1. Descripción del problema	19
1.2. Formulación del problema	20
1.2.1 Problema general de la investigación	20
1.2.2 Problemas específicos de la investigación	20
1.3 Objetivos de la investigación.....	21
1.3.1 Objetivo general.....	21
1.3.2 Objetivos específicos	21
1.4 Justificación	21
1.5 Delimitación de la investigación.....	22
1.6 Hipótesis	23
1.6.1 Hipótesis general.....	23
1.6.2 Hipótesis específicas	23
1.7 Variables	23
1.7.1 Descripción de variables	23

1.7.2	Operacionalización de variables	24
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN		25
2.1	Antecedentes de la investigación	25
2.1.1	Antecedentes internacionales	25
2.1.2	Antecedentes nacionales	28
2.2	Bases teóricas	29
2.2.1	Optimización en procesos mineros	29
2.2.2	Eficiencia técnico-operacional	30
2.2.3	Ley de corte (cut-off grade)	31
2.2.4	Dilución	31
2.2.5	Relación entre dilución y pérdida de mineral (Ore Loss)	32
2.2.6	La relación estéril/mineral (SR)	33
2.2.7	Factor de recuperación (FR)	35
2.2.8	Producción en operaciones mineras	36
2.2.9	Recuperación	37
2.2.10	Ciclo de acarreo	38
2.2.11	Costo de carguío y acarreo	39
2.2.12	Modelo de bloques	40
2.2.13	HPGPS (High precision GPS)	42
2.2.14	Ore sorting (Shovelsense)	44
2.3	Marco conceptual	49

2.3.1	Depósito tipo Skarn.....	49
2.3.2	Polígono de minado	50
2.3.3	Zona de contacto mineral–desmonte	50
2.3.4	Lectura válida de ley	50
2.3.5	Jerarquía de decisión.....	50
2.3.6	Sistema FMS (Fleet Management System).....	51
2.3.7	Plataforma R4M.....	51
2.3.8	Árbol de decisiones operativo.....	51
CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....		52
3.1	Tipo de investigación.....	52
3.2	Nivel de investigación.....	52
3.3	Diseño de la investigación	53
3.4	Población.....	53
3.5	Muestra	54
3.6	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	55
3.6.1	Técnica de recolección de datos	55
3.6.2	Instrumentos de recolección de datos	55
3.6.3	Técnica de procesamiento de datos.....	56
3.7	Integración tecnológica del sistema HPGPS y Ore Sorting.....	56
3.7.1	Descripción técnica de los sistemas	56
3.7.2	Sistema Ore Sorting (Shovelsense).....	57

3.7.3	Lógica operativa de clasificación en Constanca	58
3.7.4	Árbol de decisiones para la clasificación del material	58
3.7.5	Comportamiento del sistema	59
3.7.6	Influencia del ciclo de carguío en la generación de datos	63
3.7.7	Gestión operativa de ciclos sin ley	64
3.7.8	Síntesis operativa del sistema en Constanca	65
3.8	Sistema de minado de alta precisión por bloques (HPGPS)	66
3.8.1	Aplicación del sistema en Constanca	66
3.8.2	Tipos de desviaciones en la clasificación	67
3.8.3	Validación de la precisión del sistema HPGPS	67
3.8.4	Enfoque de análisis de desviaciones	69
3.8.5	Resultados de validación	70
3.8.6	Características del sistema HPGPS	80
3.9	Proceso de integración tecnológica	80
3.9.1	Flujo de comunicación e integración de datos	80
3.9.2	Lógica de decisión y asignación de destino	82
3.9.3	Lógica de decisión y asignación de destino	83
3.9.4	Interfaz de alertas:	86
3.9.5	Optimización del reporte de clasificación	86
3.9.6	Jerarquía de integración operativa	87
3.9.7	Sistema tradicional vs. sistema integrado	88

3.9.8	Parámetros operativos y de control.....	89
3.9.9	Indicadores de desempeño	89
CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		90
4.1.	Análisis de resultados	90
4.1.1	Contexto operativo previo al análisis de resultados.....	91
4.1.2	Criterios de evaluación para el análisis del HPGPS	92
4.1.3	Análisis del sistema HPGPS	92
4.1.4	Análisis del sistema Ore Sorting.....	98
4.1.5	Influencia del Ore Sorting en la eficiencia de extracción	100
4.1.6	Impacto de la integración HPGPS + Ore Sorting	100
4.1.7	Impacto en la recuperación de mineral por HPGPS	101
4.1.8	Dilución operativa.....	102
4.1.9	Relación estéril/mineral	103
4.1.10	Impacto en indicadores operativos (GAP productivo).....	104
4.2	Discusión de resultados.....	104
4.2.1	Determinar el efecto de integrar los sistemas Ore Sorting y HPGPS en la reducción de la dilución operativa y la mejora del factor de recuperación de mineral.	104
4.2.2	Evaluar en qué medida el sistema HPGPS garantiza la continuidad de la clasificación del material en ciclos donde el Ore Sorting no genera lectura válida de ley.	

4.2.3 Cuantificar la mejora del factor de recuperación mediante el sistema HPGPS en zonas previamente clasificadas como desmonte por ausencia de lectura sensorial. 107

4.2.4 Analizar cómo influye la jerarquía de decisión integrada entre el sistema HPGPS y el Ore Sorting en la correcta asignación del destino del material en el frente de carguío. 108

CONCLUSIONES	110
RECOMENDACIONES	112
BIBLIOGRAFÍA	114
ANEXOS	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:Operacionalización de las variables.....	24
Tabla 2: Árbol de decisiones basado en la clasificación por Ore Sorting.	59
Tabla 3: Reportabilidad operativa del sistema ShovelSense.	60
Tabla 4: Características operativas del sistema ShovelSense	66
Tabla 5: Comparación de tonelaje y ley – Control Sense vs reservas de corto plazo.....	72
Tabla 6: Comparación de tonelaje y ley – Control Sense vs reservas de corto plazo (PH01).75	
Tabla 7: Comparación de tonelaje y ley – Control Sense vs reservas de corto plazo (PH02). 77	
Tabla 8 <i>Características operativas del sistema HPGPS.</i>	80
Tabla 9 <i>Flujo de información entre sistemas integrados.</i>	81
Tabla 10: Árbol de decisión en base a las leyes de Bloque	85
Tabla 11: Árbol de decisión en base a los polígonos Tipo A	85
Tabla 12: Árbol de decisión en base a los polígonos de Alta Ley	85
Tabla 13 <i>Comparación del sistema tradicional vs sistema integrado</i>	88
Tabla 14 <i>Criterios de clasificación por ley de corte.</i>	89
Tabla 15: Clasificación de registros según fuente de evaluación	93
Tabla 16 <i>Precisión en la asignación de destino del material mediante HPGPS</i>	94
Tabla 17 <i>Material identificado en desmonte mediante HPGPS</i>	97
Tabla 18 <i>Distribución de registros evaluados</i>	98
Tabla 19 <i>Comparación promedio de Leyes de Cu</i>	99
Tabla 20 <i>Recuperación de mineral mediante HPGPS</i>	101
Tabla 21 <i>Dilución operativa</i>	102
Tabla 22 <i>Relación estéril</i>	103
Tabla 23: Producción histórica de metales – Unidad Minera Constancia (2019–2024).....	120
Tabla 24: Jerarquía de integración tecnológica en la Unidad Minera Constancia.....	127

Tabla 25: Diagrama simplificado del proceso de la planta concentradora Constanca.	129
--	-----

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Etapas del ciclo de acarreo	39
Gráfico 2: Lógica operativa de clasificación del material Ore Sorting	58
Gráfico 3: Disponibilidad semanal del sistema Ore Sorting.....	61
Gráfico 4: Distinción operativa entre OIW y WIO mediante el sistema Ore Sorting	62
Gráfico 5: Causas de error del sistema ShovelSense.	63
Gráfico 6: Distribución del tiempo de ciclo de carguío.	64
Gráfico 7: Desempeño mensual del sistema ShovelSense.....	65
Gráfico 8: Dispersión de elevaciones HPGPS vs elevación de referencia – PH03	71
Gráfico 9: Dispersión de elevaciones HPGPS vs elevación de referencia – PH01.	74
Gráfico 10: Dispersión de elevaciones HPGPS vs elevación de referencia – PH02.	77
Gráfico 11: Validación de precisión HPGPS por pala-Control Sense vs Solid Reserve	78
Gráfico 12: Síntesis multidimensional de indicadores técnico-operacionales.....	79
Gráfico 13: Flujo de integración de datos – HPGPS, Ore Sorting y R4M	83
Gráfico 14: Flujo de toma de decisiones integrado.	88
Gráfico 15: Composición jerárquica de la clasificación del material (93,750 ciclos totales)...	95
Gráfico 16: Mineral identificado en zonas de desmonte por mes.....	97
Gráfico 17: Ciclo de minado en la Unidad Minera Constancia.	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de Bloques -Polígono Fase V - Constancia.....	41
Figura 2: Receptores y antenas HPGPS en pala – Mina Constancia.	43
Figura 3: Funcionamiento del sistema ShovelSense.....	45
Figura 4: Arquitectura y Flujo de Procesamiento Shovelsense	47
Figura 5: Sistema ShovelSense en equipo de carguío – Mina Constancia.	57
Figura 6: Zonas de análisis para evaluación del sistema HPGPS	67
Figura 7: Casos de validación en la clasificación del material: Ore in Waste y Waste in Ore.	69
Figura 8: Validación espacial de puntos HPGPS – Pala PH03, Fase VI, Banco 4230.....	70
Figura 9: Validación espacial de puntos HPGPS – Pala PH01, Fase V, Banco 4335.	73
Figura 10: Validación espacial de puntos HPGPS – Pala PH02, Fase V, Banco 4335	76
Figura 11: Interfaz de alertas operativas – Plataforma R4M.	86
Figura 12: Actualización de columnas en reporte de clasificación – Plataforma R4M.....	87
Figura 13: Ubicación satelital de la Unidad Minera Constancia.	116
Figura 14: Mapa de Ubicación geográfica de la Unidad Minera.....	117
Figura 15: Geología Regional de la Unidad Minera.....	121

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

BI	Block Index / Índice de Bloque
Cu	Cobre (símbolo químico)
Cut-Off	Ley de corte mínima económica
D	Dilución operativa
FMS	Fleet Management System / Sistema de Gestión de Flotas
FR	Factor de Recuperación
FV	Fase V del Tajo Constancia
FVI	Fase VI del Tajo Constancia
GNSS	Global Navigation Satellite System / Sistema Global de Navegación por Satélite
GPS	Global Positioning System / Sistema de Posicionamiento Global
HIAu	High Index Gold / Polígono de alto índice de oro
HPGPS	High Precision GPS Mining / Minado de Alta Precisión por Bloques
Mt	Megatonelada
OS	Ore Sorting
R4M	Plataforma de gestión operativa de Hudbay Minerals
SR	Stripping Ratio / Relación Estéril-Mineral
SRlim	Stripping Ratio límite económico
t/h	Toneladas por hora
XRF	X-Ray Fluorescence / Fluorescencia de Rayos X
t/t	Tonelada por tonelada
BeiDou	Sistema de navegación satelital de China
Galileo	Sistema de navegación satelital de la Unión Europea
GLONASS	Sistema de navegación satelital de Rusia
MAE	Mean Absolute Error/Error Absoluto Medio
MAPE	Mean Absolute Percentage Error/Error Porcentual Absoluto Medio
SMU	Selective Mining Unit/Unidad Básica de Selección
RTK	Real-Time Kinematic/Cinemática en Tiempo Real

CAPÍTULO I

PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema

En la minería a tajo abierto, la optimización de la eficiencia operativa depende críticamente de la capacidad de segregación entre el mineral y el desmonte. La dilución operativa no solo degrada la ley de cabeza enviada a la planta, sino que genera un impacto financiero directo al incrementar los costos de acarreo, procesamiento y disposición de material estéril en planta. Hustrulid y Kuchta (2006) sostienen que la precisión en la ejecución del minado es un factor determinante para minimizar las pérdidas de mineral y controlar los costos unitarios de operación, siendo la dilución no planificada uno de los principales indicadores de ineficiencia en operaciones a tajo abierto. Esta problemática se acentúa en yacimientos con alta variabilidad geológica como los depósitos tipo Skarn, donde los contactos irregulares entre zonas mineralizadas y estériles dificultan la correcta delimitación del material durante el carguío.

En la Unidad Minera Constanica – Hudbay, que gestiona precisamente este tipo de depósito, los registros operativos del sistema FMS correspondientes al periodo de estudio evidenciaron que la dilución operativa en las fases V y VI alcanza niveles de hasta 10% a 13%, superando el límite técnico del 9% establecido para la operación. Esta desviación ha provocado

que la relación estéril/mineral (SR) real se incremente en 0.05 t/t adicionales respecto al presupuesto, elevando el costo operativo unitario de minado e impactando directamente en el costo de procesamiento por tonelada, debido al consumo innecesario de energía, reactivos y capacidad de molienda al tratar material sin valor económico.

Ante este escenario, el sistema Ore Sorting (ShovelSense), instalado en los equipos de carguío de la operación, no ha logrado cerrar por sí solo la brecha de precisión, debido a que en depósitos tipo Skarn afectan la respuesta espectral del sensor XRF, generando ciclos de carguío sin lectura válida de ley que comprometen la correcta clasificación del material. Por ello, se hace necesaria la integración del sistema de Minado de Alta Precisión por Bloques (HPGPS), el cual actúa como respaldo activo en aquellos ciclos donde el Ore Sorting no genera lectura, apoyándose en el modelo de bloques y los polígonos de minado para garantizar la continuidad de la clasificación, optimizar el Factor de Recuperación y restablecer los niveles de rentabilidad proyectados para la unidad.

1.2. Formulación del problema

1.2.1 Problema general de la investigación

¿Cuál es el efecto de integrar los sistemas Ore Sorting y Minado de Alta Precisión por Bloques (HPGPS) en la reducción de la dilución operativa y el incremento del factor de recuperación de mineral en la Unidad Minera Constancia – Hudbay?

1.2.2 Problemas específicos de la investigación

1. ¿En qué medida el sistema HPGPS garantiza la continuidad de la clasificación del material en ciclos donde el sistema Ore Sorting no genera lectura válida de ley?
2. ¿Cuánto mejora el factor de recuperación mediante el sistema HPGPS en zonas previamente clasificadas como desmonte por ausencia de lectura sensorial?
3. ¿Cómo influye la jerarquía de decisión integrada entre el sistema HPGPS y el Ore Sorting en la correcta asignación del destino del material en el frente de carguío?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Determinar el efecto de integrar los sistemas Ore Sorting y Minado de Alta Precisión por Bloques (HPGPS) en la reducción de la dilución operativa y el incremento del factor de recuperación de mineral, mediante el análisis de los registros operativos del sistema FMS, en la Unidad Minera Constancia – Hudbay.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Evaluar en qué medida el sistema HPGPS garantiza la continuidad de la clasificación del material en ciclos donde el sistema Ore Sorting no genera lectura válida de ley.
2. Cuantificar cuanto mejora el factor de recuperación mediante el sistema HPGPS en zonas previamente clasificadas como desmonte por ausencia de lectura sensorial.
3. Analizar cómo influye la jerarquía de decisión integrada entre el sistema HPGPS y el Ore Sorting en la correcta asignación del destino del material en el frente de carguío.

1.4 Justificación

La variabilidad mineralógica de los depósitos tipo Skarn en la Unidad Minera Constancia genera escenarios donde el sistema Ore Sorting (ShovelSense) presenta limitaciones de detección, particularmente al subestimar las leyes de Cu. En estos casos, la ausencia de lectura válida del sensor compromete la correcta asignación del destino del material, incrementando el riesgo de enviar mineral económico a botaderos. La integración del sistema HPGPS responde directamente a esta limitación, actuando como respaldo activo que garantiza la continuidad de la clasificación mediante el modelo de bloques y los polígonos de minado.

La superioridad de la integración frente al uso individual de cada sistema radica en la creación de una jerarquía de decisión: mientras el Ore Sorting ofrece una respuesta sensorial inmediata en ciclos con lectura disponible, el HPGPS garantiza la trazabilidad espacial basada

en el modelo geológico cuando el sensor no genera información. Esta sinergia asegura que la operación mantenga la continuidad de la clasificación sin interrupciones ni riesgo de pérdida de mineral.

El impacto económico es directo y cuantificable. La dilución operativa y la pérdida de mineral representan costos críticos que afectan la rentabilidad de la unidad. Esta investigación se justifica al demostrar que la integración tecnológica permite incrementar el Factor de Recuperación que anteriormente era clasificado como desmonte, reduciendo la brecha entre la producción real y el presupuesto.

Desde el punto de vista metodológico, este estudio establece una jerarquía de flujo de datos y un protocolo técnico de toma de decisiones dinámico, aplicable a operaciones con alta variabilidad geológica. El estudio sirve como referencia técnica para la implementación de estrategias de control adaptativas en operaciones mineras que busquen optimizar la clasificación del material en tiempo real.

1.5 Delimitación de la investigación

Delimitación Geográfica. La presente investigación se desarrolla en la Unidad Minera Constancia – Hudbay, ubicada en el distrito de Velille, provincia de Chumbivilcas, región Cusco, Perú, a una altitud aproximada de 4,100 m.s.n.m. La unidad de observación comprende las Fases V y VI del tajo Constancia, donde se encuentran operativos los sistemas HPGPS y Ore Sorting (ShovelSense).

Delimitación Temporal. La investigación se desarrolla con datos operativos correspondientes al periodo comprendido entre agosto de 2025 y enero de 2026, intervalo durante el cual se registraron los ciclos de carguío y clasificación de material analizados en el estudio.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis general

La integración de los sistemas Ore Sorting y Minado de Alta Precisión por Bloques (HPGPS) reduce la dilución operativa e incrementa el factor de recuperación de mineral en la Unidad Minera Constanica – Hudbay.

1.6.2 Hipótesis específicas

1. El sistema HPGPS garantiza la continuidad de la clasificación del material en los ciclos donde el Ore Sorting no genera lectura válida de ley, manteniendo la operación sin interrupciones en la asignación del destino del material.
2. El sistema HPGPS mejora el factor de recuperación de mineral en zonas clasificadas como desmonte por ausencia de lectura sensorial, incrementando la recuperación de mineral de la operación.
3. La jerarquía de decisión integrada entre el sistema HPGPS y el Ore Sorting influye directamente en la correcta asignación del destino del material en el frente de carguío.

1.7 Variables

1.7.1 Descripción de variables

1.7.1.1 Variables independientes

(X₁): Sistema de Minado de Alta Precisión por Bloques (HPGPS)

(X₂): Sistema de Clasificación Sensorial por Fluorescencia de Rayos X (ShovelSense – Ore Sorting)

1.7.1.2 Variables dependientes

(Y): Eficiencia Técnico–Operacional del Proceso Minero

1.7.2 Operacionalización de variables

Tabla 1:Operacionalización de las variables

Tipo de Variable	Variable	Dimensión / Componente	Indicador	Und
Independiente (X₁)	Sistema HPGPS	Continuidad operativa	% de ciclos de carguío clasificados mediante HPGPS en ausencia de lectura del sensor	%
Independiente (X₂)	Sistema Ore Sorting	Clasificación en tiempo real	% de ciclos con lectura válida de ley respecto al total de ciclos analizados	%
		Limitación sensorial	% de ciclos sin lectura válida de ley respecto al total de ciclos analizados	%
Dependiente (Y)	Eficiencia Técnico–Operacional	Factor de Recuperación (FR)	% de mineral recuperado en zonas previamente clasificadas como desmonte respecto al mineral total	%
		Dilución (D)	% de material estéril incorporado al mineral enviado a planta	%
		Relación Estéril / Mineral (SR)	Toneladas de estéril por tonelada de mineral extraído	t/t

Nota: Elaboración propia

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

- a. Câmara, T. R., Leal, R. S., Peroni, R. L., & Capponi, L. N. (2019). Controlling operational dilution in open-pit mining. Artículo científico publicado en Mining Technology, Vol. 128, No. 1 – Brasil.

El estudio tuvo como objetivo desarrollar una metodología para medir y controlar la dilución operativa en minería a tajo abierto, considerando la incertidumbre asociada a las leyes planificadas y la correspondencia entre los planes diseñados y ejecutados.

Se concluye que la incorporación de incertidumbre en los modelos de planificación permitió identificar las zonas con mayor probabilidad de dilución operativa, mejorando la adherencia entre el plan diseñado y la ejecución real.

Los autores proponen una metodología basada en polígonos de minado y modelos de leyes para medir los rangos de dilución en cada zona operativa y ajustar los planes antes de la ejecución.

- b. Faraj, R. et al. (2022). Data driven approaches for estimating bulk ore sorting value.

Documento técnico publicado por GeoMet, Queen's University – Canadá.

El estudio tuvo como objetivo desarrollar enfoques basados en datos para estimar el valor generado por la clasificación masiva mediante ShovelSense, evaluando su impacto en la recuperación de mineral y reducción de dilución a escala de bloque.

Se concluye que el sistema clasifica el material a nivel de balde, agrega la información a nivel de camión y transmite la decisión al FMS automáticamente, reduciendo la variabilidad humana en las decisiones de destino del material.

Los autores proponen una metodología de cuantificación del valor basada en la discretización de bloques a nivel de camión para evaluar el impacto económico de la clasificación masiva. MineSense Technologies (2024).

- c. MineSense Technologies (2024). Copper Mountain Mine case study. Reporte técnico publicado por MineSense Technologies Ltd. – Canadá.

El estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto del sistema ShovelSense en la recuperación de mineral y la reducción de dilución en la mina Copper Mountain, operación cuprífera a tajo abierto en British Columbia, Canadá. Se concluye que el sistema rechazó aproximadamente 84,000 toneladas de material no económico reduciendo la dilución en 1%, y recuperó aproximadamente 342,000 toneladas de mineral que habría sido enviado a botaderos, mejorando la recuperación en 4% y generando un ahorro de C\$3.6 millones. Se propone la integración automatizada del ShovelSense con el FMS para eliminar la dependencia del operador en las decisiones de destino del material.

- d. Faraj, F., Ortiz, J., & Arnal, J. (2025). Data driven block discretisation method for predicting the bulk ore sorting benefits applied at distinctly heterogeneous open pit

mines. Artículo científico publicado en Mining Technology, SAGE Journals – Canadá/Australia.

El estudio tuvo como objetivo desarrollar una metodología basada en datos para predecir y cuantificar el valor generado por el sistema ShovelSense en operaciones a tajo abierto con alta heterogeneidad geológica.

Se concluye que la integración del ShovelSense con el FMS genera valor cuantificable tanto por recuperación de mineral como por reducción de dilución, permitiendo redirigir automáticamente los camiones al destino correcto.

Los autores proponen una metodología de discretización de bloques a nivel de camión para evaluar el impacto económico de la clasificación masiva en yacimientos con alta variabilidad geológica.

- e. Groundhog Apps (2024). Harnessing high precision GPS for enhanced ore quality control in open-pit mines. Artículo técnico publicado por Groundhog Apps – Australia.

El estudio tuvo como objetivo analizar el impacto del sistema HPGPS en el control de calidad del mineral y la reducción de la dilución en operaciones de minería a tajo abierto con estratos heterogéneos.

Los resultados demostraron que la tecnología HPGPS permite alcanzar precisión centimétrica en la delimitación de zonas mineralizadas durante el proceso de carguío, garantizando que la excavación se ejecute dentro de los límites definidos por los polígonos de minado y reduciendo significativamente las desviaciones respecto al diseño. Asimismo, se evidenció que la integración del HPGPS con el modelo de bloques permite tomar decisiones operativas en tiempo real basadas en información espacial y geológica.

Se concluye que el HPGPS constituye una herramienta fundamental para maximizar la recuperación de mineral y minimizar el desperdicio de material, y se propone su integración con sistemas de clasificación sensorial para fortalecer el control operativo en frentes de carguío con alta variabilidad litológica.

2.1.2 Antecedentes nacionales

- a. Huaman, J. M., & Mamani, W. (2020). Factores que contribuyen a la dilución mineral en operaciones mineras a tajo abierto: una revisión de la literatura científica. Trabajo de investigación, Universidad Privada del Norte – Perú.

El estudio tuvo como objetivo identificar y analizar los principales factores que contribuyen a la dilución mineral en operaciones mineras a tajo abierto, mediante una revisión sistemática de la literatura científica disponible.

Se concluye que la dilución operativa se origina principalmente por la incertidumbre geológica en la definición de contactos mineral–desmonte, los errores de ejecución en el frente de carguío y el desplazamiento del material tras la voladura, identificándose que la dependencia exclusiva del modelo de bloques incrementa el riesgo de dilución no planificada en yacimientos con alta variabilidad litológica. Los autores proponen la implementación de protocolos de verificación en campo que combinen información geológica actualizada con herramientas de control operativo en tiempo real, reduciendo la brecha entre el plan diseñado y la ejecución real del minado.

- b. Mollehuanca Pablo, A. R., & Quispe Cárdenas, J. (2025). Reconciliación de polígonos de minado en la mina Constancia, provincia de Chumbivilcas, Cusco. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco – Perú.

El estudio tuvo como objetivo aplicar la reconciliación de polígonos de minado en la mina Constancia, operación de tajo abierto de pórfido Cu-Mo ubicada en la provincia

de Chumbivilcas, región Cusco, con la finalidad de evaluar la correspondencia entre el material planificado y el material ejecutado en campo.

Se concluye que la reconciliación de polígonos permite identificar desviaciones entre el plan de minado y la ejecución real, constituyendo una herramienta clave para el control de la calidad del material extraído y la reducción de pérdidas operativas. Los autores proponen la aplicación sistemática de la reconciliación de polígonos como mecanismo de control operativo en operaciones cupríferas a tajo abierto con alta variabilidad geológica.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Optimización en procesos mineros

En el contexto minero, la optimización se refiere al proceso de ajustar o mejorar métodos, operaciones o sistemas con el fin de maximizar resultados y eficiencia. En términos operativos, implica reducir costos, minimizar pérdidas y aumentar el rendimiento mediante la modificación de parámetros técnicos. Un sistema se considera optimizado cuando alcanza desempeños superiores respecto a configuraciones convencionales (Hartman & Mutmansky, 2002; Hustrulid & Kuchta, 2006).

Desde un enfoque matemático, la optimización puede representarse como un problema de maximización:

$$\max Z = f(R, D, C, Q)$$

Donde:

Z: valor económico de la operación

R: recuperación de mineral

D: dilución

C: costos operativos

Q: calidad del mineral

En minería, este enfoque ha evolucionado hacia sistemas de optimización en tiempo real, donde las decisiones operativas se ajustan dinámicamente en función de datos provenientes de sensores, sistemas de posicionamiento y modelos geológicos.

2.2.2 Eficiencia técnico–operacional

La eficiencia técnico–operacional en minería se refiere a la capacidad del sistema productivo para ejecutar las actividades de extracción y manejo de material de manera óptima, maximizando la recuperación del mineral útil y minimizando las pérdidas asociadas como la dilución y el manejo innecesario de material estéril. Este concepto integra tanto la calidad de la ejecución operativa como el uso eficiente de la información disponible para la toma de decisiones en campo.

La eficiencia en minería está relacionada con la capacidad de alcanzar objetivos operativos utilizando la menor cantidad posible de recursos, o bien, obtener mayores resultados con los mismos insumos. Se evalúa a través de indicadores cuantitativos como:

- Costos por tonelada
- Rendimiento de equipos
- Cumplimiento de metas de producción

Una operación eficiente no es aquella que solo produce más toneladas, sino aquella que logra extraer el mayor valor económico posible del yacimiento con el menor nivel de desviaciones respecto al diseño. En minería, la eficiencia técnico–operacional se evalúa principalmente a través de tres indicadores:

- La dilución operativa (D)
- La relación estéril/mineral (SR)
- Recuperación de mineral (t)

Sin embargo, en operaciones con alta variabilidad geológica, la eficiencia también debe considerar la calidad del material extraído. En este sentido, una operación eficiente no es

aquella que solo maximiza volumen, sino aquella que maximiza la proporción de mineral útil respecto al material total extraído.

2.2.3 Ley de corte (cut-off grade)

La ley de corte es un parámetro fundamental en la evaluación y planificación de un yacimiento minero, ya que define el contenido mínimo de mineral valioso que debe presentar un bloque de roca para que su extracción y procesamiento sean económicamente rentables. Este criterio permite discriminar entre material considerado como mena (económicamente aprovechable) y material estéril, que no justifica su procesamiento en planta (Lane, 1988; Hustrulid & Kuchta, 2006).

Este valor se determina considerando una combinación de factores técnicos y económicos, como el costo de extracción, procesamiento, transporte, recuperación metalúrgica y el precio del mercado del metal. La ley de corte marginal o de punto de equilibrio se utiliza frecuentemente como referencia en etapas tempranas del proyecto, ya que establece el nivel en el que los ingresos igualan a los costos, sin generar utilidad ni pérdida.

$$g_c = \frac{C_m + C_p + C_t}{R_m * P_m}$$

Donde:

g_c : Ley de corte mínima (%)

C_m : Costo de minado por tonelada (US\$/t)

C_p : Costo de procesamiento por tonelada (US\$/t)

C_t : Costo de transporte y comercialización (US\$/t)

R_m : Recuperación metalúrgica

P_m : Precio del metal (US\$/t)

2.2.4 Dilución

La dilución es un fenómeno que ocurre cuando material sin valor económico (estéril) se incorpora al mineral durante las diferentes etapas del ciclo de minado, provocando una

disminución de la ley promedio del material enviado a planta. Este proceso reduce la rentabilidad de la operación, ya que incrementa los costos de transporte, procesamiento y disposición de material que no genera ingresos (Hustrulid & Kuchta, 2006; Hartman & Mutmansky, 2002).

En términos generales, se reconocen dos tipos de dilución:

- **Dilución Planeada (Estructural):** Es el material estéril que se encuentra dentro de los límites de minado diseñados. Ocurre cuando la geometría del cuerpo mineralizado es más estrecha o irregular que la Unidad Básica de Selección (SMU). Se acepta para garantizar la continuidad mecánica del banco.
- **Dilución No Planeada (Operacional):** Es el material extraído fuera de los límites del diseño. Sus causas principales incluyen:
 - **Incertidumbre Geológica:** Contactos mal definidos en el modelo de bloques (aquí es donde el *Ore Sorting* ayuda).
 - **Errores de Ejecución:** Sobre excavación por parte del operador de la pala (aquí es donde el HPGPS corrige la trayectoria).
 - **Movimiento por Voladura:** Desplazamiento del mineral tras el disparo, alterando las coordenadas originales de los polígonos.

Este fenómeno puede presentarse en diferentes fases, desde el diseño del modelo de bloques hasta la ejecución de la explotación, afectando directamente los niveles de recuperación y eficiencia de la operación.

$$Dilución (\%) = \left(\frac{\text{Toneladas de estéril}}{\text{Toneladas de mineral} + \text{Toneladas de estéril}} \right) \times 100$$

2.2.5 Relación entre dilución y pérdida de mineral (Ore Loss)

Es vital no confundir dilución con pérdida. La pérdida de mineral ocurre cuando material por encima de la ley de corte es enviado erróneamente al botadero de desmonte. La

integración HPGPS + *Ore Sorting* ataca ambos frentes: evita enviar mineral al botadero (reduce pérdida) y evita cargar estéril (reduce dilución).

2.2.6 La relación estéril/mineral (SR)

La relación estéril/mineral (Stripping Ratio, SR) es uno de los indicadores más relevantes en minería a cielo abierto, ya que permite evaluar la eficiencia volumétrica del tajo y su impacto económico. Este parámetro expresa la cantidad de material estéril que debe ser removido para extraer una unidad de mineral económicamente aprovechable (Hustrulid & Kuchta, 2006).

$$SR = \frac{T_e}{T_m}$$

Donde:

- SR = Relación estéril/mineral
- T_e = Toneladas de estéril (waste)
- T_m = Toneladas de mineral (ore)

El SR representa la carga operativa asociada a la extracción del mineral. Un valor elevado de SR implica que se requiere remover grandes volúmenes de material sin valor económico para acceder al mineral, lo que incrementa:

- Costos de minado (perforación, voladura, carguío y acarreo)
- Consumo de combustible
- Desgaste de equipos
- Costos ambientales (mayor disposición de desmonte)

Por el contrario, un SR bajo indica una mayor eficiencia operativa, ya que se extrae mayor proporción de mineral respecto al material estéril.

2.2.6.1 Relación del SR con la economía del proyecto

El SR está directamente vinculado al concepto de stripping ratio económico límite (SR_l), el cual define el máximo valor de SR que puede ser económicamente sostenible.

$$SR_{lim} = \frac{\text{Valor del mineral}}{\text{Costo de remoción de estéril}}$$

En términos más detallados:

$$SR_{lim} = \frac{(P \cdot G \cdot R) - C_p}{C_m}$$

Donde:

- P: precio del metal
- G: ley del mineral
- R: recuperación
- C_p : costo de procesamiento
- C_m : costo de minado por tonelada de estéril

2.2.6.2 Tipos de Stripping Ratio

- SR instantáneo: Corresponde a la relación estéril/mineral en un periodo específico (por ejemplo, mensual o anual). Es altamente variable y depende de la geometría del tajo.
- SR promedio: Representa el promedio del SR durante toda la vida útil de la mina. Es utilizado en evaluaciones económicas de largo plazo.
- SR incremental: Se refiere al SR asociado a la expansión de fases o pushbacks, utilizado en planificación minera para evaluar decisiones de inversión.

2.2.6.3 Factores que afectan el SR

El SR no es un valor fijo, sino que depende de múltiples variables:

Geológicos

- Profundidad del yacimiento
- Geometría del cuerpo mineralizado
- Distribución de leyes

Operativos

- Precisión del minado
- Control de dilución
- Selección de equipos

Económicos

- Precio del metal
- Costos de operación
- Ley de corte

2.2.7 Factor de recuperación (FR)

El Factor de Recuperación (FR) es un indicador técnico que expresa la eficiencia del proceso de minado, al cuantificar la proporción del mineral útil estimado en el modelo geológico que es efectivamente extraído durante la operación. Este parámetro permite evaluar el desempeño del control de leyes y la precisión en la ejecución de los polígonos de minado, siendo fundamental para analizar la calidad del proceso extractivo (Hustrulid & Kuchta, 2006; SME, 2011).

$$FR = \frac{Q_r}{Q_t} \times 100$$

Donde:

- FR = Factor de recuperación (%).
- Q_r = Cantidad de mineral efectivamente recuperado (t).
- Q_t = Cantidad total de mineral estimado (t).

2.2.8 Producción en operaciones mineras

La producción minera comprende el conjunto de procesos orientados a la extracción eficiente del recurso mineral desde el yacimiento hasta su envío a planta, involucrando actividades como perforación, voladura, carguío y acarreo. Su desempeño se evalúa mediante indicadores operativos tales como toneladas movidas, cumplimiento de planes de minado, utilización de equipos y costos unitarios por tonelada (Hustrulid & Kuchta, 2006).

En este contexto, la optimización de la producción no solo implica incrementar los volúmenes extraídos, sino también asegurar que el material movilizado cumpla con criterios de calidad previamente definidos, de modo que se maximice el valor económico del mineral procesado. Para ello, es fundamental reducir la variabilidad operativa y mejorar la precisión en la ejecución de las actividades en el frente de minado.

El avance de la minería digital ha permitido incorporar tecnologías que contribuyen significativamente a este objetivo, mediante el uso de sistemas que proporcionan información en tiempo real y de alta resolución. Estas herramientas permiten realizar ajustes dinámicos durante la operación, mejorando la eficiencia de los procesos y reduciendo pérdidas asociadas a errores de clasificación o desviaciones en la ejecución del plan (Kusiak, 2018).

Entre los principales aportes de estas tecnologías a la producción minera se destacan:

- Mejor control del material extraído: permite diferenciar con mayor precisión entre mineral y estéril.
- Optimización del ciclo de carguío y acarreo: mediante decisiones operativas basadas en datos actualizados.
- Reducción de reprocesos: al evitar el envío de material inadecuado a planta.
- Incremento de la productividad de equipos: al mejorar la planificación y ejecución de las tareas.

2.2.9 Recuperación

La recuperación en minería corresponde al grado en que el mineral económicamente valioso contenido en el yacimiento es efectivamente extraído y aprovechado durante las etapas del proceso productivo. Este concepto se vincula directamente con la eficiencia del minado y refleja la capacidad de la operación para transformar los recursos estimados en el modelo geológico en toneladas reales de mineral recuperado (Hustrulid & Kuchta, 2006).

Desde un enfoque operativo, la recuperación no depende únicamente de la cantidad de material extraído, sino también de la precisión con la que se ejecutan las actividades en el frente de minado. Factores como la correcta delimitación de los contactos geológicos, la calidad del carguío y la adecuada clasificación del material influyen de manera directa en la cantidad de mineral que es efectivamente enviado a planta. En este sentido, una baja precisión en la ejecución puede generar pérdidas de mineral, ya sea por su envío a botaderos o por su dilución con material estéril.

La recuperación también está estrechamente relacionada con la incertidumbre geológica inherente al yacimiento. Dado que los modelos de bloques representan una aproximación de la realidad, pueden existir variaciones a escala menor que no son capturadas adecuadamente, lo que incrementa el riesgo de subestimar zonas mineralizadas o sobreestimar áreas de baja ley. Estas desviaciones pueden impactar negativamente en los niveles de recuperación si no se cuenta con mecanismos de control y validación en campo (Kusiak, 2018).

En este contexto, la incorporación de tecnologías avanzadas ha permitido mejorar significativamente los niveles de recuperación mediante el fortalecimiento del control operacional y la reducción de la incertidumbre. Entre los principales aportes de estas tecnologías se destacan:

- Mayor precisión en la ejecución del minado: permite respetar los límites definidos en los polígonos de extracción.

- Mejor caracterización del material en tiempo real: facilita la correcta clasificación entre mineral y estéril.
- Reducción de pérdidas de mineral: al evitar que material económico sea enviado a botaderos.
- Optimización del envío a planta: asegurando que el material cumpla con criterios de calidad.

2.2.10 Ciclo de acarreo

El ciclo de acarreo en minería a tajo abierto corresponde al conjunto de actividades secuenciales que realiza un equipo de transporte (volquete o camión minero) desde que es asignado para carguío hasta que completa la descarga del material y retorna al punto de origen. Este ciclo constituye uno de los componentes más relevantes del proceso productivo, ya que influye directamente en la productividad, los costos operativos y la eficiencia global de la operación (Hustrulid & Kuchta, 2006).

El ciclo de acarreo tiene un impacto directo en indicadores clave de la operación:

- Producción: determina el volumen de material transportado por unidad de tiempo.
- Costos operativos: representa una de las mayores fuentes de consumo de combustible y mantenimiento.
- Eficiencia del sistema mina-planta: asegura la continuidad del flujo de material.

Además, cualquier ineficiencia en alguna de las etapas del ciclo puede generar cuellos de botella que afectan la productividad global.

Gráfico 1: Etapas del ciclo de acarreo



Fuente: Sistema de Gestión de Flota-Hudbay

2.2.11 Costo de carguío y acarreo

En las operaciones mineras a tajo abierto, las actividades de carguío y transporte constituyen una de las principales fuentes de costo dentro del proceso productivo. Estas etapas están directamente relacionadas con el movimiento de material, tanto mineral como estéril, por lo que su eficiencia influye de manera significativa en la rentabilidad global de la operación.

Diversos estudios indican que los costos asociados al carguío y acarreo pueden representar una proporción predominante del costo total de operación minera. En función de las condiciones específicas de la faena, tales como la geometría del yacimiento, las distancias de transporte, el tipo de equipos y los niveles de productividad alcanzados, estos costos pueden oscilar aproximadamente entre el 45% y el 65% del costo operativo total (Tiktin, 2016). Dentro

de este rango, el transporte suele constituir el componente más significativo, mientras que el carguío representa una proporción menor, aunque igualmente relevante.

De manera más específica, se ha reportado que el costo de carguío puede situarse en un rango aproximado del 10% al 20% del costo total, mientras que el acarreo puede representar entre un 35% y un 45%, dependiendo de factores como la distancia de acarreo, las condiciones de las vías y la eficiencia del sistema de despacho (Salas, 2012). Esta distribución evidencia que cualquier mejora en la eficiencia del transporte tiene un impacto directo y considerable en la reducción de costos operativos.

Desde el punto de vista de inversión, los equipos utilizados en estas operaciones implican montos significativos de capital. Por ejemplo, camiones de gran capacidad (del orden de 200–240 toneladas) pueden superar los dos millones de dólares por unidad, mientras que equipos de carguío como cargadores frontales o palas pueden alcanzar valores similares o incluso superiores, dependiendo de su tamaño y capacidad operativa (Saldaña, 2013). En este contexto, la selección adecuada de equipos no solo responde a criterios técnicos, sino también económicos, ya que su capacidad influye directamente en el rendimiento horario y en los costos unitarios de operación.

2.2.12 Modelo de bloques

El modelo de bloques es una herramienta fundamental en la planificación minera, cuya función principal es representar digitalmente el yacimiento mediante una malla tridimensional compuesta por unidades volumétricas (bloques) de tamaño definido. A cada bloque se le asignan propiedades geológicas, geoquímicas y geotécnicas, tales como ley de cobre, densidad, tipo litológico y características geomecánicas, las cuales son utilizadas para la estimación de recursos y la toma de decisiones operativas (Davis, 2002; Sinclair & Blackwell, 2002).

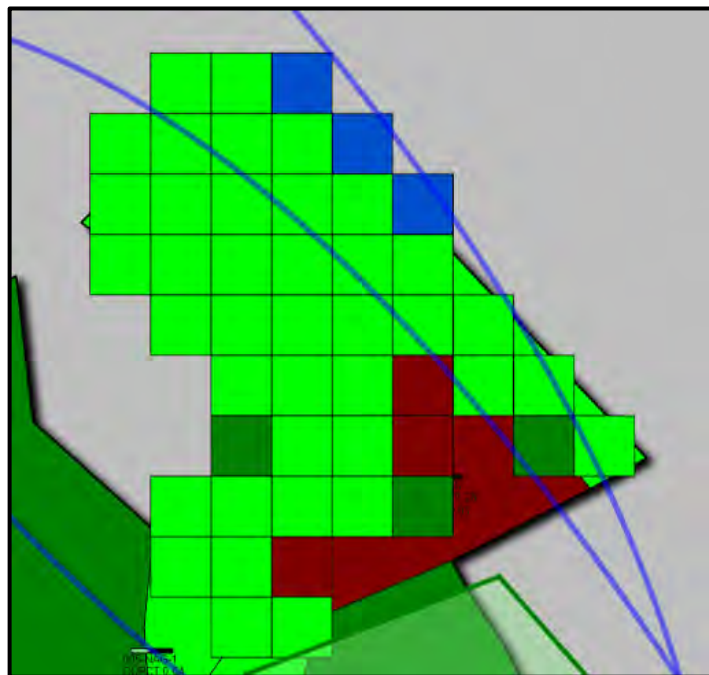
a. Determinación de Dimensiones Óptimas del Bloque

El dimensionamiento del bloque no es arbitrario, sino que es el resultado del equilibrio técnico entre:

- Variabilidad y Continuidad: El comportamiento espacial de la mineralización y el alcance del variograma.
- Capacidad de la Flota: Las dimensiones deben ser compatibles con la selectividad de los equipos de carguío (palas hidráulicas y eléctricas).
- Geometría del Diseño: Adaptación a los ángulos de talud y límites finales del tajo.

El Modelo de Bloques se constituye como el pilar numérico y espacial para la caracterización integral del depósito. Esta herramienta permite la representación discreta de variables críticas como la litología, densidad aparente, tenores metálicos (leyes), cotas de elevación y atributos de valor económico, facilitando la toma de decisiones estratégicas en el tajo.

Figura 1: Modelo de Bloques -Polígono Fase V - Constancia



Fuente: FMS- Hudbay Minerals.

2.2.13 HPGPS (High precision GPS)

El sistema de Posicionamiento Global de Alta Precisión (HPGPS) es una tecnología basada en sistemas GNSS (Global Navigation Satellite Systems) que permite determinar la ubicación espacial de equipos mineros con precisión centimétrica en tiempo real. Este sistema constituye una herramienta fundamental en operaciones mineras modernas, ya que mejora el control geométrico del minado y la exactitud en la ejecución de los diseños de explotación.

2.2.13.1 Fundamento De Los Sistemas GNSS

Los sistemas GNSS son redes de satélites que transmiten señales electromagnéticas hacia receptores en la superficie terrestre. Los principales sistemas utilizados son:

- GPS (Estados Unidos)
- GLONASS (Rusia)
- Galileo (Unión Europea)
- BeiDou (China)

Cada satélite transmite información sobre:

- Tiempo de emisión
- Posición orbital

El receptor GNSS calcula su posición mediante el principio de trilateración, que consiste en determinar la ubicación en función de la distancia a múltiples satélites.

2.2.13.2 Limitaciones Del GNSS Convencional

El GPS estándar presenta errores de 3 a 10 metros debido a:

- Retrasos atmosféricos
- Errores orbitales
- Multitrayectoria
- Ruido del receptor

Por ello surge el HPGPS.

2.2.13.3 Tecnología HPGPS Y Correcciones Diferenciales

El HPGPS mejora la precisión mediante técnicas como:

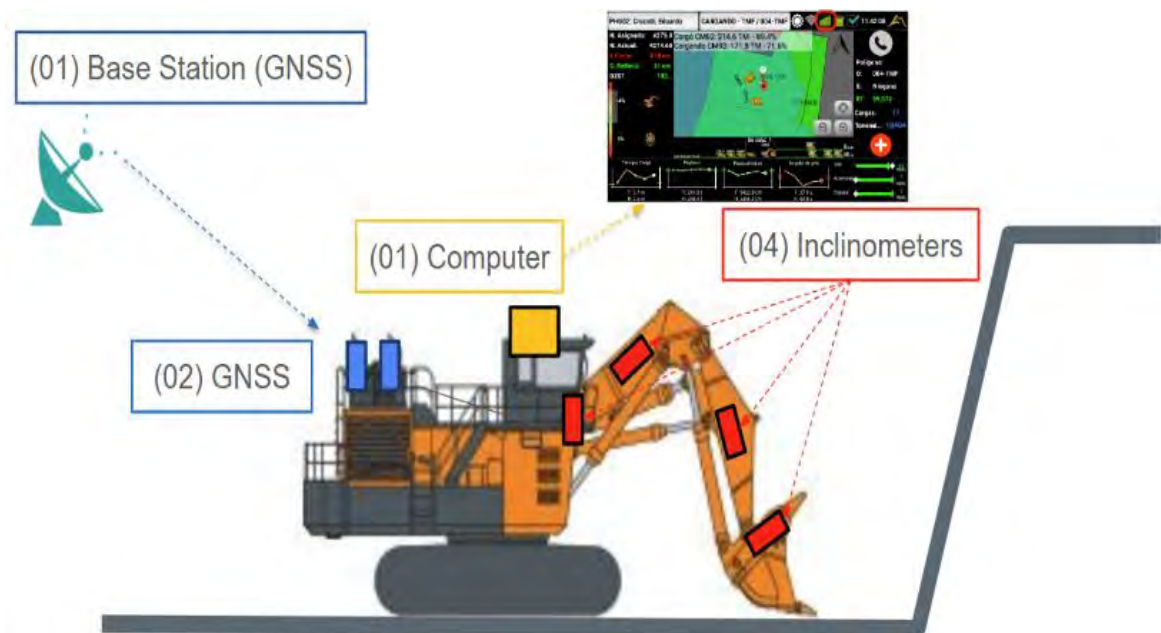
- RTK (Real-Time Kinematic):
 - Corrección en tiempo real
 - Uso de estación base
 - Precisión: 1–5 cm

En minería, el más usado es RTK.

2.2.13.4 Componentes Del Sistema HPGPS En Minería

- Antena GNSS: Recibe señales satelitales y presenta alta sensibilidad.
- Receptor GNSS: Procesa señales y calcula coordenadas.
- Estación base: Genera correcciones RTK.
- Sistema de comunicación: Transmisión de datos (radio o red).
- Unidad de control (software): Integra datos y visualiza posición en tiempo real.

Figura 2: Receptores y antenas HPGPS en pala – Mina Constancia.



Fuente: Elaboración propia.

2.2.13.5 Integración HPGPS Con Equipos Mineros

En equipos como palas:

- La antena GNSS se instala en la parte superior
- Sensores adicionales permiten calcular la posición del cucharón. El HPGPS no solo ubica el equipo, sino también el punto de excavación esto se logra mediante:
- Sensores de inclinación (inclinómetros): Miden ángulos de brazo y cucharón
- Sensores de longitud: Determinan extensión del brazo

2.2.14 Ore sorting (Shovelsense)

El sistema ShovelSense constituye una tecnología avanzada de clasificación de material en tiempo real aplicada en el frente de carguío, basada en la integración de sensores de fluorescencia de rayos X (XRF), sistemas de posicionamiento de alta precisión (HPGNSS) y plataformas digitales de procesamiento de datos. Su propósito es caracterizar geoquímicamente el material extraído a escala de balde, permitiendo una toma de decisiones operativa dinámica orientada a optimizar la selectividad del minado (Araya et al., 2021).

Desde un enfoque operativo, esta tecnología representa una transición desde esquemas tradicionales de clasificación basados en modelos de bloques hacia un enfoque de minería de alta resolución, donde la unidad mínima de decisión se reduce significativamente.

2.2.14.1 Fundamento Físico: Fluorescencia De Rayos X (XRF)

El principio de funcionamiento del sistema se basa en la interacción entre radiación electromagnética y la materia:

- Un emisor genera radiación de rayos X hacia el material fragmentado.
- Los átomos presentes en el material absorben esta energía, generando excitación electrónica.
- Al retornar a su estado basal, emiten radiación secundaria (fluorescencia).
- Esta radiación es capturada por detectores espectrales.

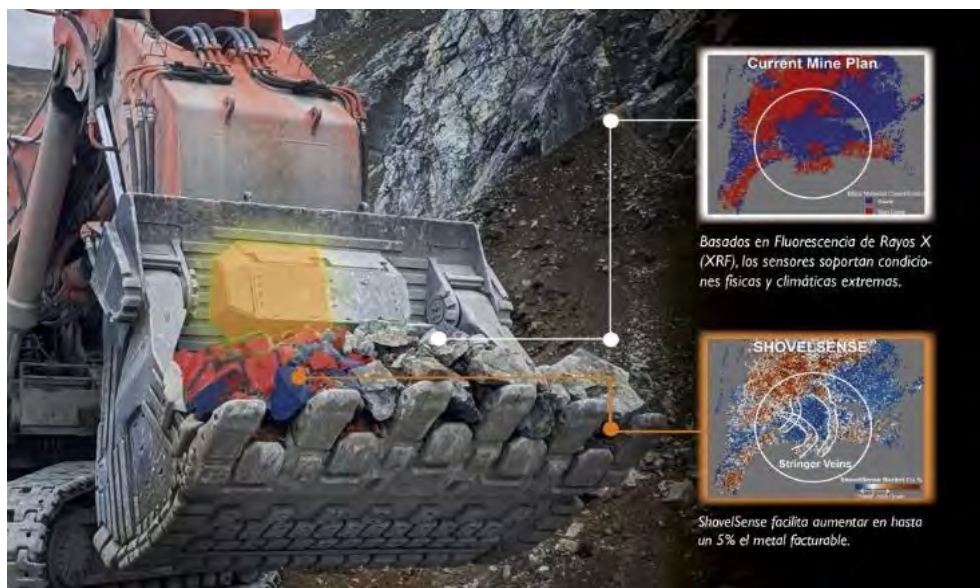
- El sistema interpreta el espectro energético para determinar la concentración de elementos.

Cada elemento químico presenta una firma espectral única, lo que permite cuantificar leyes de elementos como:

- Cu (cobre)
- As (arsénico)
- Bi (bismuto)
- Hg (mercurio)

Este proceso se ejecuta en milisegundos, permitiendo una medición continua durante el ciclo de carguío.

Figura 3: Funcionamiento del sistema ShovelSense



Fuente: MineSense Technologies Ltd.

2.2.14.2 Componentes del Sistema ShovelSense

El sistema ShovelSense está conformado por una arquitectura integrada:

- Módulos sensores XRF
 - Instalados en la parte superior del balde

- Pueden ser 2 o 3 unidades para redundancia
- Generan múltiples espectros por ciclo
- Sistema láser de activación
 - Detecta la presencia y flujo del material
 - Activa la adquisición de datos
- Unidad de procesamiento
 - Aplica modelos predictivos calibrados
 - Convierte espectros en estimaciones de ley
- Plataforma de datos
 - Almacenamiento en la nube
 - Integración con sistemas de gestión de flota

Uno de los principales aportes del sistema es la alta resolución espacial y temporal de los datos:

- ❖ Entre 140 y 210 lecturas por balde
- ❖ Captura continua durante el llenado
- ❖ Representatividad estadística del material

Esto permite caracterizar el material a una escala significativamente menor que la del modelo de bloques.

2.2.14.3 Toma de decisiones en tiempo real

El sistema se integra con plataformas de gestión de flota (FMS), permitiendo:

- ❖ Clasificación automática del material
- ❖ Asignación de destino del camión
- ❖ Optimización de rutas

Este proceso elimina la dependencia exclusiva del operador, reduciendo la variabilidad humana en la toma de decisiones.

2.2.14.4 Control de calidad del sistema

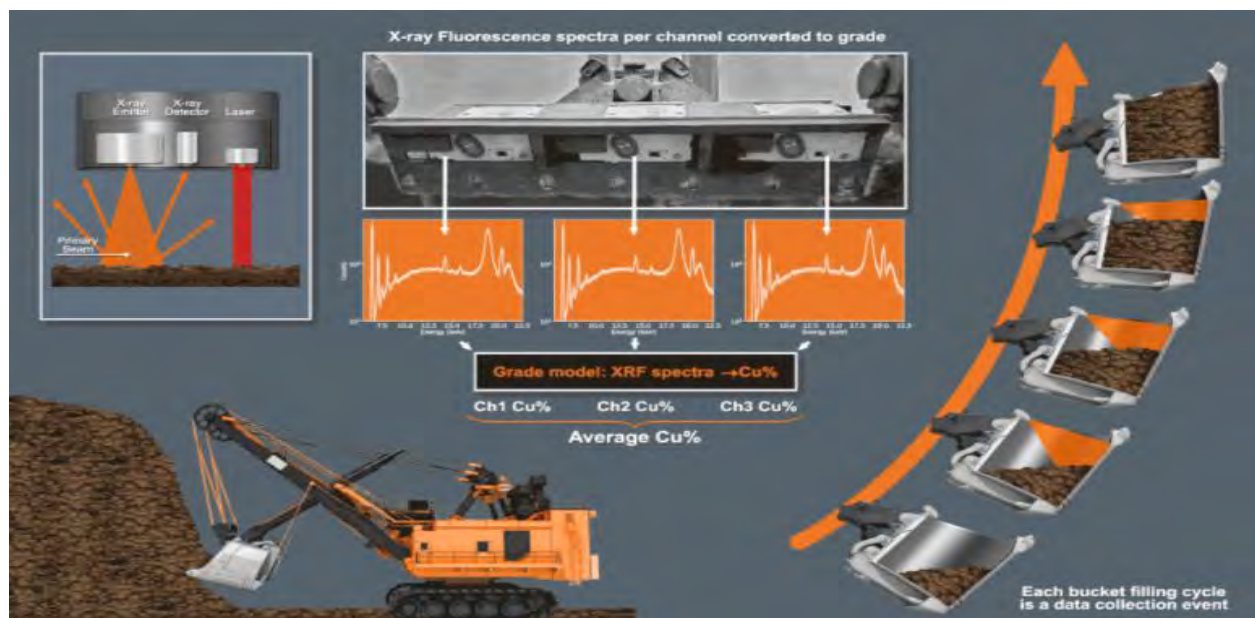
El desempeño del sistema es evaluado mediante indicadores estadísticos:

- Precisión: Capacidad de reproducir mediciones bajo condiciones constantes:
- Exactitud: Grado de cercanía respecto a valores reales:

Indicadores utilizados:

- ❖ MAPE (Error porcentual absoluto medio)
- ❖ MAE (Error absoluto medio)

Figura 4: Arquitectura y Flujo de Procesamiento Shovelsense



Fuente: MineSense Technologies Ltd.

2.2.15 Integración de sistemas

La integración de sistemas se define como el proceso mediante el cual diferentes tecnologías, plataformas y fuentes de información son interconectadas para operar de manera coordinada, permitiendo mejorar la eficiencia, la calidad de los datos y la toma de decisiones dentro de una organización. En entornos industriales complejos, como la minería, este enfoque resulta clave para reducir la fragmentación de la información y asegurar la consistencia operativa (Davenport & Harris, 2007).

En minería, la integración de sistemas responde a la necesidad de articular múltiples fuentes de datos que tradicionalmente operaban de forma aislada, tales como los modelos geológicos, los sistemas de posicionamiento, los sensores en campo y las plataformas de gestión operativa. Esta integración permite transformar datos dispersos en información útil, facilitando una visión más completa del proceso productivo y del comportamiento del yacimiento (Kusiak, 2018).

Desde un enfoque técnico, la integración de sistemas se sustenta en tres pilares fundamentales:

- Interoperabilidad de datos: capacidad de distintos sistemas para intercambiar información de manera consistente.
- Sincronización en tiempo real: disponibilidad inmediata de datos operativos para la toma de decisiones.
- Confiabilidad de la información: validación cruzada entre múltiples fuentes para reducir incertidumbre.

Estos elementos permiten que la operación minera evolucione hacia esquemas más inteligentes, donde la información no solo se recopila, sino que se utiliza activamente para optimizar el proceso.

2.2.15.1. Aportes de la integración en la operación minera

La implementación de sistemas integrados genera beneficios directos en distintos niveles del proceso minero:

- Mejora en la toma de decisiones: Permite ajustar estrategias operativas en función de datos actualizados y de mayor resolución.
- Optimización de la selectividad: Facilita una mejor diferenciación entre mineral y estéril, reduciendo errores de clasificación.

- Reducción de la incertidumbre geológica: La combinación de múltiples fuentes de información permite validar y complementar los datos del modelo geológico.
- Incremento de la eficiencia operativa: Se optimizan los ciclos de carguío, transporte y disposición del material.
- Continuidad operativa: La existencia de datos redundantes permite mantener la operación incluso ante fallas en alguna fuente de información.

2.2.15.2. Integración de datos y reducción de incertidumbre

Uno de los principales aportes de la integración de sistemas es la capacidad de manejar la incertidumbre, especialmente en yacimientos con alta variabilidad geológica. En estos escenarios, depender de una única fuente de información puede generar errores significativos en la clasificación del material.

En cambio, un sistema integrado permite:

- Contrastar información geológica con datos operativos
- Detectar inconsistencias en tiempo real
- Ajustar decisiones en función de la confiabilidad de los datos

Este enfoque de redundancia informacional mejora la estabilidad de los indicadores operativos, como la recuperación y la dilución (Quispe Condori, 2023).

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Depósito tipo Skarn

Los depósitos tipo Skarn son yacimientos minerales formados por metasomatismo de contacto entre intrusivos ígneos y rocas carbonatadas. Se caracterizan por una compleja variabilidad litológica con mineralización irregular, que incluye granates, piroxenos, wollastonita y sulfuros como calcopirita, bornita y molibdenita. Son fuente principal de cobre, zinc, plomo, oro, plata, molibdeno y wolframio. En Perú destacan Antamina y Las Bambas como ejemplos representativos de este tipo de depósito. La alta variabilidad litológica inherente

a los Skarn genera contactos minerales irregulares que dificultan la correcta segregación entre mineral y desmonte, incrementando el riesgo de dilución operativa y pérdida de mineral en el frente de carguío.

2.3.2 Polígono de minado

Unidad geométrica tridimensional que delimita los límites de extracción de un banco, definida a partir del modelo de bloques y el diseño de explotación. Establece las fronteras entre zonas mineralizadas y estériles en el frente de carguío. La precisión en el respeto de sus límites durante la excavación determina directamente el nivel de dilución operativa y la recuperación de mineral.

2.3.3 Zona de contacto mineral–desmonte

Área del frente de minado donde convergen zonas mineralizadas y zonas estériles. En depósitos tipo Skarn, estos contactos son irregulares y de alta variabilidad, lo que los convierte en las zonas de mayor riesgo de dilución no planificada y pérdida de mineral. El HPGPS y el Ore Sorting actúan de forma complementaria precisamente en estas zonas.

2.3.4 Lectura válida de ley

Resultado generado por el sistema ShovelSense durante un ciclo de carguío en el que el sensor XRF obtiene datos espectrales suficientes y representativos del material para estimar la ley de cobre. Cuando no se genera lectura válida —por condiciones del material, tiempo de ciclo insuficiente o falla del sensor— el sistema HPGPS asume la clasificación del material apoyándose en el modelo de bloques y los polígonos de minado.

2.3.5 Jerarquía de decisión

Protocolo operativo implementado en la plataforma R4M de la Unidad Minera Constancia que define el orden de prioridad de las fuentes de información para la clasificación del material. Cuando existe lectura válida del Ore Sorting, esta es la fuente primaria de decisión. Ante la ausencia de lectura, el sistema recurre al modelo de bloques mediante el HPGPS y

finalmente a las leyes del polígono de minado, garantizando la continuidad de la clasificación bajo cualquier escenario operativo.

2.3.6 Sistema FMS (Fleet Management System)

Plataforma de gestión de flotas que integra en tiempo real la información operativa de los equipos de carguío y acarreo, incluyendo posición, asignación de destino, trazabilidad del ciclo y registros de producción. En la Unidad Minera Constancia constituye la fuente principal de datos operativos utilizada en la presente investigación.

2.3.7 Plataforma R4M

Sistema de gestión operativa de Hudbay Minerals que integra las fuentes de información del Ore Sorting, el modelo de bloques y los polígonos de minado para generar sugerencias automatizadas de destino del material en tiempo real. Es la plataforma donde se ejecuta la jerarquía de decisión integrada.

2.3.8 Árbol de decisiones operativo

Esquema lógico implementado en la plataforma R4M que evalúa secuencialmente las condiciones del material en cada ciclo de carguío considerando la ley de cobre, tipo de material, zona operativa y presencia de óxidos, para determinar el destino óptimo del material hacia chancadora, stockpile o botadero.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada y cuantitativa.

Es aplicada porque busca ofrecer una solución práctica al problema operativo de la dilución del mineral y el incremento del factor de recuperación de mineral, mediante la integración de las tecnologías HPGPS y Ore Sorting (ShovelSense) en la Unidad Minera Constancia – Hudbay. Su finalidad es optimizar los procesos de extracción y clasificación del mineral, contribuyendo directamente al incremento de la eficiencia técnico-operacional.

Es cuantitativa porque se basa en la recolección, análisis e interpretación de datos numéricos, utilizando indicadores medibles como el factor de recuperación de mineral, la dilución operativa y la relación estéril/mineral. Los resultados se obtienen a partir de registros operativos reales generados por los sistemas tecnológicos implementados en la operación.

3.2 Nivel de investigación

El nivel de la investigación es descriptivo–explicativo.

Es descriptivo porque analiza y caracteriza las condiciones operativas y geológicas de la Unidad Minera Constancia, detallando el comportamiento de los indicadores de eficiencia durante el periodo de estudio en las Fases V y VI del tajo.

Es explicativo porque busca determinar las relaciones causales entre la integración de los sistemas HPGPS y Ore Sorting y los cambios observados en los indicadores operativos, estableciendo cómo esta integración influye directamente en la eficiencia técnico-operacional del proceso minero.

3.3 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es no experimental, transversal y correlacional–explicativo.

Es no experimental porque no se manipulan las variables de manera intencional, sino que se observan los efectos producidos por la integración de ambos sistemas en condiciones reales de operación.

Es transversal porque los datos se recopilan en un periodo determinado comprendido entre agosto de 2025 y enero de 2026, permitiendo analizar la situación operativa dentro de ese intervalo de tiempo.

Es correlacional–explicativo porque busca identificar el grado de relación existente entre las variables independientes (HPGPS y Ore Sorting) y la variable dependiente (eficiencia técnico-operacional), explicando cómo la combinación de ambas tecnologías contribuye a reducir la dilución, incrementar el factor de recuperación y optimizar el control del minado.

3.4 Población

La población del presente estudio está constituida por el total de registros operativos de carguío y clasificación de material generados en las Fases V y VI de la Unidad Minera Constancia – Hudbay, durante el periodo comprendido entre agosto de 2025 y enero de 2026.

Esta población incluye:

- Registros de ciclos de carguío (baldadas y camiones) almacenados en el sistema de gestión de flotas (FMS).

- Eventos de asignación de destino del material (mineral/desmonte) en el frente de carguío.
- Registros operativos asociados a la disponibilidad de lectura del sistema Ore Sorting (ShovelSense).
- Registros de posicionamiento y control espacial vinculados al sistema HPGPS.

La unidad de análisis corresponde a cada evento de carguío con decisión de clasificación del material, lo que permite evaluar el comportamiento operativo del proceso bajo diferentes condiciones de información disponible.

3.5 Muestra

La muestra se determinó mediante un muestreo no probabilístico por criterio técnico, seleccionando únicamente los registros que cumplen condiciones de consistencia operativa, disponibilidad de datos y aplicabilidad directa a los objetivos de la investigación.

La muestra total analizada comprende 93,750 ciclos de carguío correspondientes al periodo agosto 2025 – enero 2026-

La muestra está conformada por:

- Registros de carguío correspondientes a las Fases V y VI del tajo Constancia con implementación operativa de ambos sistemas.
- Eventos de clasificación que presentan lectura válida del Ore Sorting, y escenarios sin lectura de sensor donde la decisión operativa se apoya en el modelo de bloques mediante el HPGPS.
- Registros provenientes de equipos de carguío y acarreo integrados al sistema FMS, con trazabilidad completa del ciclo (carguío–acarreo–destino).

Se excluyen registros con:

- Datos incompletos o inconsistentes.
- Falta de trazabilidad entre carguío y destino.

La selección de esta muestra se justifica en la necesidad de analizar situaciones reales de operación donde exista interacción entre ambas fuentes de información sensorial y geológica, garantizando la confiabilidad de los resultados y su relación directa con los objetivos de la investigación.

3.6 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

3.6.1 Técnica de recolección de datos

Las principales técnicas utilizadas en la presente investigación son:

- **Técnica documental:** Recopilación y revisión de registros operativos históricos del sistema FMS correspondientes a los 93,750 ciclos de carguío ejecutados en las Fases V y VI del tajo Constancia durante el periodo agosto 2025 – enero 2026, incluyendo la fuente de decisión utilizada, ley Cu ShovelSense, ley Cu Block, ley Cu Poly, clasificación del material y destino final asignado.
- **Técnica de observación:** Registro y seguimiento del comportamiento operativo del sistema HPGPS como mecanismo de respaldo en los ciclos donde el Ore Sorting no generó lectura válida de ley, evaluando la correspondencia entre la clasificación ejecutada y el destino final del material aplicando una ley de corte de Cu como umbral operativo.

3.6.2 Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos utilizados corresponden a herramientas digitales y registros operativos de la mina:

- **Ficha documental:** Registro estructurado en Microsoft Excel que consolidó para cada ciclo de carguío las variables operativas extraídas del sistema FMS y la plataforma R4M, conformando la base de datos de 93,750 registros analizados en la investigación.
- **Guía de observación:** Protocolo de evaluación aplicado sobre los registros del sistema HPGPS para verificar la coherencia entre la ley de bloque asignada y el destino final

del material en los ciclos clasificados mediante dicho sistema como mecanismo de respaldo.

3.6.3 Técnica de procesamiento de datos

La información recolectada fue procesada mediante herramientas de análisis operativo orientadas a evaluar el desempeño del proceso de clasificación del material. Se emplearon las siguientes herramientas:

- **Microsoft Excel:** Para depuración de datos, estructuración de bases y cálculo de indicadores operativos:
 - Factor de recuperación (FR)
 - Dilución (D)
 - Relación estéril/mineral (SR)
- **MinePlan:** Para la validación espacial de los bloques minados y verificación de la correspondencia entre los puntos de carguío registrados por el HPGPS y los límites de los polígonos de minado en las Fases V y VI.
- **Power BI:** Para la visualización de resultados y análisis comparativo entre ciclos con lectura válida del Ore Sorting y ciclos clasificados mediante el HPGPS.

3.7 Integración tecnológica del sistema HPGPS y Ore Sorting

3.7.1 Descripción técnica de los sistemas

En la Unidad Minera Constancia, la implementación de tecnologías de control en el frente de carguío se desarrolló con el objetivo de mejorar la precisión en la clasificación del material y reducir la incertidumbre. Para ello, se utilizaron de manera operativa los sistemas HPGPS y Ore Sorting (ShovelSense), integrados dentro de la plataforma de gestión R4M y vinculados al sistema de despacho FMS.

A diferencia de enfoques convencionales donde la clasificación depende de polígonos o criterios visuales, en esta operación se trabajó con un esquema basado en la disponibilidad

de información en tiempo real, combinando datos geológicos y sensoriales durante el proceso de carguío.

3.7.2 Sistema Ore Sorting (Shovelsense)

3.7.2.1 Implementación en la unidad minera constancia

En la Unidad Minera Constanca, el sistema ShovelSense fue implementado como parte de la estrategia de mejora en la selectividad del material en el frente de carguío, con el objetivo de reducir la dilución y recuperar mineral.

El sistema se encuentra instalado en 3 equipos de carguío, permitiendo generar estimaciones de ley en tiempo real durante cada ciclo de excavación. Esta información es utilizada directamente en la operación para definir el destino del material (chancadora o botadero), integrándose con el sistema de despacho mediante la plataforma R4M.

A nivel operativo, el sistema trabaja bajo condiciones reales de mina, donde la variabilidad geológica, los tiempos de ciclo y la disponibilidad del equipo influyen directamente en la calidad de la información generada.

Figura 5: Sistema ShovelSense en equipo de carguío – Mina Constanca.



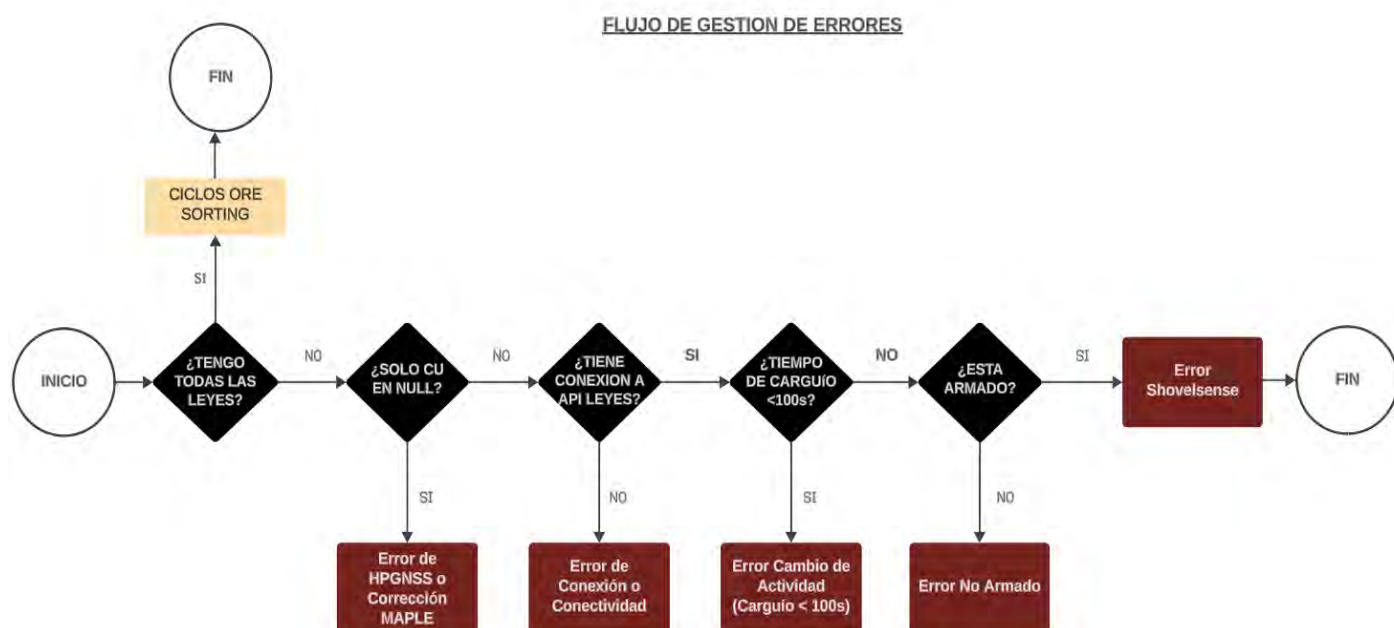
Fuente: Hudbay Minerals

3.7.3 Lógica operativa de clasificación en Constancia

El sistema ShovelSense no opera de manera independiente, sino bajo una lógica de decisión estructurada que considera distintos escenarios según la disponibilidad de datos, asegurando la continuidad de la clasificación del material incluso cuando el sistema no genera lectura de ley. Los escenarios considerados son:

- Ciclos con lectura válida de ley (uso directo de ShovelSense)
- Validación con polígonos de minado
- Condiciones operativas del equipo

Gráfico 2: Lógica operativa de clasificación del material Ore Sorting



Fuente: Hudbay Minerals

3.7.4 Árbol de decisiones para la clasificación del material

El árbol de decisiones corresponde a una lógica operativa implementada en la Unidad Minera Constancia para la asignación del destino del material en tiempo real, basada en la

integración de datos provenientes del sistema Ore Sorting (ShovelSense) y el sistema de gestión de despacho, ejecutada a través de la plataforma R4M.

Este esquema se activa cuando el sistema ShovelSense genera una lectura de ley durante el ciclo de carguío. A partir de esta información, el sistema evalúa automáticamente una serie de condiciones predefinidas como ley de cobre (Cu%), tipo de material (ORE/WASTE), zona operativa y presencia de óxidos con el fin de determinar el destino óptimo del material.

La lógica del árbol de decisiones permite:

- Comparar la ley obtenida en tiempo real con los umbrales operativos definidos (cut-off).
- Validar la coherencia entre la clasificación.
- Asignar un destino operativo (chancadora, stockpile o botadero).

Estas alertas son enviadas y visualizadas en la plataforma R4M, permitiendo que el operador de despacho tome decisiones inmediatas sobre el enrutamiento de los camiones.

Tabla 2: Árbol de decisiones basado en la clasificación por Ore Sorting.

Regla	Zona	Poligono	Cu	RZn	RPb	Ox	Destino	Sugerencia
1	CS	ORE	>= CUT-OFF			<= 40%	STOCK CS / CRUSHER	Con sugerencia (sin alerta)
2	CS	ORE	>= CUT-OFF			> 40%	WRF	Con sugerencia (con alerta)
3	CS	ORE	< CUT-OFF				WRF	Con sugerencia (con alerta)
4	CS	WASTE	>= CUT-OFF			<= 40%	STOCK CS / CRUSHER	Con sugerencia (con alerta)
5	CS	WASTE	>= CUT-OFF			> 40%	WRF	Con sugerencia (sin alerta)
6	CS	WASTE	< CUT-OFF				WRF	Con sugerencia (sin alerta)
7	PC	ORE	>= CUT-OFF			<= 40%	STOCK PC / CRUSHER	Con sugerencia (sin alerta)
8	PC	ORE	>= CUT-OFF			> 40%	WRF	Con sugerencia (con alerta)
9	PC	ORE	< CUT-OFF				WRF	Con sugerencia (con alerta)
10	PC	WASTE	>= CUT-OFF			<= 40%	STOCK PC / CRUSHER	Con sugerencia (con alerta)
11	PC	WASTE	>= CUT-OFF			> 40%	WRF	Con sugerencia (sin alerta)
12	PC	WASTE	< CUT-OFF				WRF	Con sugerencia (sin alerta)

Nota: Matriz de decisiones para clasificación de material – Hudbay Minerals.

3.7.5 Comportamiento del sistema

El desempeño del sistema fue evaluado a partir de reportes operativos generados en distintos periodos, donde se analizaron variables como:

- Disponibilidad de lectura de leyes
- Continuidad operativa
- Frecuencia de ciclos sin información
- Condiciones de carguío

Tabla 3: Reportabilidad operativa del sistema ShovelSense.

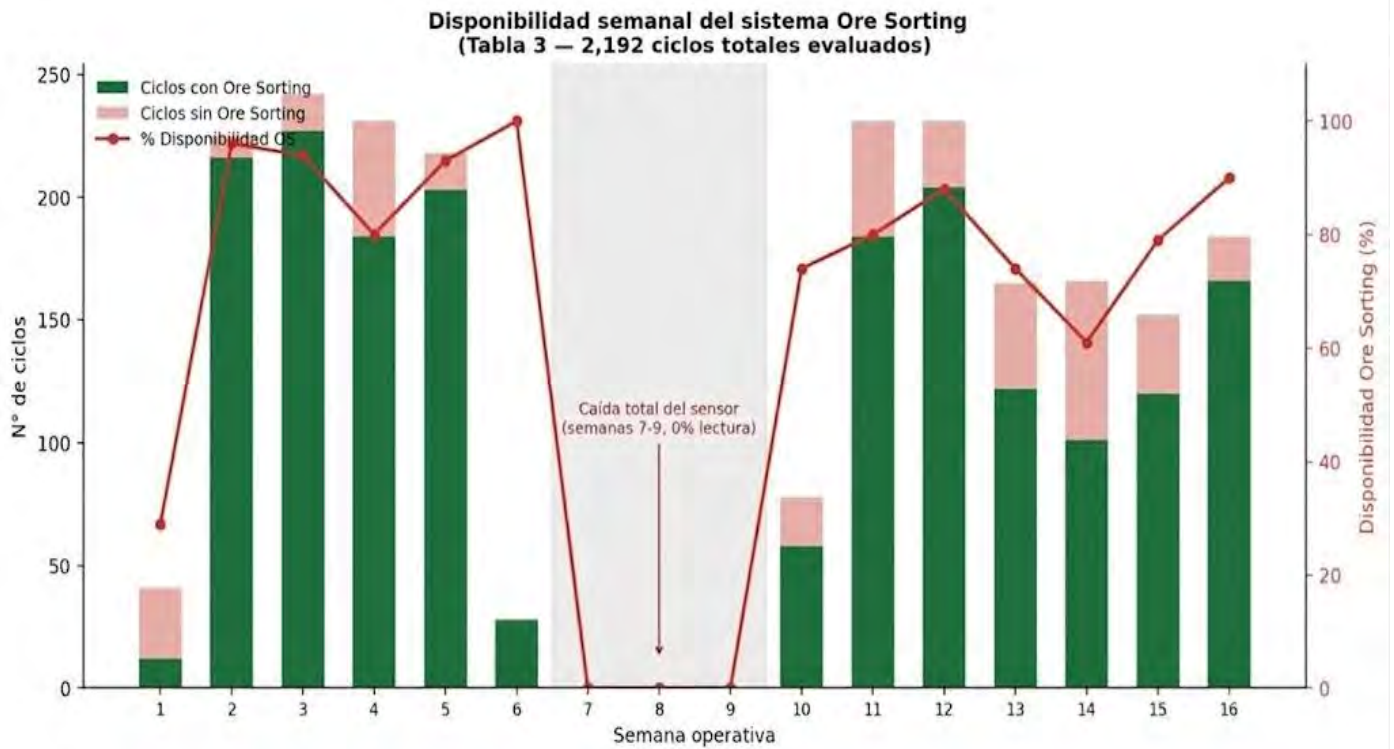
SUMMARY ORE SORTING																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	TOTAL
TOTAL CYCLES	41	225	242	231	218	28				78	231	231	165	166	152	184	2,192
Ore Sorting	12	216	227	184	203	28	0	0	0	58	184	204	122	101	120	166	1,825
No Ore Sorting	29	9	15	47	15	0	0	0	0	20	47	27	43	65	32	18	367
Ore Sorting (%)	29%	96%	94%	80%	93%	100%	0%	0%	0%	74%	80%	88%	74%	61%	79%	90%	83%

ORE SORTING DETAILS																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	TOTAL
TOTAL ORE SORTING CYCLES	12	216	227	184	203	28	0	0	0	58	184	204	122	101	120	166	1,825
1. Ore in Ore										3	58	165	36				262
CO - Stock OS F2																	
PA - Stock OS F4											21	125	22				168
Crusher										2	19	16					37
Stocks										1	18	24	14				57
2. Ore in Waste										2	30	13	10		1		56
CO - Stock OS F1																	
PA - Stock OS F3											14	13	5				32
WRF/Others										2	16	5			1		24
3. Waste in Waste	12	216	227	184	203	28				53	93	25	74	101	119	166	1,501
All Dumps	12	216	227	184	203	28				53	93	25	74	101	119	166	1,501
4. Waste in Ore											3	1	2				6
WRF OS F5																	
Sent to WRF											1						1
Sent to Crusher / Stocks											2	1	2				5
Sent to Others																	
5. Logical Upgrade																	
Dump Final Botadero (OS STOCK F3)																	
Dump Final OS STOCK F5 (STOCK 40)																	
Sent to WRF-OS-F5																	
Sent to WRF / Others																	
TOTAL ORE SORTING TONNES (t)											8,529	34,603	6,636				49,768
PA - Stock OS F3 (Ore in Waste) (t)											3,317	3,554	1,186				8,058
PA - Stock OS F4 (Ore in Ore) (t)											5,211	31,049	5,450				41,710
WRF OS F5 (t)																	

Nota: Resumen de ciclos de clasificación y disponibilidad de lectura del sistema ShovelSense – Mina Constanca.

Con el fin de visualizar la evolución temporal de la disponibilidad del sistema, se representó gráficamente el comportamiento semanal de los ciclos con y sin lectura de Ore Sorting a lo largo del periodo evaluado.

Gráfico 3: Disponibilidad semanal del sistema Ore Sorting

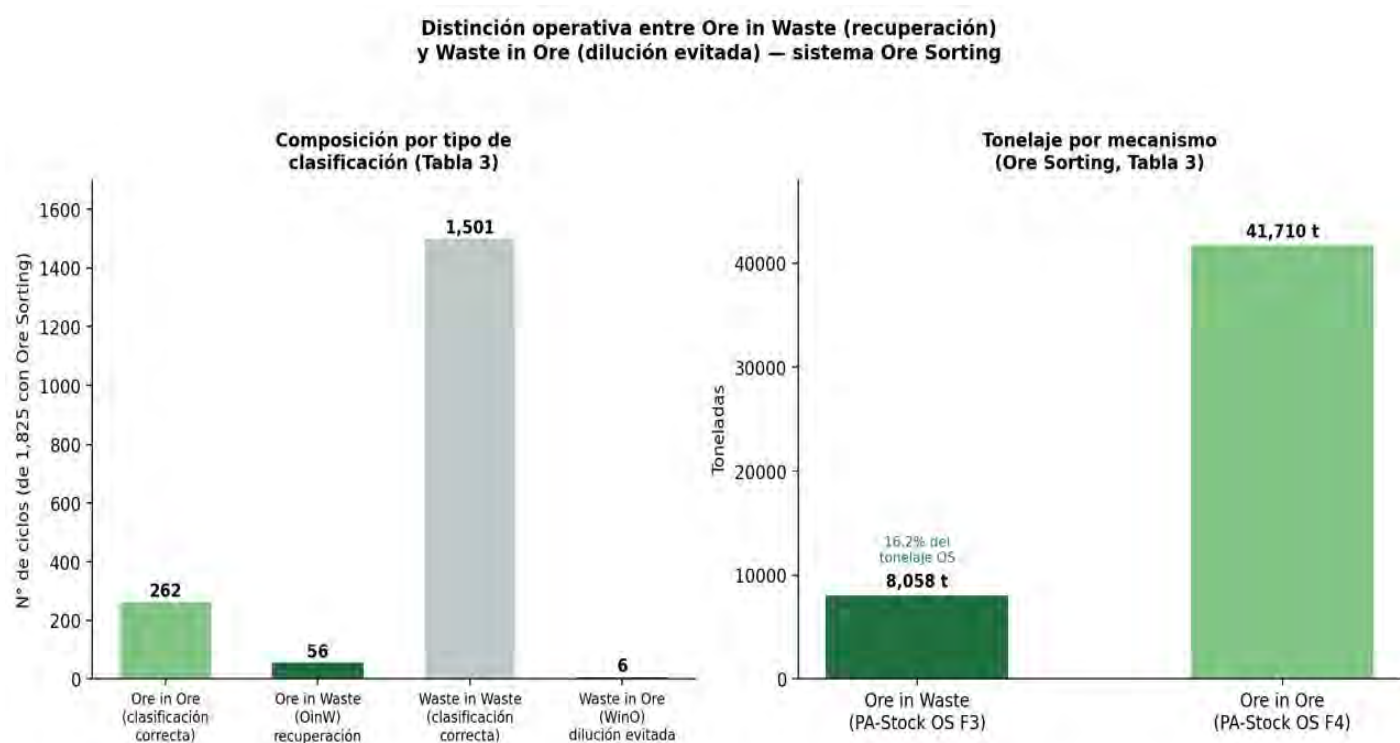


Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el Gráfico 4, la disponibilidad del sistema presentó una caída total durante tres semanas consecutivas (semanas 7 a 9), en las que no se registró ninguna lectura de Ore Sorting. Este hallazgo evidencia la relevancia del HPGPS como mecanismo de respaldo ante interrupciones prolongadas del sensor, más allá de su función complementaria en condiciones normales de operación.

Asimismo, se analizó la composición interna de los 1,825 ciclos con lectura de Ore Sorting, diferenciando dos mecanismos operativos que, pese a compartir la misma fuente de datos, cumplen funciones distintas: la recuperación de mineral en zonas de desmonte (Ore in Waste) y la prevención de dilución al identificar desmonte dentro de zonas de mineral (Waste in Ore).

Gráfico 4: Distinción operativa entre OIW y WIO mediante el sistema Ore Sorting

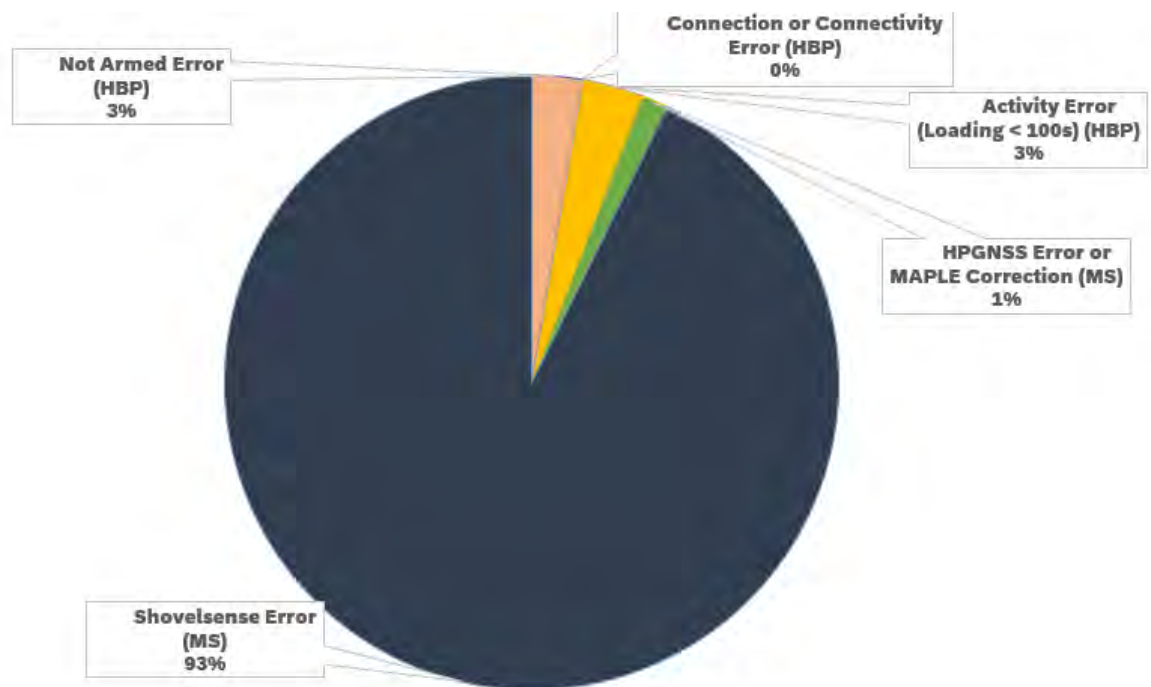


Fuente: Elaboración propia

El Gráfico 4 evidencia que, del total de ciclos con lectura Ore Sorting, 56 registros correspondieron a mecanismos de recuperación de mineral (Ore in Waste), equivalentes a 8,058 toneladas reincorporadas al proceso, mientras que 6 registros correspondieron a la prevención de dilución (Waste in Ore). La diferencia en magnitud entre ambos mecanismos confirma que, durante el periodo evaluado, el aporte predominante del sistema estuvo orientado a la recuperación de mineral antes clasificado erróneamente como desmonte.

Adicionalmente, se realizó un seguimiento de la gestión de errores del sistema, identificando las principales causas de pérdida de lectura.

Gráfico 5: Causas de error del sistema ShovelSense.



Fuente: Elaboración propia

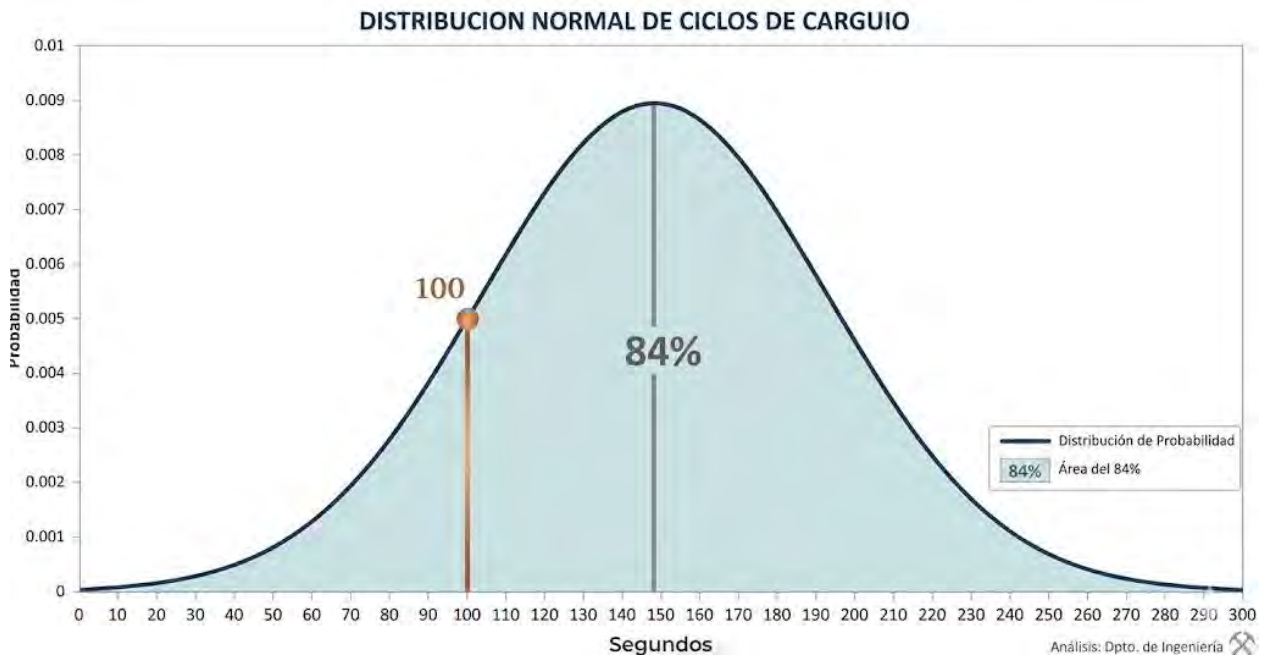
Este análisis permitió establecer que la operación no depende únicamente de la disponibilidad del sensor, sino de la capacidad de adaptación del proceso frente a escenarios de incertidumbre, donde el HPGPS actúa como mecanismo de respaldo.

3.7.6 Influencia del ciclo de carguío en la generación de datos

Uno de los factores operativos más relevantes en el desempeño del sistema es el tiempo de carguío.

En la operación Constancia se determinó que: La mayoría de los ciclos presentan tiempos superiores a 100 segundos, lo que favorece la generación de lecturas representativas del material.

Gráfico 6: Distribución del tiempo de ciclo de carguío.



Fuente: Elaboración propia

El 84% de la información analizada, es igual o superior a 100 segundos de ciclo de carguío.

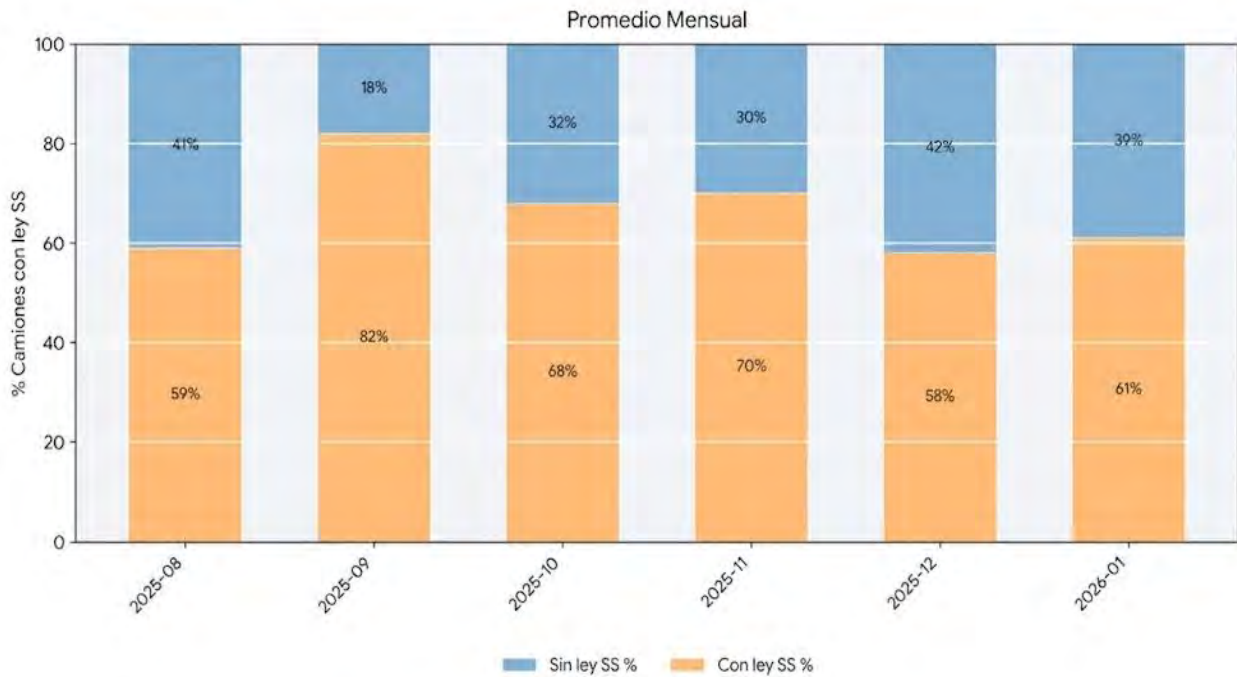
- Mayor tiempo → más lecturas → mejor estimación
- Menor tiempo → mayor incertidumbre en la ley

Esto demuestra que el sistema no solo depende de la tecnología, sino también del comportamiento operativo del equipo.

3.7.7 Gestión operativa de ciclos sin ley

Uno de los aspectos críticos observados en la operación es la existencia de ciclos donde el sistema no genera lectura de ley.

Gráfico 7: Desempeño mensual del sistema ShovelSense.



Fuente: Elaboración propia

Para estos casos, se implementó una lógica de respaldo que considera:

- Uso de información del modelo de bloques
- Validación con posición del equipo (HPGPS)
- Aplicación de criterios operativos definidos

3.7.8 Síntesis operativa del sistema en Constanica

El sistema Ore Sorting permitió mejorar la identificación del material mineralizado en tiempo real; sin embargo, su desempeño se vio condicionado por la heterogeneidad del yacimiento tipo Skarn, generando la necesidad de complementarlo con el HPGPS para garantizar la continuidad en la clasificación del material.

Tabla 4: Características operativas del sistema ShovelSense

Característica	Descripción
Tipo de tecnología	Sensorización en tiempo real
Función principal	Estimación de ley de cobre
Ubicación	Cucharón de la pala
Fuente de datos	Lectura sensorial (XRF u otros)
Limitación	Sensible a variabilidad geológica

Nota: Componentes y alcances operativos del sistema ShovelSense – Mina Constancia.

El sistema ShovelSense en la Unidad Minera Constancia:

- Permite clasificar material en tiempo real a escala de balde.
- Mejora la identificación de mineral en zonas de alta variabilidad.
- Depende de condiciones operativas (tiempo, material, disponibilidad).
- Requiere integración con otros sistemas (HPGPS) para asegurar continuidad.

3.8 Sistema de minado de alta precisión por bloques (HPGPS)

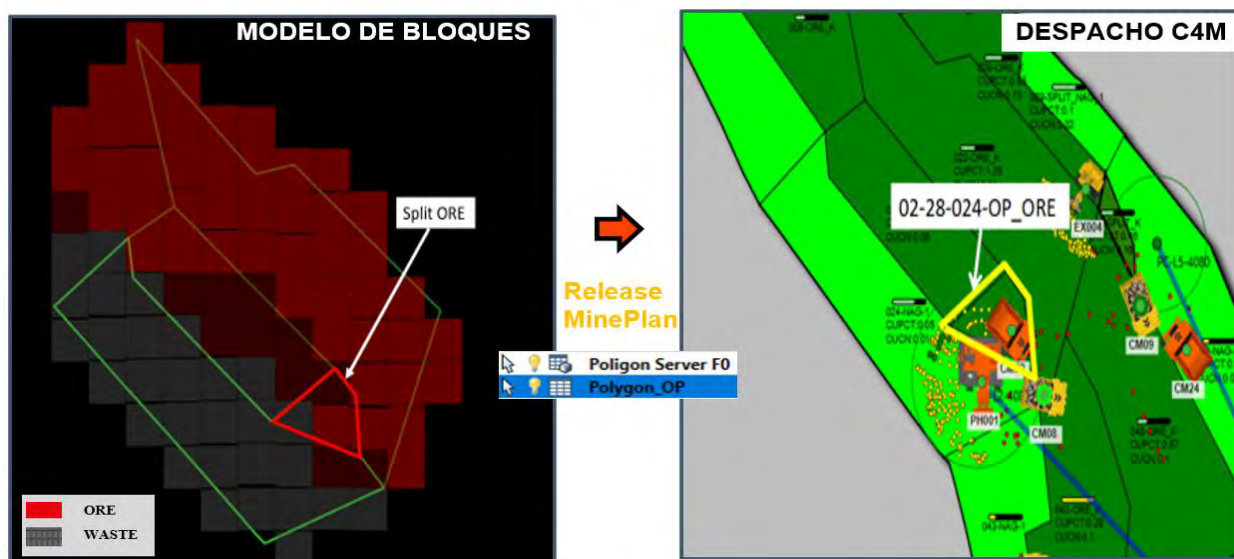
3.8.1 Aplicación del sistema en Constancia

En la Unidad Minera Constancia, el sistema HPGPS no solo fue utilizado como herramienta de posicionamiento, sino como un mecanismo de control operativo para la identificación y análisis de desviaciones en la clasificación del material durante el proceso de carguío.

Su aplicación permitió evaluar la coherencia entre:

- La ubicación real del punto de extracción
- La asignación de polígonos de minado
- El comportamiento del material en campo

Figura 6: Zonas de análisis para evaluación del sistema HPGPS



Fuente: Área de Geología Mina – Hudbay Minerals.

3.8.2 Tipos de desviaciones en la clasificación

A partir del análisis de campo, se tiene dos tipos principales de desviaciones:

- Mineral en zonas clasificadas como desmonte (Ore in Waste): Material mineralizado que, debido a la dinámica del minado, es asignado a polígonos de desmonte.
- Desmonte en zonas clasificadas como mineral (Waste in Ore): Material estéril que es cargado dentro de zonas definidas como mineral.

Estas desviaciones fueron analizadas mediante la comparación entre:

- Ubicación espacial del carguío (HPGPS)
- Clasificación operativa
- Resultados de muestreo

3.8.3 Validación de la precisión del sistema HPGPS

La validación del sistema de Minado de Alta Precisión por Bloques (HPGPS) se desarrolló bajo condiciones reales de operación, con el objetivo de evaluar la correspondencia entre la ubicación espacial del material cargado y su caracterización geológica en términos de tonelaje y ley de cobre (Cu).

A diferencia de enfoques teóricos o controlados, esta validación se ejecutó sin intervención directa sobre la operación, permitiendo analizar el desempeño del sistema en escenarios reales de producción, considerando la variabilidad operativa y geológica del yacimiento.

El proceso de validación se estructuró en función de la integración de información topográfica, geológica y operativa, considerando los siguientes componentes:

- Se utilizaron levantamientos topográficos diarios para la generación de sólidos minados, los cuales representan la geometría real del material extraído en cada jornada.
- Se importaron los puntos registrados por el sistema HPGPS (Control Sense), correspondientes a la posición del cucharón durante el proceso de carguío, permitiendo su correlación espacial con los sólidos generados.
- Se empleó el modelo geológico de corto plazo como base de referencia para la clasificación del material (mineral/desmante).
- Se realizó la comparación entre los datos operativos del sistema (Control Sense) y las reservas estimadas de corto plazo, evaluando:
 - Tonelaje total
 - Ley promedio de cobre (Cu%)
 - Se consideró que el levantamiento topográfico presenta un offset inherente, lo cual introduce una desviación sistemática que debe ser contemplada en el análisis de precisión.
 - No se proporcionaron instrucciones adicionales a los operadores de pala, con el fin de asegurar que la validación represente condiciones operativas reales, sin sesgos inducidos por control experimental.

3.8.4 Enfoque de análisis de desviaciones

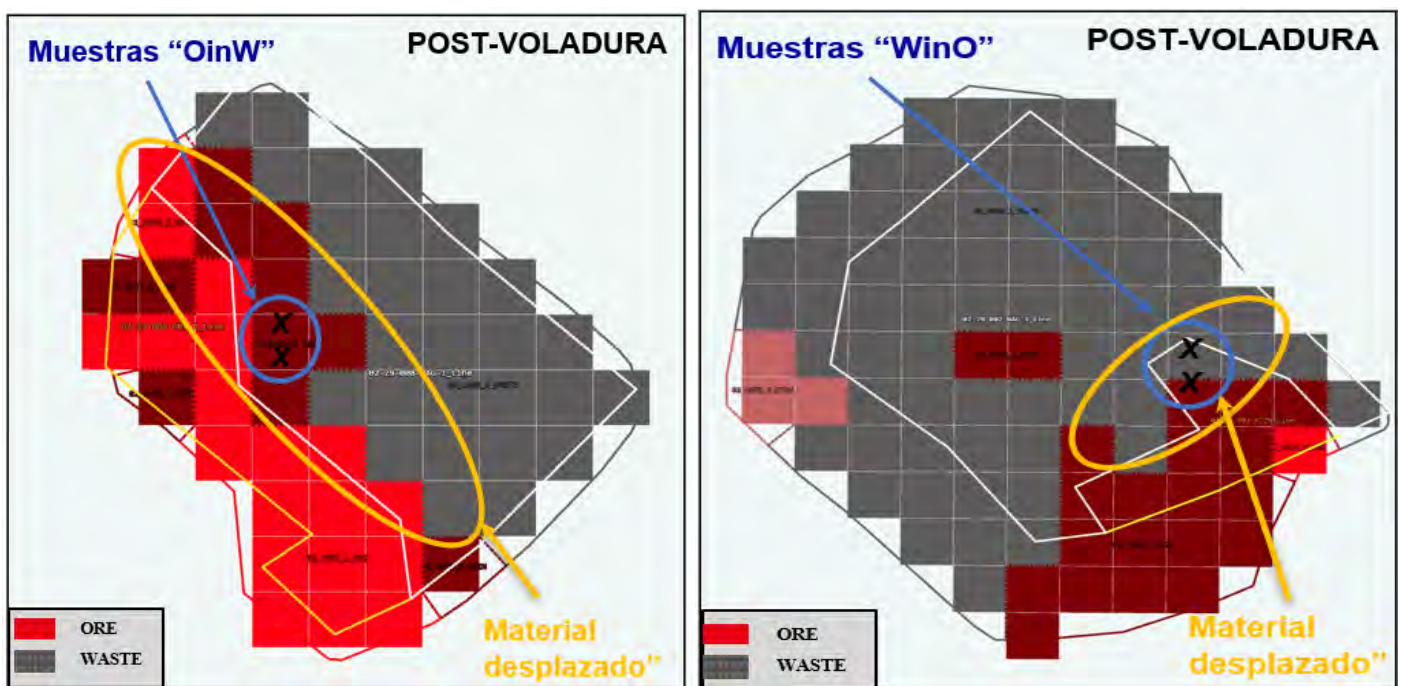
El análisis se centró en identificar y cuantificar discrepancias entre la clasificación espacial del sistema y el comportamiento real del material, bajo dos escenarios principales:

- Mineral en desmonte (Ore in Waste): material con contenido económico que es asignado a polígonos de desmonte debido a imprecisiones en el control espacial o variabilidad geológica.
- Desmonte en mineral (Waste in Ore): material estéril incorporado en zonas clasificadas como mineral, generando dilución.

Estas desviaciones fueron evaluadas mediante la integración de:

- Posición del cucharón (HPGPS)
- Sólidos topográficos reales
- Modelo de bloques de corto plazo
- Resultados de ley y tonelaje

Figura 7: Casos de validación en la clasificación del material: Ore in Waste y Waste in Ore.



Fuente: Área de Geología Mina – Hudbay

3.8.5 Resultados de validación

3.8.5.1. Prueba 01: Pala PH03, Fase VI, Banco 4230

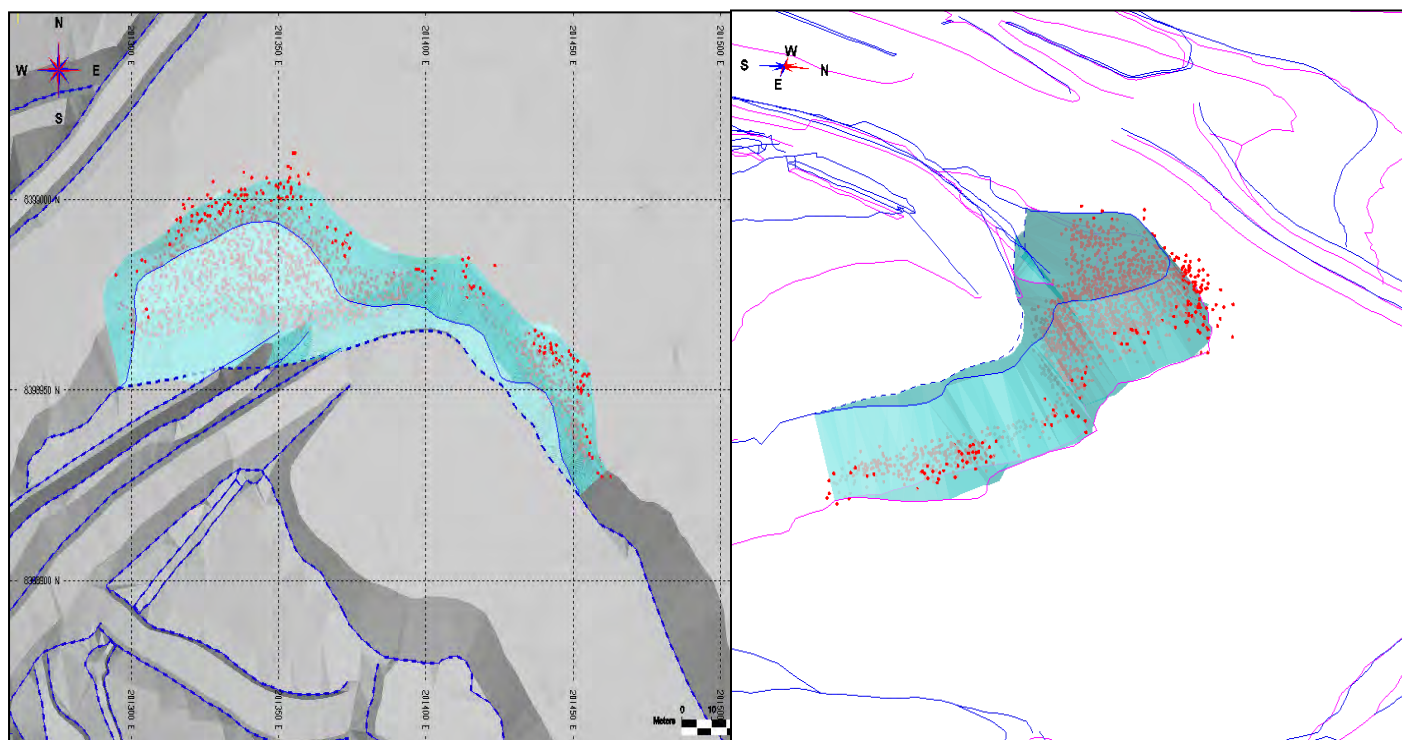
Se realizó la validación en condiciones operativas en el frente de minado correspondiente a la Fase VI, banco 4230, utilizando registros del sistema HPGPS y datos topográficos

La validación muestra la distribución espacial de los puntos de carguío registrados por el sistema HPGPS, superpuestos sobre el sólido generado a partir del levantamiento topográfico.

Se identifican claramente:

- Zonas de inicio y término de minado (cresta inicial y final)
- Concentración de puntos de alta precisión dentro del sólido minado
- Alineamiento general entre la geometría del sólido y los puntos registrados

Figura 8: Validación espacial de puntos HPGPS – Pala PH03, Fase VI, Banco 4230.



Fuente: Elaboración propia – Mina Constancia, Hudbay Minerals.

Interpretación técnica de la prueba

La validación muestra la distribución espacial de los puntos de carguío registrados por el sistema HPGPS, superpuestos sobre el sólido generado a partir del levantamiento topográfico.

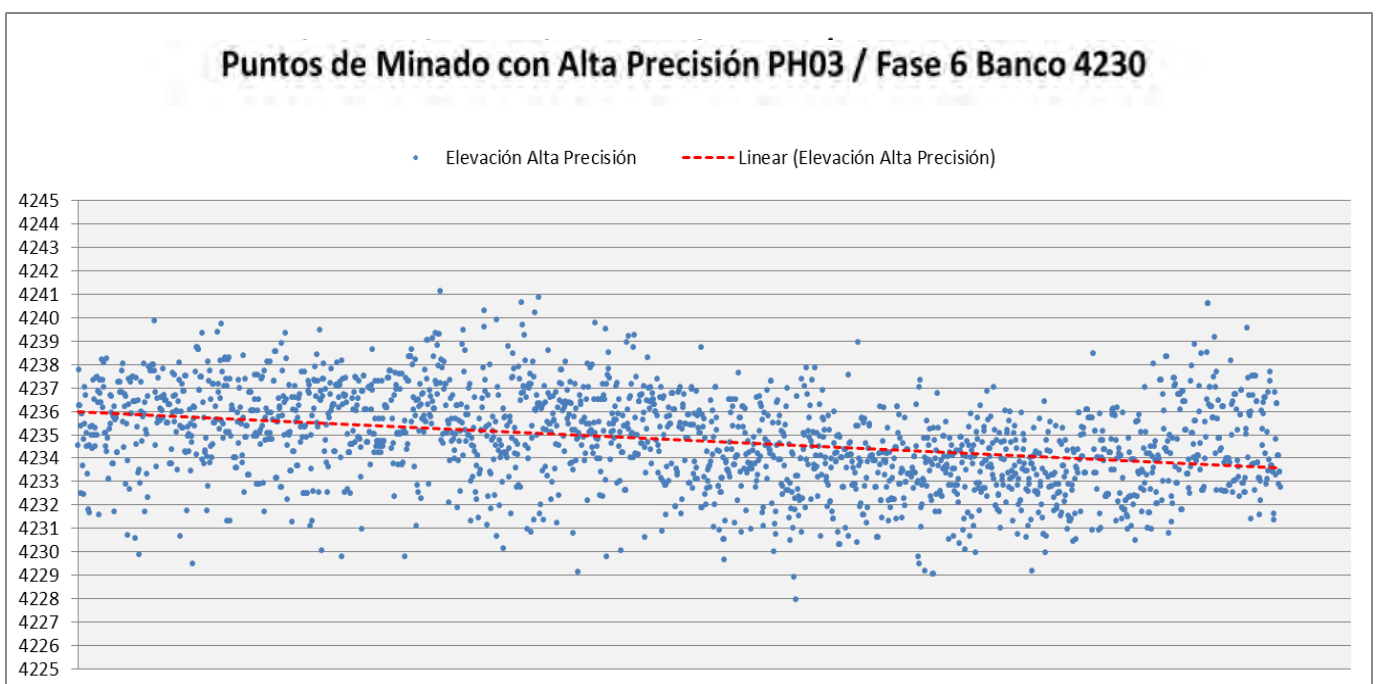
Se identifican claramente:

- Zonas de inicio y término de minado (cresta inicial y final)
- Concentración de puntos de alta precisión dentro del sólido minado
- Alineamiento general entre la geometría del sólido y los puntos registrados

El análisis gráfico evidencia que el sistema mantiene una adecuada coherencia espacial, aunque se observan dispersiones atribuibles a:

- Offset del registro de datos
- Variabilidad en la posición real del cucharón
- Dinámica propia del proceso de carguío

Gráfico 8: Dispersión de elevaciones HPGPS vs elevación de referencia – PH03



Fuente: Elaboración propia – Datos SistemaControl Sense.

Análisis de precisión vertical

El gráfico de dispersión muestra la relación entre:

- Elevación registrada por HPGPS
- Elevación de referencia (alta precisión)

Se observa una tendencia alineada, con dispersión moderada, lo cual indica:

- Buen ajuste del sistema en términos de precisión vertical
- Existencia de variabilidad controlada dentro de rangos operativos aceptables

Tabla 5: Comparación de tonelaje y ley – Control Sense vs reservas de corto plazo.

PH03	Toneladas	Cu %
Control Sense	85,810	0.03
Solid Reserve	84,254	0.04
Δ	-1.8%	5%

Nota: Análisis comparativo de precisión entre Control Sense y Solid Reserve para el bloque PH03

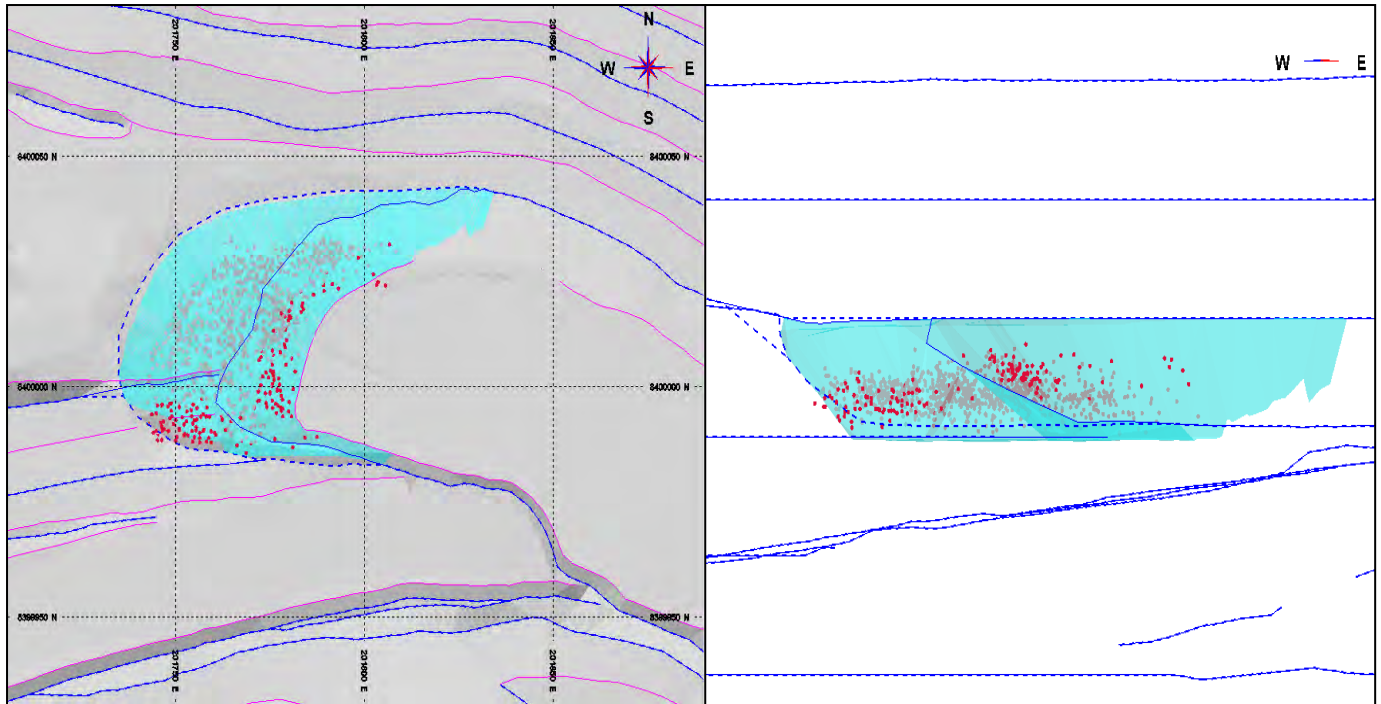
- La variación en tonelaje (-1.8%) indica una alta consistencia entre el material registrado por el sistema HPGPS y el modelo de reservas.
- La ley de cobre presenta una correlación adecuada, evidenciando que la asignación espacial del material es coherente con su caracterización geológica.
- Las diferencias observadas se encuentran dentro de rangos aceptables para operaciones a cielo abierto.

3.8.5.2. Prueba 02 – Pala PH01, Fase V, Banco 4335

La validación correspondiente a la Pala PH01 fue realizada en la Fase V, banco 4335, bajo condiciones operativas normales. El objetivo fue evaluar la correspondencia entre los

puntos de carguío registrados por el sistema HPGPS (Control Sense) y el sólido generado a partir del levantamiento topográfico, así como su consistencia con el modelo de corto plazo.

Figura 9: Validación espacial de puntos HPGPS – Pala PH01, Fase V, Banco 4335.



Fuente: Elaboración propia – Unidad Minera Constancia (Hudbay)

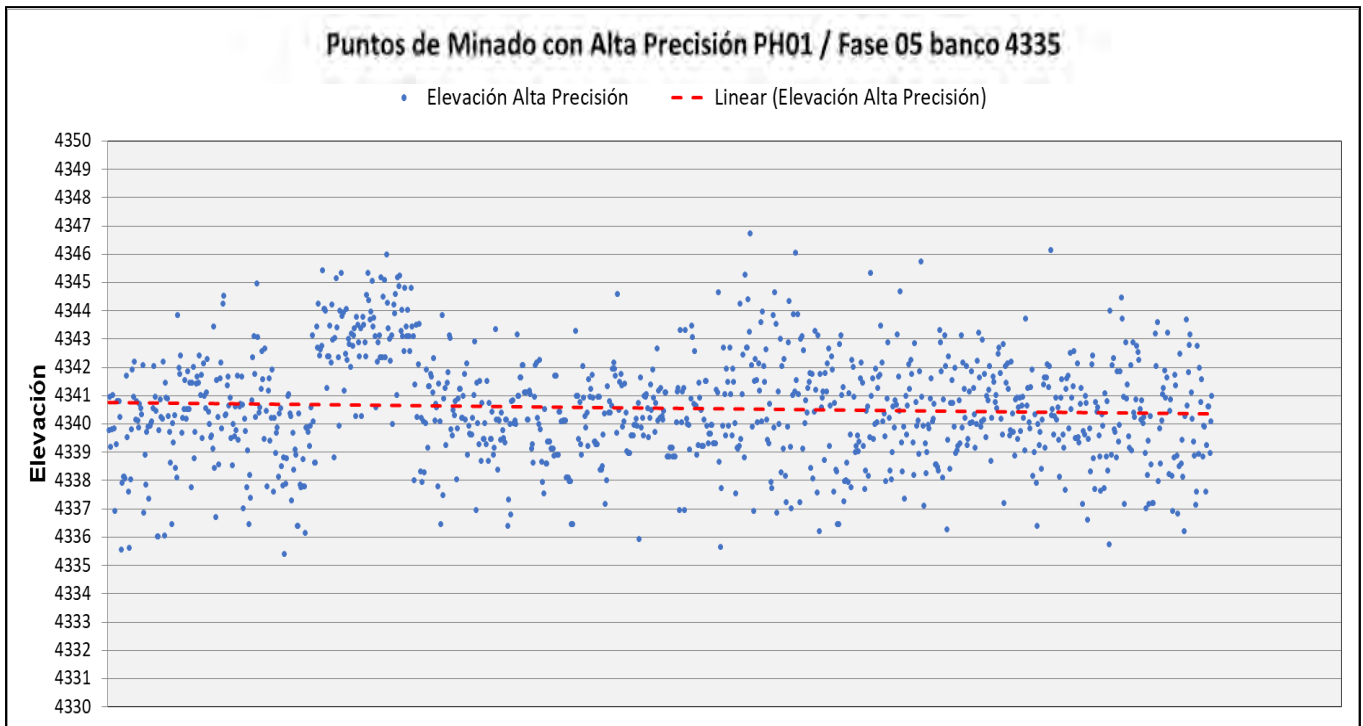
Análisis espacial del minado

La visualización en planta y sección evidencia que los puntos de carguío registrados por el sistema HPGPS presentan una distribución coherente dentro del sólido minado. Sin embargo, se observa una dispersión particularmente hacia los límites del polígono, lo cual puede estar asociado a:

- Variabilidad en la ejecución del carguío.
- Transiciones geológicas en zonas de contacto mineral–desmonte.
- Efectos del offset en el registro de datos.

Asimismo, la identificación de la cresta inicial y final permite validar la continuidad del avance del minado y su alineamiento general con la geometría planificada.

Gráfico 9: Dispersión de elevaciones HPGPS vs elevación de referencia – PH01.



Fuente: Elaboración propia – Datos Sistema Control Sense.

Evaluación de precisión vertical

El gráfico de dispersión muestra una tendencia lineal moderada entre la elevación registrada por el sistema HPGPS y la elevación de referencia. No obstante, se evidencia una mayor dispersión de los datos respecto a la línea de ajuste, lo cual indica:

- Variabilidad en la precisión vertical del sistema en esta zona.
- Influencia de condiciones operativas (posición del cucharón, fragmentación del material).
- Posibles desviaciones asociadas al control de datos.

Tabla 6: Comparación de tonelaje y ley – Control Sense vs reservas de corto plazo (PH01)

PH01	Toneladas	Cu %
Control Sense	47,650	0.36
Solid Reserve	48,098	0.37
Δ	1%	3%

Nota: Análisis comparativo de precisión entre Control Sense y Solid Reserve para el bloque PH01

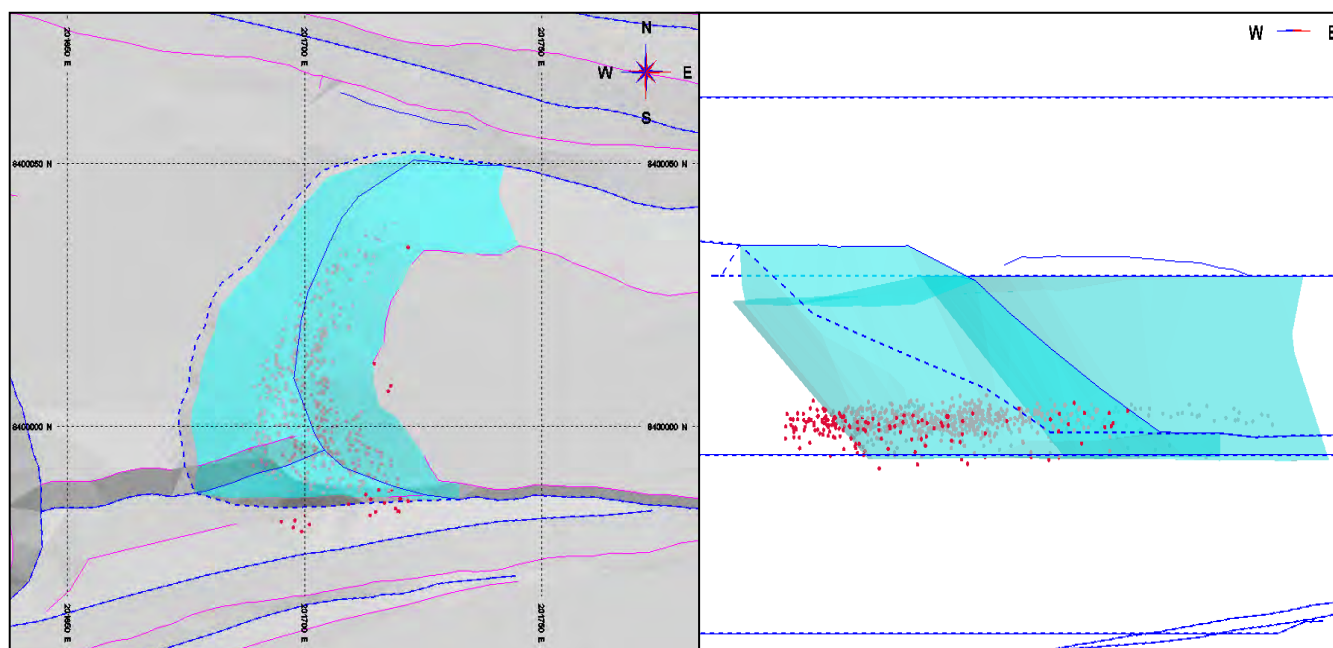
- Conciliación de Tonelaje (+1%): Desviación mínima. Indica una alta precisión entre el sistema de control y el modelo de corto plazo; el volumen movido está alineado con lo planificado.
- Variación de Ley (+3%): Discrepancia baja. Sugiere una buena asignación del material, aunque persisten ligeras diferencias por: Heterogeneidad geológica menor y ajustes operativos en la selectividad del carguío.

3.8.5.3. Prueba 03 – Pala PH02, Fase V, Banco 4335

La prueba PH02, desarrollada en la Fase V – banco 4335, tuvo como finalidad evaluar la consistencia del sistema HPGPS en un escenario con menor variabilidad geométrica, permitiendo analizar el comportamiento del sistema bajo condiciones operativas más estables.

A diferencia de otros casos, esta prueba se caracteriza por una distribución más homogénea del material, lo que permite identificar con mayor claridad el nivel de ajuste entre el posicionamiento del sistema y la geometría real del banco.

Figura 10: Validación espacial de puntos HPGPS – Pala PH02, Fase V, Banco 4335



Fuente: Elaboración propia – Mina Constanica, Hudbay Minerals.

Análisis espacial del minado

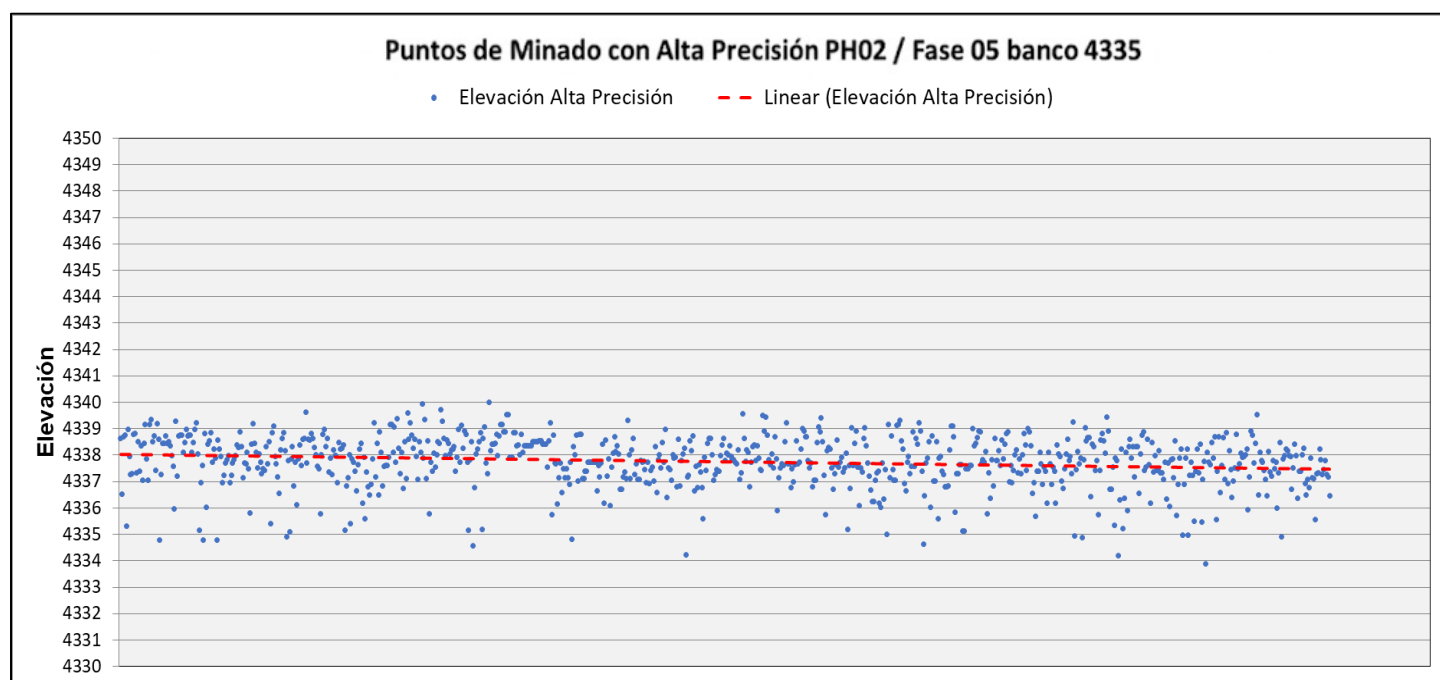
La nube de puntos registrada por el sistema HPGPS muestra una distribución continua dentro del sólido minado, con una adecuada correspondencia respecto a los límites definidos por la geometría del banco.

Se observa que:

- Los puntos de alta precisión se mantienen contenidos dentro del volumen minado
- No se evidencian desviaciones significativas hacia zonas externas
- La traza del avance presenta coherencia entre cresta inicial y final

Este comportamiento indica que el sistema mantiene estabilidad en el posicionamiento durante el ciclo de carguío.

Gráfico 10: Dispersión de elevaciones HPGPS vs elevación de referencia – PH02.



Fuente:Elaboración propia – Datos Control Sense.

El análisis del perfil de elevación evidencia una baja dispersión de los puntos en el eje vertical, lo que refleja un adecuado control del horizonte de minado.

Este resultado sugiere que:

- El corte se ejecuta dentro de rangos esperados
- No existen variaciones abruptas en la profundidad de carguío
- Se mantiene consistencia en la ejecución del banco

Tabla 7: Comparación de tonelaje y ley – Control Sense vs reservas de corto plazo (PH02).

PH02	Toneladas	Cu %
Control Sense	35,066	0.22
Solid Reserve	36,722	0.21
Δ	5%	-3%

Nota: Análisis comparativo de precisión entre Control Sense y Solid Reserve para el bloque PH02

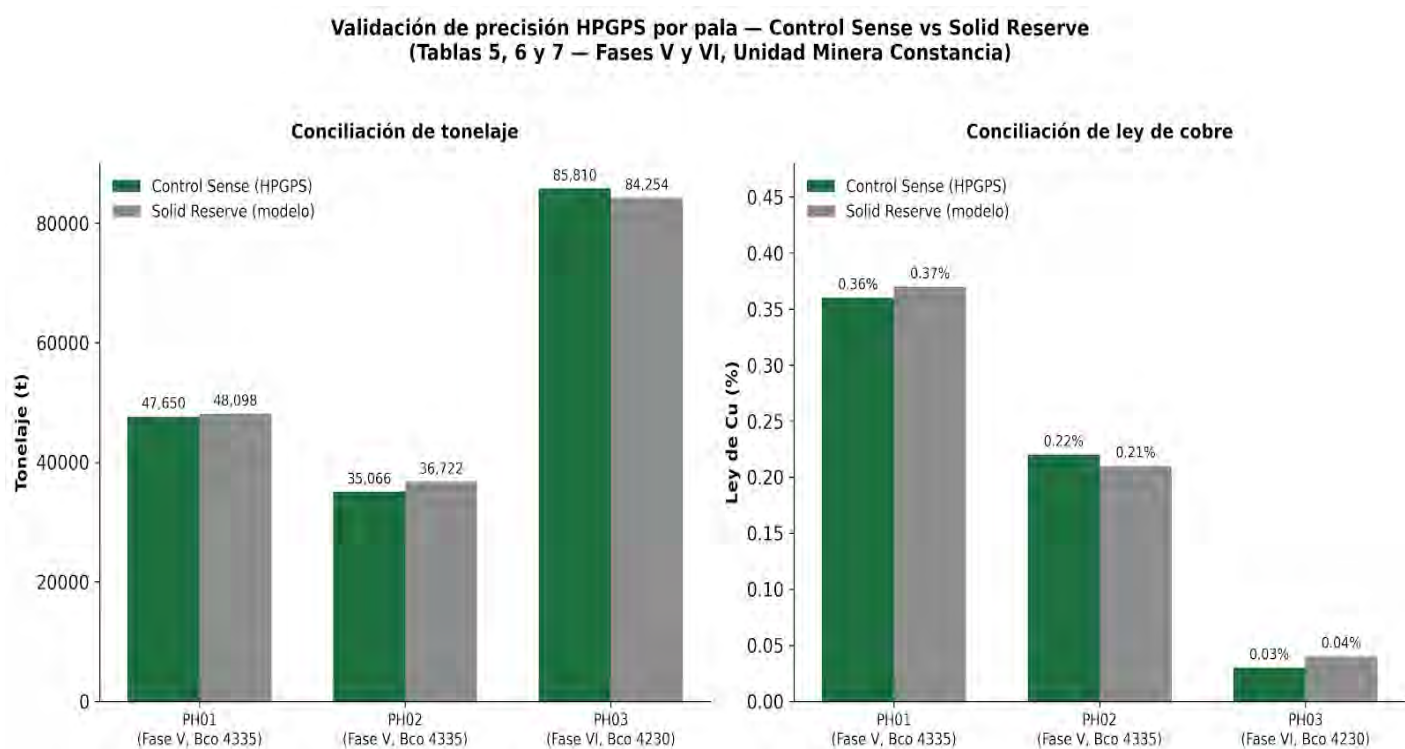
- La diferencia de tonelaje (5%) indica una buena correlación entre el material cargado y el volumen estimado.
- La variación en ley (-3%) es mínima, evidenciando alta correspondencia entre la clasificación espacial y la caracterización geológica.

3.8.5.4. Síntesis comparativa de las pruebas HPGPS

Con el fin de consolidar los resultados individuales de las pruebas PH01, PH02 y PH03, se elaboró una comparación conjunta de tonelaje y ley de cobre entre el sistema Control Sense (HPGPS) y el modelo de reservas de corto plazo (Solid Reserve).

Esta visión integrada permite identificar patrones comunes de desviación entre palas y evaluar si la precisión del sistema se mantiene consistente independientemente de la fase o el banco de operación.

Gráfico 11: Validación de precisión HPGPS por pala-Control Sense vs Solid Reserve



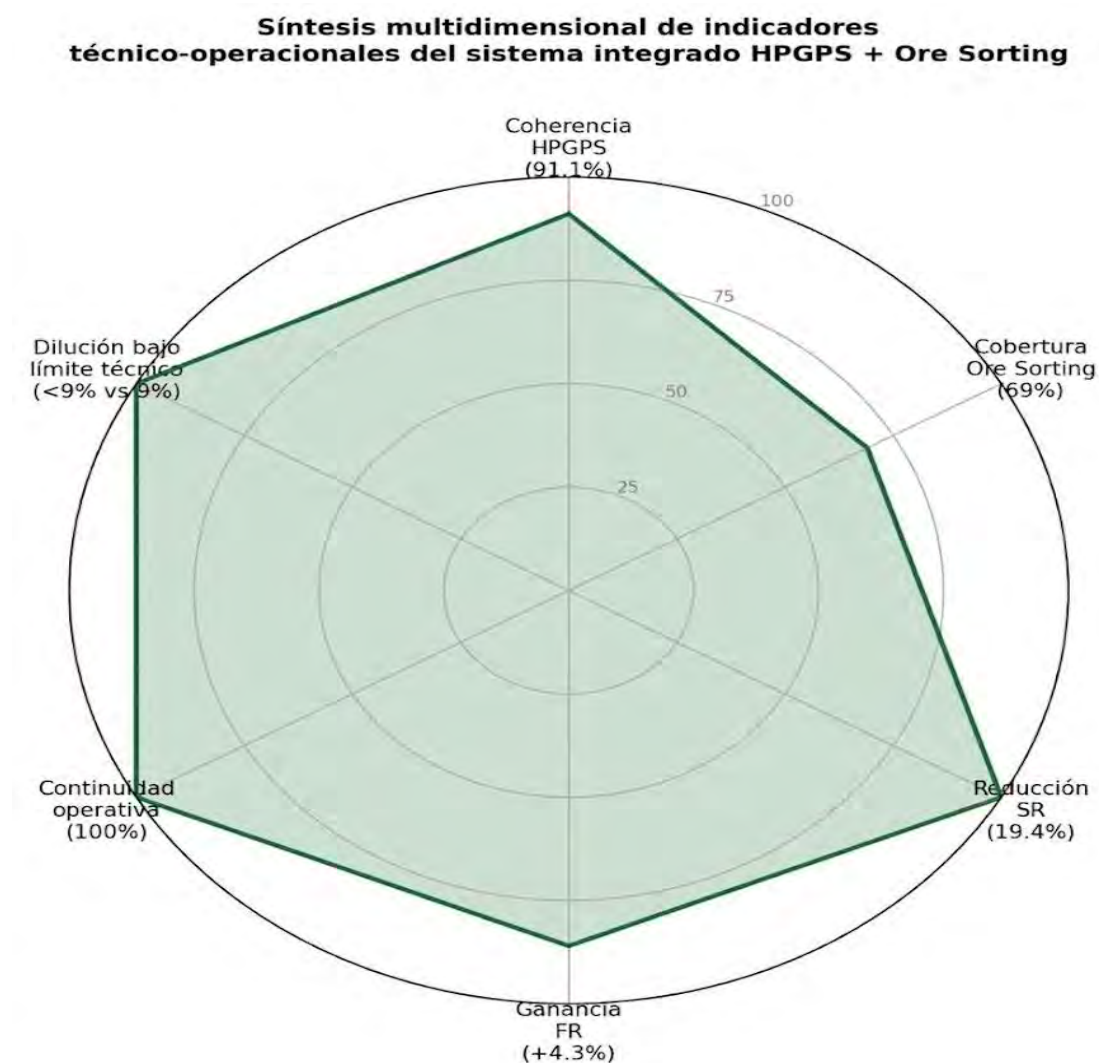
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el Gráfico 11, las tres pruebas presentan desviaciones menores al 5% tanto en tonelaje como en ley de cobre, confirmando la consistencia del sistema HPGPS en distintas condiciones geológicas y operativas.

3.8.5.5. Síntesis multidimensional de indicadores

Se representan de forma conjunta los principales indicadores de desempeño del sistema integrado. Dado que cada indicador posee una unidad de medida distinta, los valores fueron normalizados a una escala de 0 a 100 tomando como referencia el 100% de cada meta operativa individual (ver nota metodológica).

Gráfico 12: Síntesis multidimensional de indicadores técnico-operacionales



Fuente: Elaboración propia

3.8.6 Características del sistema HPGPS

El sistema HPGPS es una herramienta tecnológica que permite ubicar con alta precisión la posición del cucharón de la pala durante el proceso de carguío, mediante el uso de receptores GPS de alta exactitud, sensores de inclinación y sistemas de corrección diferencial.

Este sistema se basa en la integración del modelo de bloques geológico con las coordenadas reales del equipo en campo, lo que permite identificar en tiempo real el tipo de material que está siendo extraído.

Tabla 8 *Características operativas del sistema HPGPS.*

Característica	Descripción
Tipo de tecnología	Posicionamiento de alta precisión (GPS diferencial)
Función principal	Delimitación espacial de bloques de minado
Fuente de información	Modelo de bloques
Precisión	Alta (control a nivel de cuchara)
Aplicación	Separación mineral–desmonte

Nota: Componentes, función y alcance del sistema de posicionamiento de alta precisión – Mina Constancia.

La implementación del sistema HPGPS (High Precision GPS) en las unidades de carguío constituye un avance crítico en la selectividad minera. Al integrar el modelo de bloques directamente en la interfaz de la cabina, el operador dispone de una guía digital en tiempo real.

3.9 Proceso de integración tecnológica

3.9.1 Flujo de comunicación e integración de datos

La integración entre el sistema HPGPS y el Ore Sorting se realizó mediante la plataforma R4M, la cual centralizó y procesó la información proveniente de distintas fuentes

en tiempo real. Cada sistema aporta información específica que al ser integrada construye una lógica de decisión robusta para la clasificación del material durante el carguío

Tabla 9 *Flujo de información entre sistemas integrados.*

Sistema	Tipo de dato	Uso
HPGPS	Coordenadas y ley de bloque	Control espacial
Ore Sorting	Ley en tiempo real	Clasificación inmediata
Polígonos	Información geométrica	Validación
R4M	Integración de datos	Toma de decisiones

Nota: Jerarquía de datos y propósito operativo de cada sistema en la plataforma R4M – Hudbay Minerals.

El sistema R4M permitió consolidar la información proveniente de HPGPS, Ore Sorting y polígonos, aplicando un árbol de decisiones que prioriza la fuente de datos disponible. Esta integración facilitó la generación de sugerencias de destino en tiempo real, optimizando la asignación del material durante el acarreo.

En este esquema, cada sistema aporta información específica que, al ser integrada, permite construir una lógica de decisión robusta para la clasificación del material durante el proceso de carguío.

- El sistema HPGPS proporciona la ubicación espacial precisa del cucharón, vinculada al modelo de bloques de corto plazo.
- El sistema Ore Sorting (ShovelSense) entrega valores de ley en tiempo real medidos directamente en el material cargado.
- Los polígonos de minado definen la geometría operativa y sirven como referencia espacial de validación.
- La plataforma R4M integra estas fuentes y ejecuta reglas de decisión para definir el destino del material.

3.9.2 Lógica de decisión y asignación de destino

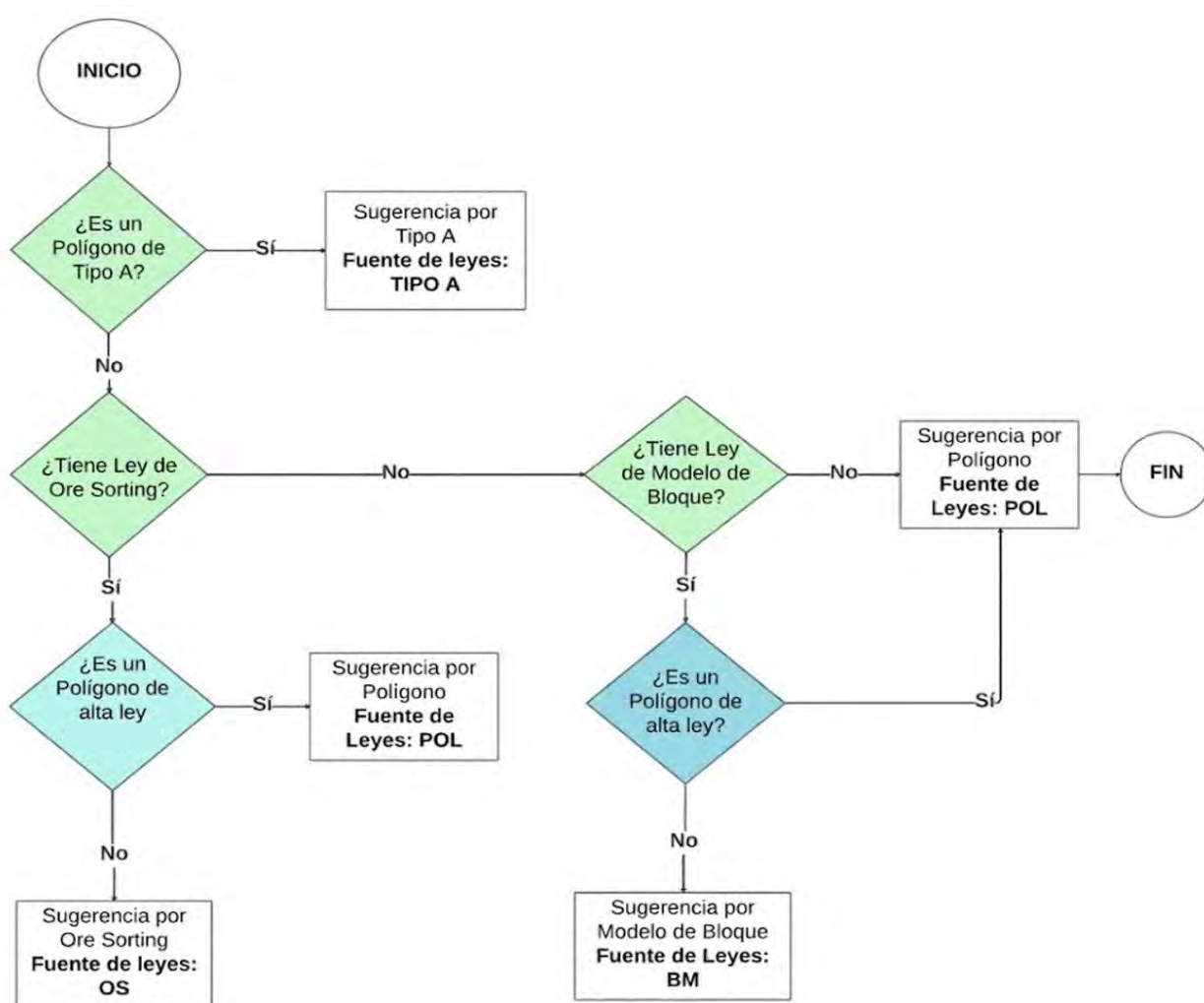
La clasificación del material se realiza mediante un árbol de decisiones integrado que evalúa la ley de cobre, la condición del material (óxidos, sulfuros, mixtos), el tipo de polígono y la disponibilidad de datos sensoriales. En función de estas variables, el sistema define automáticamente el destino del material a chancadora/stockpile cuando cumple criterios de ley, o a botadero (WRF) cuando es clasificado como desmonte.

Se añadirán nuevas fuentes de datos siguiendo la nueva lógica del árbol de decisiones. Se utilizarán las leyes de Ore Sorting, leyes del Modelo de Bloques y las leyes de los Polígonos. Los escenarios que se van a contemplar son los siguientes:

1. Cuando un viaje sea de un polígono de Tipo A, es decir debe contener los caracteres “Tipo A” en su nombre, entonces tomará la decisión por Tipo A. (Se genera Alerta)
2. Cuando un viaje no sea de un polígono de Tipo A, el sistema deberá evaluar que se tenga datos de leyes de Ore Sorting; si tiene, se evaluará si es un polígono de alta ley; si no, usará el árbol de decisiones del Ore Sorting.
3. Cuando un viaje no sea de un polígono de Tipo A, el sistema deberá evaluar que se tenga datos de leyes de Ore Sorting; si tiene, se evaluará si es un polígono de alta ley; si lo es, se evaluará en la condición de Polígono de Alta ley.
4. Cuando un viaje no sea de un polígono de Tipo A, el sistema deberá evaluar que se tenga datos de leyes de Ore Sorting; si no tiene, se evaluará que se tenga datos de leyes del Modelo de Bloques; si tiene, se evaluará si es un Polígono de Alta Ley; si no, usará el árbol de decisiones del Modelo de Bloques.
5. Cuando un viaje no sea de un polígono de Tipo A, el sistema deberá evaluar que se tenga datos de leyes de Ore Sorting; si no tiene, se deberá evaluar que se tenga datos de leyes del Modelo de Bloques; si tiene, se evaluará si es un polígono de alta ley; si es así, evaluará en la condición de Polígono de Alta ley.

6. Cuando un viaje no sea de un polígono de Tipo A, el sistema deberá evaluar que se tenga datos de leyes de Ore Sorting; si no tiene, se evaluará que se tenga datos de leyes del Modelo de Bloques; si no tiene, usará el árbol de decisiones del Polígono.

Gráfico 13: Flujo de integración de datos – HPGPS, Ore Sorting y R4M



Fuente: Elaboración propia / Hudbay (R4M – Sistema de gestión operativa)

Todas estas leyes serán evaluadas en el árbol de decisiones para generar la sugerencia de acuerdo con los datos evaluados.

3.9.3 Lógica de decisión y asignación de destino

La clasificación del material se realiza mediante un árbol de decisiones integrado, el cual evalúa variables como:

- Ley de cobre (Cu).
- Condición del material (óxidos, sulfuros, mixtos).
- Tipo de polígono (ORE / WASTE).
- Disponibilidad de datos de sensores.

En función de estas variables, el sistema define automáticamente el destino del material:

- Chancadora / Stockpile → cuando el material cumple con criterios de ley.
- WRF (Waste Rock Facility) → cuando el material es clasificado como desmonte

Además, el sistema genera dos tipos de respuesta operativa:

- o Sugerencia sin alerta: cuando existe consistencia entre la clasificación del material y su destino, es decir, mineral enviado a chancadora (Ore in Ore) o desmonte enviado a botadero (Waste in Waste).
- o Sugerencia con alerta: cuando se detecta una inconsistencia en la asignación del destino del material, específicamente en los casos de mineral clasificado como desmonte (Ore in Waste) o desmonte incorporado en zonas de mineral (Waste in Ore), lo que representa una desviación operativa que requiere atención inmediata del despachador u operador.

Esta lógica permite:

- ✓ Reducir la dependencia de decisiones visuales del operador.
- ✓ Estandarizar criterios de clasificación.
- ✓ Minimizar errores de asignación de material.
- ✓ Mejorar la trazabilidad del proceso de minado

Tabla 10: Árbol de decisión en base a las leyes de Bloque

Rule	DECISION TREE UPDATE					
	Zone	Polygon	Cu BM	Ox	Destination	Suggestions
1	CS	ORE	>= CUT-OFF	<= 40%	STOCK CS / CRUSHER	With suggestion (Without alert)
2	CS	ORE	>= CUT-OFF	> 40%	WRF	With suggestion (With alert)
3	CS	ORE	< CUT-OFF		WRF	With suggestion (With alert)
4	CS	WASTE	>= CUT-OFF	<= 40%	STOCK CS / CRUSHER	With suggestion (With alert)
5	CS	WASTE	>= CUT-OFF	> 40%	WRF	With suggestion (Without alert)
6	CS	WASTE	< CUT-OFF		WRF	With suggestion (Without alert)
7	PC	ORE	>= CUT-OFF	<= 40%	STOCK PC / CRUSHER	With suggestion (Without alert)
8	PC	ORE	>= CUT-OFF	> 40%	WRF	With suggestion (With alert)
9	PC	ORE	< CUT-OFF		WRF	With suggestion (With alert)
10	PC	WASTE	>= CUT-OFF	<= 40%	STOCK PC / CRUSHER	With suggestion (With alert)
11	PC	WASTE	>= CUT-OFF	> 40%	WRF	With suggestion (Without alert)
12	PC	WASTE	< CUT-OFF		WRF	With suggestion (Without alert)

Nota: Matriz de decisiones estandarizada para la clasificación de material en zonas- Hudbay

Minerals

Tabla 11: Árbol de decisión en base a los polígonos Tipo A

Rule	DECISION TREE UPDATE				
	Zone	NAME POLYGON	CONTAINS	Destination	Suggestions
1	CS	ORE	TIPO A	STOCK CS / CRUSHER	With suggestion (With alert)
2	CS	WASTE	TIPO A	STOCK CS / CRUSHER	With suggestion (With alert)
3	PC	ORE	TIPO A	STOCK PC / CRUSHER	With suggestion (With alert)
4	PC	WASTE	TIPO A	STOCK PC / CRUSHER	With suggestion (With alert)

Nota: Matriz de decisiones estandarizada para la clasificación de material en zonas- Hudbay

Mineral.

Tabla 12: Árbol de decisión en base a los polígonos de Alta Ley

Rule	DECISION TREE UPDATE					
	Zone	NAME POLYGON	NOT CONTAINS	CU POLYGON	Destination	Suggestions
1	CS	ORE	TIPO A	>= AL	STOCK CS / CRUSHER	With suggestion (With alert)
2	CS	WASTE	TIPO A	>= AL	STOCK CS / CRUSHER	With suggestion (With alert)
3	PC	ORE	TIPO A	>= AL	STOCK PC / CRUSHER	With suggestion (With alert)
4	PC	WASTE	TIPO A	>= AL	STOCK PC / CRUSHER	With suggestion (With alert)

Nota: Matriz de decisiones estandarizada para la clasificación de material en zonas- Hudbay

Minerals

El reporte debe mostrar sugerencias basadas en la evaluación de las leyes del modelo de bloques, datos ore sorting y del polígono.

3.9.4 Interfaz de alertas:

Se implementó un sistema de notificaciones en tiempo real que integra múltiples fuentes de datos geometalúrgicos (OS, BM, POL, Tipo A) para validar el destino de cada unidad de acarreo. Esta interfaz permite la actualización automática de la ley y el destino sugerido basándose en la información más reciente de la cadena de valor, emitiendo una alerta audible y visual al despachador/operador. Esto asegura que la descarga se realice según el potencial económico real del material, minimizando errores de clasificación.

Figura 11: Interfaz de alertas operativas – Plataforma R4M.



Fuente: Sistema R4M – Hudbay Minerals.

3.9.5 Optimización del reporte de clasificación

Se ha actualizado la plataforma de reporte histórico para integrar métricas avanzadas de clasificación en tiempo real. Esta nueva vista (v2) permite comparar el Destino Sugerido inicial frente a los datos obtenidos por el sistema ShovelSense y el Modelo de Bloques (BM/POL). La integración incluye columnas de diagnóstico críticas como la validación de recepción de datos y logs de errores operativos, asegurando una auditoría completa del flujo de mineral.

Descripción de Componentes Clave:

- **Análisis Comparativo de Destinos:** Permite visualizar en una sola línea el destino sugerido por el sistema versus la locación final de descarga, facilitando la identificación de desviaciones operativas.
- **Integración ShovelSense:** Columna dedicada a confirmar la obtención de data analítica directamente desde el frente de carguío, mejorando la confiabilidad de la ley reportada.

Figura 12: Actualización de columnas en reporte de clasificación – Plataforma R4M.

The screenshot shows the R4M REPORT FOR MINERS interface. At the top, there are summary statistics: Toneladas sentadas (69,004 t), Toneladas resguardadas (3,298 t), Número de viajes de waste enviados como ore (0 (0 t)), and Número de viajes de ore enviados como waste (0 (0 t)). Below these are filters for date and time. The main table has columns: ID, ID CAM, LOADING DATE, HAULING DATE, NOMBRE DE PALA, NOMBRE DE CAMIÓN, NOMBRE DE POLIGONO, DESTINO SUGERIDO, DESTINO SUGERIDO SHOVELSENSE, DESTINO SUGERIDO BM/POL, SE OBTUVO DATA DE SHOVELSENSE, MENSJE DE SALIDA, and MENSJE DE ERROR. Red boxes and arrows highlight updates to the DESTINO SUGERIDO, DESTINO SUGERIDO SHOVELSENSE, DESTINO SUGERIDO BM/POL, SE OBTUVO DATA DE SHOVELSENSE, MENSJE DE SALIDA, and MENSJE DE ERROR columns.

ID	ID CAM	LOADING DATE	HAULING DATE	NOMBRE DE PALA	NOMBRE DE CAMIÓN	NOMBRE DE POLIGONO	DESTINO SUGERIDO	DESTINO SUGERIDO SHOVELSENSE	DESTINO SUGERIDO BM/POL	SE OBTUVO DATA DE SHOVELSENSE	MENSJE DE SALIDA	MENSJE DE ERROR
121357327	3109828	2024-11-06 06:59:41	2024-11-06 07:01:31	PH003	CM26	05-22-009-NAG-1	WRF	WRF				
121363820	3109831	2024-11-06 07:04:19	2024-11-06 07:06:11	PH003	CM34	05-22-009-NAG-1	WRF	WRF				
121367317	3109832	2024-11-06 07:09:36	2024-11-06 07:09:55	PH002	CM23	02-25-901-SPILL-NAG-1	WRF					
121365846	3109833	2024-11-06 07:35:29	2024-11-06 07:37:35	PH001	CM01	02-25-030-ORE_K	STOCK PC / CRUSHER					
121371486	3109835	2024-11-06 07:06:53	2024-11-06 07:11:35	PH001	CM18	02-25-030-ORE_K	STOCK PC / CRUSHER					
121368901	3109836	2024-11-06 07:06:48	2024-11-06 07:09:32	PH003	CM04	05-22-011-NAG-1	WRF	WRF				
121373845	3109837	2024-11-06 07:11:51	2024-11-06 07:13:16	PH002	CM29	02-25-901-SPILL-NAG-1	WRF	WRF				
121376576	3109838	2024-11-06 07:13:12	2024-11-06 07:15:02	PH001	CM14	02-25-030-ORE_K	STOCK PC / CRUSHER					
121372980	3109839	2024-11-06 07:10:37	2024-11-06 07:12:37	PH003	CM05	05-22-011-NAG-1	WRF	WRF				
121377289	3109840	2024-11-06 07:13:30	2024-11-06 07:15:28	PH001	CM17	05-22-011-NAG-1	WRF	WRF				
121367389	3109841	2024-11-06 07:08:47	2024-11-06 07:08:49	PH002	CM20	02-25-901-SPILL-NAG-1	STOCK PC / CRUSHER					
121379666	3109842	2024-11-06 07:14:56	2024-11-06 07:17:14	PH002	CM16	02-25-901-SPILL-NAG-1	WRF	WRF				
121381343	3109845	2024-11-06 07:16:00	2024-11-06 07:18:26	PH003	CM11	05-22-011-NAG-1	WRF	WRF				
121385334	3109846	2024-11-06 07:18:42	2024-11-06 07:21:14	PH002	CM09	02-25-901-SPILL-NAG-1	WRF	WRF				
121386199	3109847	2024-11-06 07:19:28	2024-11-06 07:21:46	PH003	CM27	05-22-011-NAG-1	WRF	WRF				

Fuente: R4M – Sistema de gestión operativa

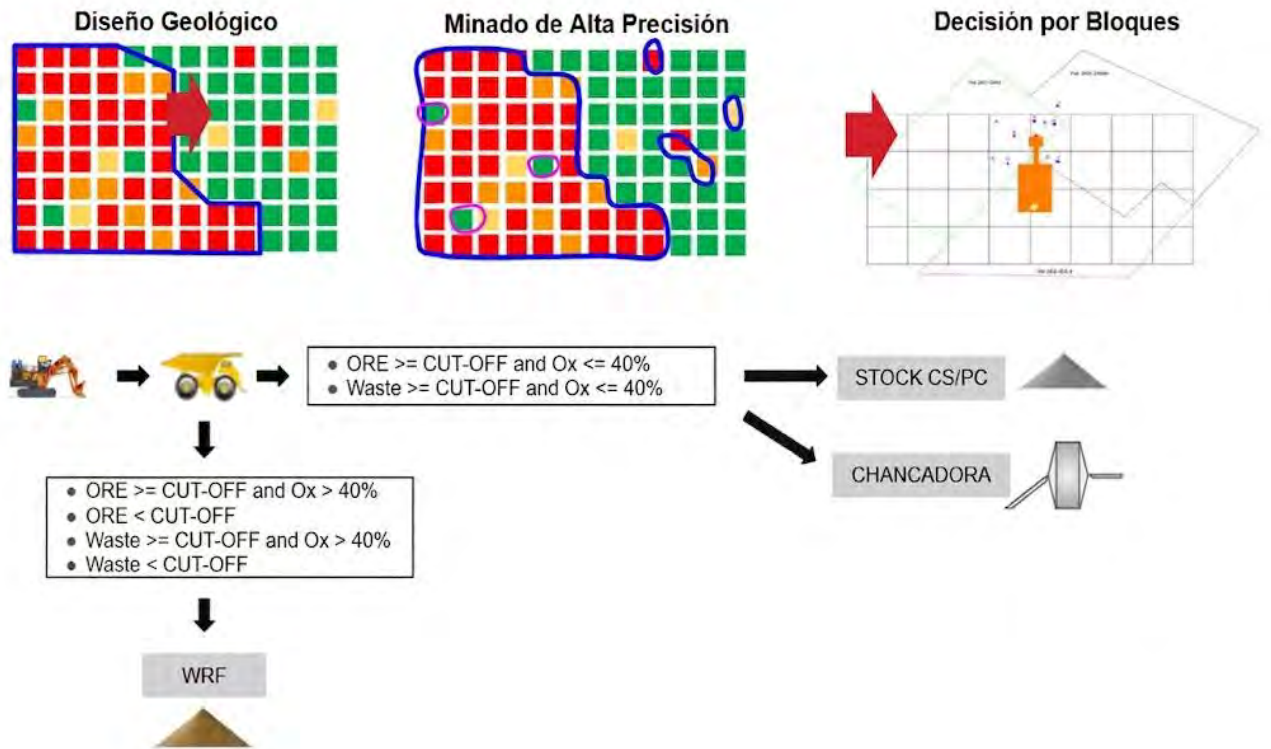
3.9.6 Jerarquía de integración operativa

A diferencia de un esquema convencional, la integración no depende de una sola fuente de información, sino de una jerarquización dinámica de datos, donde la plataforma evalúa la disponibilidad y confiabilidad de cada entrada.

Esto permite que el sistema:

- Priorice la ley en tiempo real cuando el Ore Sorting está disponible.
- Utilice el modelo de bloques (HPGPS) como respaldo cuando no existe lectura sensorial.
- Genere alertas operativas.

Gráfico 14: Flujo de toma de decisiones integrado.



Fuente: Elaboración propia

3.9.7 Sistema tradicional vs. sistema integrado

La integración tecnológica permitió mejorar tanto la delimitación de los bloques como la clasificación del material, combinando precisión espacial con información de leyes.

Tabla 13 Comparación del sistema tradicional vs sistema integrado

Aspecto	Sistema tradicional	Sistema integrado
Delimitación	Banderas	HPGPS
Clasificación	Visual / manual	Ore Sorting + HPGPS
Precisión	Media	Alta
Control	Limitado	En tiempo real

Nota: Comparativa de eficiencia y precisión entre métodos de control convencional e integrado – Mina Constancia.

3.9.8 Parámetros operativos y de control

3.9.8.1. Leyes de corte y destino del material

Se estableció como criterio operativo una ley de corte de Cu para la clasificación del material.

Tabla 14 *Criterios de clasificación por ley de corte.*

Ley de Cu (%)	Clasificación	Destino
$\geq$ Cut-Off	Mineral	Chancadora / Stock
$<$ Cut-Off	Desmonte	WRF

Nota: Parámetros de ley de corte y destinos finales según clasificación del material – Mina Constancia.

3.9.8.2. Control de precisión espacial y temporal

El control espacial se logró mediante el sistema HPGPS, mientras que el control temporal se optimizó mediante la disponibilidad de información en tiempo real del sistema Ore Sorting.

La combinación de ambos sistemas permitió reducir la incertidumbre operativa, asegurando que cada ciclo de minado sea evaluado de manera precisa y oportuna.

3.9.9 Indicadores de desempeño

3.9.9.1. Recuperación de mineral

Como resultado de la implementación de la integración tecnológica HPGPS + Ore Sorting en las Fases V y VI del tajo Constancia durante el periodo agosto 2025 – enero 2026, se establecieron indicadores de desempeño orientados a cuantificar el impacto operativo del sistema. El principal indicador es la recuperación de mineral en zonas previamente clasificadas como desmonte. Estos indicadores son desarrollados y analizados en la presente investigación.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir del análisis de los registros operativos correspondientes a la integración del sistema de Minado de Alta Precisión por Bloques (HPGPS) y el sistema Ore Sorting (ShovelSense) en la Unidad Minera Constancia – Hudbay, durante el periodo agosto 2025 – enero 2026. La presentación de los resultados se organizó en función de las variables y objetivos de la investigación, analizando en primer lugar el efecto general de la integración de ambos sistemas sobre la eficiencia técnico–operacional; en segundo lugar, en qué medida el sistema HPGPS garantiza la continuidad de la clasificación del material en ciclos donde el Ore Sorting no genera lectura válida de ley; en tercer lugar, la cuantificación de la mejora del factor de recuperación mediante el HPGPS en zonas previamente clasificadas como desmonte por ausencia de lectura sensorial; y finalmente, cómo influye la jerarquía de decisión integrada entre el HPGPS y el Ore Sorting en la correcta asignación del destino del material en el frente de carguío.

Para una adecuada interpretación de los resultados, se describen previamente los criterios operativos considerados en la implementación del esquema de control integrado,

especialmente aquellos relacionados con la lógica de decisión utilizada en la plataforma R4M, donde se integraron las leyes provenientes del Ore Sorting, del modelo de bloques y de los polígonos de minado, con la finalidad de generar sugerencias de destino más precisas en tiempo real.

4.1.1 Contexto operativo previo al análisis de resultados

Previo al desarrollo de los resultados específicos, se identificó que en la Unidad Minera Constancia existía la necesidad de fortalecer el sistema de control de destinos del material acarreado, debido a que el esquema convencional del reporte Ore Sorting no siempre permitía resolver con suficiente precisión los casos en los que la lectura sensorial era insuficiente o no se encontraba disponible. En respuesta a esta limitación operativa, se implementó una nueva lógica de evaluación en la plataforma R4M durante el periodo de estudio, integrando las leyes del Ore Sorting, las leyes del modelo de bloques y las leyes de los polígonos de minado, con el fin de mejorar la sugerencia de destino de los viajes de mineral y desmonte en las Fases V y VI del tajo Constancia.

Esta lógica consideró distintos escenarios de decisión jerárquica. Cuando el viaje provenía de un polígono Tipo A, la decisión se asignaba directamente con base en esa condición generando una alerta operativa. Cuando no se trataba de un polígono Tipo A, el sistema evaluaba la disponibilidad de datos del Ore Sorting; si estos existían, la decisión se tomaba mediante el árbol de evaluación correspondiente diferenciando si se trataba de polígonos de alta ley. Si no existían datos del Ore Sorting, el sistema recurría a las leyes del modelo de bloques mediante el HPGPS y, en ausencia de estas, a las leyes del polígono de minado.

Este esquema jerárquico evidenció que el sistema HPGPS no solo cumple una función de respaldo ante la ausencia de lectura sensorial, sino que constituye una herramienta fundamental para mejorar la trazabilidad espacial del mineral y reforzar la precisión del proceso

de extracción, asegurando la continuidad operativa de la clasificación del material bajo cualquier escenario de incertidumbre durante el periodo investigado.

4.1.2 Criterios de evaluación para el análisis del HPGPS

Para el análisis del sistema HPGPS, fue evaluado en función de dos aspectos principales correspondientes a sus dimensiones operativas. La primera dimensión, soporte en clasificación, fue entendida como la capacidad del sistema para asumir la decisión de destino del material en aquellos ciclos donde el Ore Sorting no generó lectura válida de ley, apoyándose en el modelo de bloques y los polígonos de minado. La segunda dimensión, continuidad operativa, fue evaluada como la coherencia entre la clasificación ejecutada por el HPGPS y el destino correcto del material según la ley de corte de Cu, determinando en qué proporción el sistema asignó correctamente el destino del material en ausencia de información sensorial.

Estos criterios de evaluación se vincularon directamente con los indicadores definidos en la investigación: el porcentaje de ciclos clasificados mediante HPGPS en ausencia de lectura del Ore Sorting como indicador de soporte en clasificación, y el porcentaje de coherencia en la asignación correcta del destino del material como indicador de continuidad operativa, ambos contribuyendo a la cuantificación del impacto del sistema sobre los indicadores de eficiencia técnico-operacional de la variable dependiente Y.

4.1.3 Análisis del sistema HPGPS

4.1.3.1. Clasificación según fuente de decisión (HPGPS vs Ore Sorting)

A partir de los registros analizados, se clasificaron los datos en función de la disponibilidad de información del sistema Ore Sorting, identificando aquellos casos donde la decisión operativa fue tomada mediante el modelo de bloques (HPGPS).

Tabla 15: Clasificación de registros según fuente de evaluación

Fuente de decisión	Número de registros	Porcentaje (%)
HPGPS (No OS – Block)	29,063	31.0%
Ore Sorting (OS)	64,688	69.0%
Total	93,750	100%

Nota: Clasificación de registros según el predominio de la fuente de decisión tecnológica.

Se observó que el 31% de los registros operativos dependieron del sistema HPGPS, lo cual evidencia que gran cantidad de decisiones de clasificación del material no contaron con información del sistema Ore Sorting.

Este resultado confirma que el HPGPS desempeña un rol fundamental en la operación minera, no solo como sistema complementario, sino como herramienta principal de control espacial en ausencia de datos sensoriales, garantizando la continuidad del proceso de minado.

4.1.3.2. Evaluación de la coherencia entre ley y destino del material

Se evaluó la precisión del sistema HPGPS mediante la validación entre:

- Ley de cobre (Cu Block / Cu Polygon)
- Polígono de extracción
- Destino final del material

Se utilizó como criterio técnico una **ley de corte de Cu**, donde:

- $Cu \geq \text{Cut Off} \rightarrow \text{Mineral (Chancadora / Stock)}$
- $Cu < \text{Cut Off} \rightarrow \text{Desmonte (WRF)}$

Tabla 16 *Precisión en la asignación de destino del material mediante HPGPS*

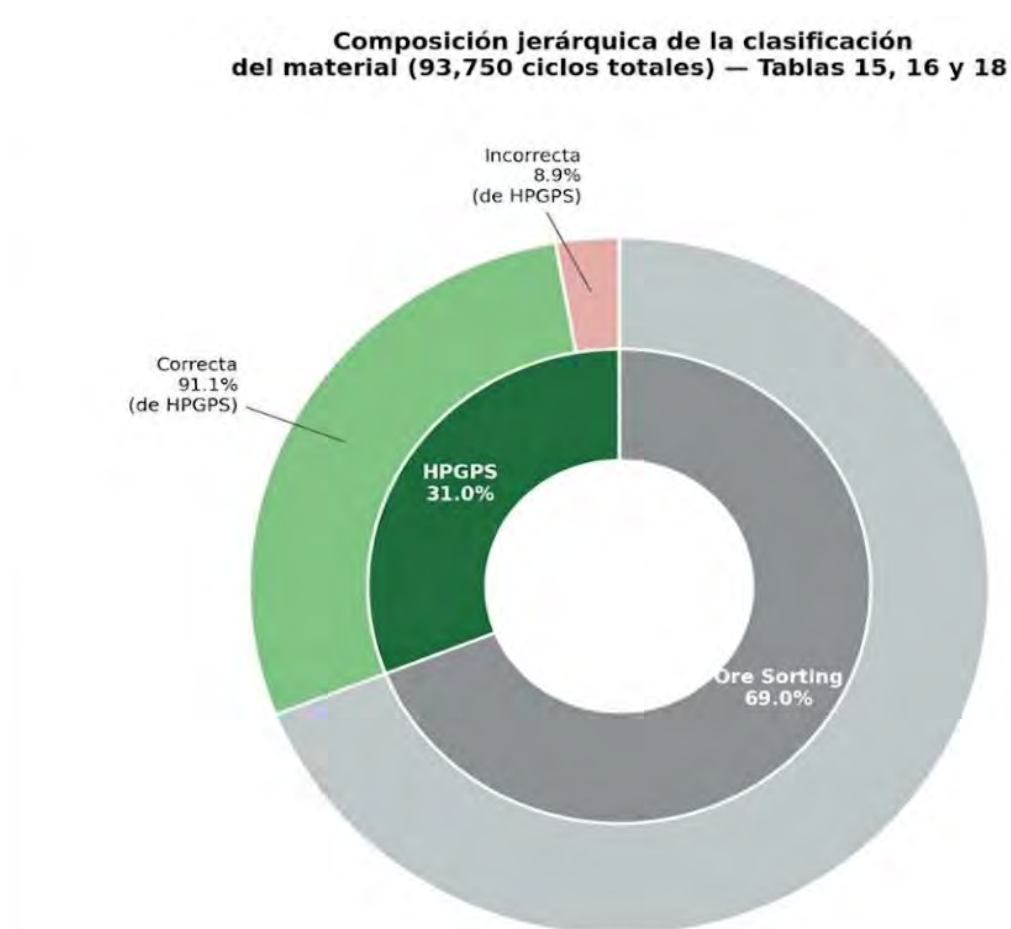
Clasificación	Número de registros	Porcentaje (%)
Correcta	26,476	91.1%
Incorrecta	2,587	8.9%
Total (HPGPS)	29,063	100%

Nota: Porcentaje de consistencia operativa en la clasificación

Los resultados evidenciaron que el sistema HPGPS alcanzó una coherencia del 91.1% en la asignación correcta del destino del material durante el periodo de estudio, lo que significa que en 26,476 de los 29,063 ciclos donde actuó como mecanismo de respaldo, la clasificación ejecutada fue consistente con el criterio de ley de corte de Cu. El porcentaje de error del 8.9% corresponde a ciclos donde la variabilidad litológica del yacimiento tipo Skarn generó desviaciones entre la ley del modelo de bloques y el material real extraído, condición inherente a este tipo de depósitos y considerada dentro de rangos aceptables para operaciones mineras a cielo abierto.

Con el fin de integrar visualmente los resultados de clasificación presentados en las Tablas 15, 16 y 18, se elaboró una representación jerárquica que sintetiza la proporción de registros clasificados mediante Ore Sorting y HPGPS, así como el nivel de coherencia alcanzado dentro del respaldo HPGPS.

Gráfico 15: Composición jerárquica de la clasificación del material (93,750 ciclos totales)



Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el Gráfico 15, el sistema Ore Sorting cubrió el 69.0% del total de ciclos analizados, mientras que el HPGPS actuó como mecanismo de respaldo en el 31.0% restante. Dentro de este subconjunto, el 91.1% de las clasificaciones resultaron correctas, confirmando la consistencia del sistema incluso en su rol complementario.

4.1.3.3. Control espacial del HPGPS en zonas de contacto

El análisis de los registros operativos permitió identificar que, en los casos donde la evaluación fue realizada mediante *Block* (HPGPS), la correspondencia entre:

- Polígono mineralizado (*Final Polygon Name*)
- Ley de bloque (*Cu Block*)

- Destino final del material

presentó una alta consistencia.

El análisis de los registros operativos del periodo agosto 2025 – enero 2026 permitió identificar que en los casos donde la decisión de clasificación fue tomada mediante el modelo de bloques a través del HPGPS, la correspondencia entre el polígono mineralizado, la ley de bloque y el destino final del material presentó alta consistencia, alcanzando una coherencia del 91.1%. Este resultado es especialmente significativo considerando que los 29,063 ciclos evaluados mediante HPGPS corresponden precisamente a escenarios sin lectura válida del Ore Sorting, donde la incertidumbre operativa es mayor. El sistema demostró que, aun en ausencia de información sensorial, la integración del modelo de bloques con el posicionamiento de alta precisión permite mantener un nivel de clasificación confiable en las Fases V y VI.

Asimismo, se determinó que el sistema estandarizó la toma de decisiones operativas bajo condiciones de incertidumbre geológica, consolidándose como herramienta clave para garantizar la continuidad de la clasificación del material en tiempo real cuando el Ore Sorting no genera lectura válida de ley.

4.1.3.4. Identificación de mineral en zonas de desmonte mediante HPGPS

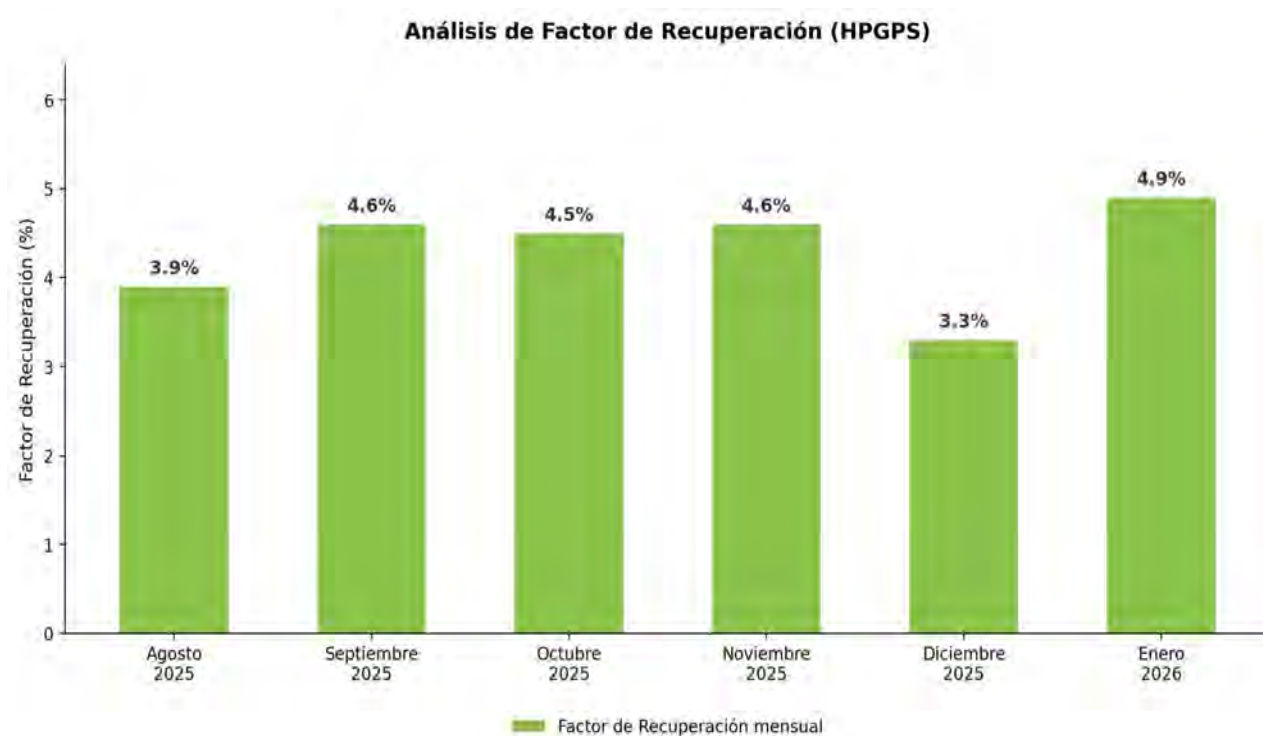
Durante el periodo agosto 2025 – enero 2026, se analizaron los ciclos operativos en polígonos clasificados como desmonte en las Fases V y VI, utilizando el sistema HPGPS como herramienta de validación basada en el modelo de bloques, evaluando así su dimensión de continuidad operativa. Los resultados evidenciaron la presencia de material mineralizado dentro de zonas previamente consideradas como desmonte, identificando oportunidades de recuperación que no eran detectables mediante métodos tradicionales de control ni mediante el uso exclusivo del sistema Ore Sorting.

Tabla 17 *Material identificado en desmonte mediante HPGPS*

Parámetro	Valor
Periodo evaluado	agosto 2025 – enero 2026
Ciclos evaluados	93,750
Ciclos con HPGPS	29,063
Mineral recuperado por HPGPS	FR +4.3%
Ley promedio Cu	0.22%

Nota: Indicadores de mineral recuperado en zonas de desmonte y leyes promedio.

Gráfico 16: *Mineral identificado en zonas de desmonte por mes.*



Fuente: Elaboración propia

El análisis mensual evidenció que la clasificación de mineral mediante HPGPS presentó una tendencia creciente a lo largo del periodo evaluado, alcanzando su punto máximo en el mes de diciembre. El comportamiento acumulado mostró un incremento progresivo reflejando un incremento del Factor de Recuperación (FR) de aproximadamente 4.3% al finalizar el periodo de estudio. Asimismo, la ley promedio de cobre registrada se mantuvo por encima de

la ley de corte de Cu, confirmando que el material clasificado mediante HPGPS presentaba valor económico real y su recuperación fue técnicamente justificada.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema HPGPS garantizó la continuidad operativa del proceso de clasificación en todos los ciclos del periodo de estudio, reduciendo pérdidas de material económico que anteriormente eran enviadas a botadero debido a una delimitación imprecisa de los polígonos de extracción. Desde el punto de vista operativo, esta mejora se traduce en una mayor eficiencia en la separación entre mineral y desmonte, especialmente en zonas de contacto geológico donde la variabilidad del yacimiento tipo Skarn genera mayores niveles de incertidumbre.

4.1.4 Análisis del sistema Ore Sorting

4.1.4.1 Caracterización de los registros evaluados

Para el desarrollo del presente análisis, se evaluaron registros 93,750 operativos provenientes del sistema FMS correspondientes a ciclos reales de carguío ejecutados en las Fases V y VI de la Unidad Minera Constancia durante el periodo agosto 2025 – enero 2026. Dichos registros constituyen una muestra representativa del comportamiento del sistema Ore Sorting en condiciones reales de operación, particularmente en zonas de contacto entre mineral y desmonte, evaluando su dimensión de clasificación en tiempo real. Cada registro incluyó la ley estimada por el sistema Ore Sorting (Cu ShovelSense), la ley del modelo de bloques (Cu Block), la ley del polígono (Cu Poly) y la evaluación final del material.

Tabla 18 Distribución de registros evaluados

Parámetro	Valor
Total de registros analizados	93,750
Registros con Ore Sorting (OS)	64,688
Registros sin Ore Sorting (No OS)	29,063

Nota: Desglose de la muestra utilizada para el análisis comparativo

A partir de la distribución de los registros, se identificó que el 69% de los ciclos evaluados contaron con información proveniente del sistema Ore Sorting, lo cual permitió realizar un análisis comparativo con suficiente representatividad. Sin embargo, también se evidenció que un 31% de los registros no contaban con una ley lo cual genera un vacío operativo en la recuperación del mineral.

Este aspecto es relevante, ya que limita la cobertura del sistema y, por ende, su impacto global en la operación. No obstante, la muestra analizada resulta adecuada para evaluar el comportamiento del sistema en condiciones reales.

4.1.4.2 Comparación de leyes: Ore Sorting vs Modelo de Bloques

Uno de los aspectos más críticos en la evaluación del sistema Ore Sorting fue la comparación entre la ley estimada por los sensores instalados en el cucharón para polígonos de alta ley y la ley proveniente del modelo de bloques, considerada como referencia geológica.

Tabla 19 Comparación promedio de Leyes de Cu

Fuente de información	Ley promedio Cu (%)
Ore Sorting (ShovelSense)	~0.07 – 0.12
Modelo de Bloques	~0.09 – 0.30

Nota: Rangos de leyes de cobre según de información sensorial y el modelo geológico

El análisis evidenció una diferencia sistemática entre ambas fuentes de información, observándose que el sistema Ore Sorting tiende a reportar valores de ley inferiores respecto al modelo de bloques. Esta tendencia sugiere una subestimación de la ley de cobre por parte del sistema sensorial, lo cual tiene implicancias directas en la toma de decisiones operativas.

Desde una perspectiva técnica, esta diferencia puede explicarse por diversos factores, entre los que destacan la heterogeneidad del yacimiento tipo skarn, la presencia de minerales asociados que interfieren en la respuesta del sensor y las condiciones propias del proceso de carguío, como la fragmentación del material y la mezcla en el cucharón.

En consecuencia, dentro del flujo de decisiones que se elaboró prima los polígonos de alta ley respetando su destino final y en caso no fuese un polígono de alta ley se pasa a la decisión por ore sorting.

4.1.5 Influencia del Ore Sorting en la eficiencia de extracción

Desde un enfoque integral, la eficiencia del sistema Ore Sorting fue evaluada considerando su impacto en la clasificación del material y la continuidad operativa durante el periodo agosto 2025 – enero 2026. Los resultados evidencian que el sistema contribuyó positivamente a la eficiencia operativa en el 69% de los ciclos analizados, permitiendo la clasificación del material en tiempo real durante el proceso de carguío y reduciendo la dependencia de métodos tradicionales basados únicamente en el modelo de bloques.

Sin embargo, en el 31% de los ciclos restantes el sistema no generó lectura válida de ley, situación atribuible a las condiciones propias del yacimiento tipo Skarn de Constancia. Ante estos escenarios de ausencia de información sensorial, el sistema HPGPS asumió la clasificación del material apoyándose en el modelo de bloques y los polígonos de minado, garantizando la continuidad operativa del proceso de clasificación sin interrupciones.

Se determina que el sistema Ore Sorting constituye una herramienta de alto valor operativo para la clasificación en tiempo real cuando genera lectura válida, siendo el sistema HPGPS su complemento natural en los ciclos donde la complejidad geológica del yacimiento impide la generación de información sensorial confiable.

4.1.6 Impacto de la integración HPGPS + Ore Sorting

El análisis del impacto combinado se desarrolló a partir de la integración de dos fuentes principales de información durante el periodo agosto 2025 – enero 2026: el sistema HPGPS orientado al control espacial del minado mediante el modelo de bloques, y el sistema Ore Sorting basado en la estimación de leyes en tiempo real a través de sensores XRF instalados en el cucharón de las palas en las Fases V y VI. De manera independiente, ambos sistemas

presentan limitaciones: el HPGPS depende de la resolución del modelo geológico, mientras que el Ore Sorting presenta restricciones asociadas a la respuesta sensorial en materiales heterogéneos tipo Skarn. Sin embargo, al integrarse dentro de la jerarquía de decisión de la plataforma R4M, compensan mutuamente dichas limitaciones generando un sistema más robusto para la clasificación del material.

Desde el punto de vista operativo, esta integración se materializó en una jerarquía de decisión donde el Ore Sorting constituyó la fuente primaria de clasificación en los ciclos con lectura válida disponible, y el HPGPS actuó como mecanismo de respaldo activo en los ciclos donde el sistema sensorial no generó información, apoyándose en el modelo de bloques y los polígonos de minado para garantizar la continuidad de la clasificación. Esta complementariedad entre ambos sistemas permitió evaluar de manera conjunta su efecto sobre los indicadores de la variable dependiente Y: factor de recuperación (FR), dilución operativa (D) y relación estéril/mineral (SR).

4.1.7 Impacto en la recuperación de mineral por HPGPS

Uno de los principales efectos de la integración de ambos sistemas fue que ante la ausencia de lecturas del Ore Sorting, la recuperación de material mineralizado se dio gracias al sistema HPGPS, el cual identificó mineral que anteriormente era clasificado como desmonte al no contar con respaldo sensorial disponible.

Tabla 20 Recuperación de mineral mediante HPGPS

Parámetro	Valor
Periodo evaluado	agosto 2025 – enero 2026
Mineral recuperado en desmonte	FR + 4.3%
Ley promedio Cu	0.22%

Nota: Resultados de eficiencia y recuperación de mineral mediante el sistema HPGPS.

Los resultados evidencian que en los ciclos donde el sistema Ore Sorting no generó lectura válida de ley, el sistema HPGPS asumió la clasificación del material apoyándose en el modelo de bloques y los polígonos de minado, permitiendo identificar material mineralizado dentro de zonas clasificadas como desmonte que no era detectable mediante métodos tradicionales de control. Este mecanismo de respaldo fue el responsable directo de un incremento del Factor de Recuperación (FR) de aproximadamente 4.3%, con mineral de ley promedio de 0.22% Cu durante el periodo de estudio — cifra consistente con mejoras reportadas en la literatura para sistemas de integración similares y demuestra que sin el sistema HPGPS dicho material habría sido enviado a botadero sin ser procesado.

4.1.8 Dilución operativa

La dilución operativa, entendida como la incorporación de material estéril dentro del mineral extraído, constituye uno de los principales indicadores de la eficiencia técnico–operacional del proceso de minado. Durante el periodo previo a la implementación del sistema integrado, los niveles de dilución en las Fases V y VI del tajo Constancia alcanzaron entre 10% y 13% en las zonas de transición geológica, superando el límite técnico del 9% establecido para la operación. Con la implementación de la jerarquía de decisión integrada entre el HPGPS y el Ore Sorting en la plataforma R4M, la dilución operativa se redujo por debajo del límite técnico del 9%, al garantizar que los ciclos sin lectura válida del Ore Sorting fueran clasificados correctamente mediante el HPGPS, evitando el envío de material estéril a planta.

Tabla 21 *Dilución operativa*

Escenario	Dilución (%)
Sistema tradicional	10 – 13%
Sistema (HPGPS)	< 9%

Nota: Comparativa cualitativa de la dilución entre el método convencional y el integrado

Esta reducción se asocia directamente a la continuidad de la clasificación garantizada por el sistema HPGPS en los 29,063 ciclos sin lectura sensorial, donde anteriormente el material era enviado a destino incorrecto por falta de información disponible, incrementando la dilución operativa de la unidad.

4.1.9 Relación estéril/mineral

Tabla 22 *Relación estéril*

Indicador	Valor
Relación inicial	0.72
Relación optimizada	0.58

Nota: Mejora en la ratio estéril/mineral (strip ratio) tras la optimización del sistema.

La reducción del SR de 0.72 a 0.58 t/t representa una mejora significativa en la eficiencia volumétrica del tajo, lo que implica que se requiere remover menor cantidad de material estéril por tonelada de mineral extraído. Esta optimización se traduce en una reducción de los costos de minado, consumo de combustible, desgaste de equipos y costos de disposición de desmonte en botaderos, mejorando la rentabilidad global de la operación.

La integración del sistema HPGPS con el sistema Ore Sorting permitió mejorar significativamente los indicadores operativos, evidenciando una mayor recuperación de mineral, una reducción de la dilución y una optimización en la relación estéril/mineral. Estos resultados demuestran que la implementación de tecnologías de alta precisión constituye una estrategia efectiva para mejorar la eficiencia del proceso de minado en yacimientos con alta variabilidad geológica.

A partir de los resultados obtenidos en los objetivos anteriores, se determinó que la integración de los sistemas permitió reducir los errores de clasificación identificados en el sistema Ore Sorting, particularmente en zonas de contacto mineral–desmonte.

En este contexto:

- El HPGPS permitió definir con mayor precisión los límites del mineral
- El Ore Sorting permitió validar la calidad del material en tiempo real

Esta combinación redujo la probabilidad de enviar desmonte a planta, disminuyendo la dilución y mejorando la calidad del material procesado.

Asimismo, se observó que la reducción de la dilución se encuentra directamente asociada a la disminución de errores tipo II (desmonte clasificado como mineral), identificados previamente en el análisis del sistema Ore Sorting.

4.1.10 Impacto en indicadores operativos (GAP productivo)

Se identificó una brecha significativa entre la producción real y la producción planificada, alcanzando un déficit respecto del presupuesto.

Este resultado evidencia la existencia de pérdidas operativas asociadas a una clasificación ineficiente del material, particularmente en zonas de contacto geológico.

En este contexto, la implementación del sistema integrado HPGPS + Ore Sorting representa una estrategia efectiva para reducir esta brecha, al mejorar la precisión en la separación entre mineral y desmonte y optimizar la recuperación de material económico.

Discusión de resultados

4.2.1 Determinar el efecto de integrar los sistemas Ore Sorting y HPGPS en la reducción de la dilución operativa y la mejora del factor de recuperación de mineral.

Los resultados demostraron que la integración de los sistemas Ore Sorting y HPGPS tuvo un efecto positivo y cuantificable sobre la eficiencia técnico-operacional de la Unidad Minera Constancia durante el periodo agosto 2025 – enero 2026, evidenciándose mejoras simultáneas en los tres indicadores de la variable dependiente Y. El elemento central que hizo posible estos resultados fue la jerarquía de decisión implementada en la plataforma R4M, que garantizó que el 100% de los ciclos operativos de las Fases V y VI contaran con una fuente válida de clasificación, sin depender exclusivamente de ninguno de los dos sistemas de manera individual.

Estos hallazgos son consistentes con lo evidenciado por Câmara et al. (2019), quienes demostraron que combinar polígonos de minado con modelos de leyes mejora la adherencia entre el plan diseñado y la ejecución real, reduciendo la dilución operativa, adherencia que en la presente investigación se materializó a través de la jerarquía de decisión de la plataforma R4M. Asimismo, MineSense Technologies (2024) reportó mejoras en recuperación mediante ShovelSense en la mina Copper Mountain; la presente investigación amplía ese aporte al demostrar que incorporar el HPGPS como respaldo activo cuando el Ore Sorting no genera lectura válida maximiza la recuperación de mineral bajo cualquier escenario operativo en el contexto geológico complejo del yacimiento tipo Skarn de Constancia.

4.2.2 Evaluar en qué medida el sistema HPGPS garantiza la continuidad de la clasificación del material en ciclos donde el Ore Sorting no genera lectura válida de ley.

Los resultados evidenciaron que el sistema HPGPS asumió la clasificación del material de los ciclos totales analizados (29,063 de 93,750 ciclos), alcanzando una coherencia del 91.1% en la asignación correcta del destino del material en ausencia de lectura sensorial. Este hallazgo revela que en casi un tercio de la operación la clasificación dependió exclusivamente del posicionamiento de alta precisión y el modelo de bloques, sin ningún respaldo sensorial

disponible, confirmando que el HPGPS constituye una herramienta fundamental para garantizar la continuidad operativa del proceso de clasificación bajo condiciones de incertidumbre geológica propias del yacimiento tipo Skarn de Constancia.

El porcentaje de error del 8.9% no constituye una falla del sistema sino una limitación inherente al yacimiento tipo Skarn, donde la resolución del modelo de bloques de 10m x 10m x 15m no puede capturar la variabilidad de ley a escala de balde en zonas de contacto geológico, condición considerada dentro de rangos aceptables para operaciones mineras a cielo abierto. Estos resultados son consistentes con lo planteado por Huaman y Mamani (2020), quienes identificaron que la dependencia exclusiva del modelo de bloques para la clasificación del material incrementa el riesgo de dilución no planificada en yacimientos con alta variabilidad litológica, y propusieron la implementación de protocolos que combinen información geológica actualizada con herramientas de control operativo en tiempo real. En la presente investigación, el sistema HPGPS cumple precisamente ese rol, combinando la información del modelo de bloques con el posicionamiento centimétrico del cucharón durante el ciclo de carguío, reduciendo la incertidumbre en la clasificación del material en las Fases V y VI. Asimismo, los hallazgos concuerdan con lo propuesto por Groundhog Apps (2024), quienes evidenciaron que la tecnología HPGPS permite alcanzar precisión centimétrica en la delimitación de zonas mineralizadas durante el proceso de carguío, garantizando que la excavación se ejecute dentro de los límites definidos por los polígonos de minado, lo que en la presente investigación se tradujo en la coherencia del 91.1% alcanzada en los ciclos sin lectura sensorial, resultado especialmente significativo considerando que corresponden a escenarios de mayor incertidumbre operativa.

4.2.3 Cuantificar la mejora del factor de recuperación mediante el sistema HPGPS en zonas previamente clasificadas como desmonte por ausencia de lectura sensorial.

Los resultados cuantificaron que el sistema HPGPS, actuando como mecanismo de respaldo en los ciclos sin lectura válida del Ore Sorting, permitió incrementar el Factor de Recuperación (FR) en aproximadamente 4.3%, identificando mineral con una ley promedio de 0.22% Cu en zonas previamente clasificadas como desmonte durante el periodo agosto 2025 – enero 2026. Lo más relevante de este resultado es que este mineral era invisible para la operación convencional: sin el HPGPS como respaldo, estos ciclos habrían sido clasificados sin información geológica precisa, enviando ese mineral a botadero de manera sistemática. La tendencia creciente mensual del Factor de Recuperación alcanzó su punto máximo en diciembre de 2025, confirmando que el impacto del sistema se consolidó progresivamente a lo largo del periodo de estudio, con una ley promedio que se mantuvo por encima de la ley de corte de Cu, confirmando el valor económico real del material recuperado.

Estos resultados son coherentes con lo reportado por Mollehuanca y Quispe Cárdenas (2025), quienes demostraron que la reconciliación de polígonos de minado en la propia Mina Constancia permite identificar desviaciones entre el plan de minado y la ejecución real, constituyendo una herramienta clave para el control de la calidad del material extraído y la reducción de pérdidas operativas. La presente investigación va un paso más allá al ejecutar esa reconciliación en tiempo real durante el ciclo de carguío, permitiendo corregir la asignación del destino antes de que el material sea transportado, lo que representa una ventaja operativa significativa respecto a los enfoques retrospectivos. Del mismo modo, los hallazgos concuerdan con lo evidenciado por Faraj et al. (2022), quienes demostraron que la discretización de bloques a nivel de camión permite cuantificar el valor generado por la

clasificación masiva tanto en recuperación de mineral como en reducción de dilución, metodología que en la presente investigación se materializó en la cuantificación directa de las toneladas recuperadas mediante el HPGPS en zonas de desmonte de las Fases V y VI, demostrando el impacto directo y cuantificable del sistema sobre los indicadores de eficiencia técnico-operacional de la operación.

4.2.4 Analizar cómo influye la jerarquía de decisión integrada entre el sistema

HPGPS y el Ore Sorting en la correcta asignación del destino del material en el frente de carguío.

Los resultados evidenciaron que la jerarquía de decisión integrada en la plataforma R4M constituye el elemento diferenciador de la presente investigación respecto a estudios previos sobre el uso individual de cada tecnología. Su aporte no está en mejorar el desempeño del Ore Sorting ni del HPGPS de manera aislada, sino en garantizar que siempre exista una fuente de información válida para cada ciclo de carguío, priorizando la lectura sensorial cuando está disponible en el 69% de los ciclos y activando el posicionamiento de alta precisión como respaldo en el 31% restante donde el sistema sensorial no generó información válida. Esta continuidad operativa sin brechas de información fue lo que permitió reducir la dilución por debajo del 9% y optimizar el SR de 0.72 a 0.58 t/t durante el periodo de estudio.

Estos resultados son consistentes con lo planteado por Faraj, Ortiz y Arnal (2025), quienes propusieron la integración del ShovelSense con el FMS para redirigir automáticamente los camiones al destino correcto, demostrando que genera valor cuantificable tanto por recuperación de mineral como por reducción de dilución. La presente investigación representa un avance respecto a ese esquema al incorporar el HPGPS como fuente de respaldo cuando el sensor no genera información, cerrando la brecha operativa que existe en los ciclos sin lectura sensorial y garantizando la continuidad de la clasificación en el 100% de los ciclos operativos. Asimismo, los hallazgos concuerdan con lo propuesto por Câmara et al. (2019), quienes

plantean que la incorporación de múltiples fuentes de información en la planificación operativa permite ajustar los planes de manera dinámica reduciendo la dilución. En la presente investigación, esta dinámica se ejecutó en tiempo real mediante la jerarquía de decisión de la plataforma R4M, donde la información geológica del HPGPS y la información sensorial del Ore Sorting se complementaron secuencialmente para optimizar la asignación del destino del material en cada ciclo de carguío de las Fases V y VI, demostrando que es técnicamente viable y económicamente rentable en un yacimiento tipo Skarn de alta variabilidad geológica como Constancia.

CONCLUSIONES

1. Se determinó que la integración de los sistemas Ore Sorting y HPGPS redujo la dilución operativa y mejoró la recuperación de mineral en las Fases V y VI de la Unidad Minera Constancia – Hudbay durante el periodo agosto 2025 – enero 2026, mediante una jerarquía de decisión que combinó la información espacial del modelo de bloques con la estimación sensorial de leyes en tiempo real que garantizó clasificación válida en el 100% de los ciclos operativos. Reduciendo la dilución operativa por debajo del límite técnico del 9% y optimizando la relación estéril/mineral de 0.72 a 0.58 t/t.
2. Se evaluó que el sistema HPGPS garantizó la continuidad de la clasificación del material en los ciclos totales (29,063 de 93,750), alcanzando una coherencia del 91.1% en la asignación correcta del destino del material en ausencia de lectura sensorial. Este resultado confirma que el HPGPS aseguró la continuidad de la clasificación operativa bajo condiciones de incertidumbre geológica, con un margen de error del 8.9% atribuible a la variabilidad litológica inherente al yacimiento tipo Skarn, considerado dentro de rangos aceptables para operaciones a cielo abierto.
3. Se cuantificó que el sistema HPGPS, actuando como mecanismo de respaldo en los ciclos sin lecturas válidas del Ore Sorting, contribuyó directamente a un incremento del Factor de Recuperación (FR) de aproximadamente 4.3%, con mineral de ley promedio de 0.22% Cu en zonas de contacto mineral–desmonte. Estos indicadores demuestran el impacto directo y cuantificable del sistema en la eficiencia técnico–operacional de la operación.
4. Se analizó que la jerarquía de decisión integrada entre el sistema HPGPS y el Ore Sorting en la plataforma R4M mejoró la correcta asignación del destino del material en el frente de carguío durante el periodo de estudio, operando bajo el principio de priorizar la lectura sensorial cuando está disponible (69% de los ciclos) y activar el HPGPS como respaldo cuando el Ore Sorting no genera información válida (31% de los ciclos). Esta

complementariedad sin brechas de información fue el elemento diferenciador de la integración respecto al uso individual de cada sistema, siendo la base que permitió alcanzar los indicadores de eficiencia reportados en el periodo de estudio.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda implementar de manera permanente y extender la integración de los sistemas HPGPS y Ore Sorting a todos los frentes de minado de la Unidad Minera Constancia, consolidando la jerarquía de decisión de la plataforma R4M como protocolo operativo estándar. Esta integración debe incorporarse en los procedimientos operativos formales de la operación, asegurando su sostenibilidad y escalabilidad hacia las fases futuras del tajo con características geológicas similares al yacimiento tipo Skarn.
2. Se recomienda mantener la actualización continua del modelo de bloques de corto plazo y la calibración periódica de los receptores y antenas HPGPS instalados en los equipos de carguío, con el fin de sostener y mejorar los niveles de coherencia alcanzados del 91.1% en la asignación correcta del destino del material. Asimismo, se sugiere capacitar al personal operativo y de despacho en la interpretación de los ciclos clasificados mediante HPGPS, a fin de comprender la lógica de respaldo del sistema y actuar oportunamente ante las alertas operativas generadas.
3. Se recomienda implementar un programa de monitoreo continuo de las toneladas de mineral recuperado mediante el sistema HPGPS en zonas clasificadas como desmonte, utilizando los reportes del sistema FMS y la plataforma R4M como fuentes de seguimiento mensual. Asimismo, se sugiere extender el análisis de recuperación de mineral a las fases futuras del tajo Constancia, aprovechando la metodología desarrollada en la presente investigación para cuantificar el impacto del sistema HPGPS antes del inicio de cada nueva fase operativa.
4. Se recomienda optimizar continuamente la jerarquía de decisión integrada de la plataforma R4M mediante la calibración periódica de los sensores XRF del sistema Ore Sorting, especialmente en zonas con leyes cercanas a la ley de corte de Cu donde la probabilidad de ausencia de lectura válida es mayor. Asimismo, se sugiere desarrollar indicadores de desempeño específicos que permitan monitorear en tiempo real la proporción de ciclos

clasificados por cada fuente de decisión y el impacto acumulado en la recuperación de mineral y dilución, con el fin de realizar ajustes operativos oportunos en la jerarquía de decisión.

BIBLIOGRAFÍA

- Araya, M., Orellana, F., & Peña, R. (2021). Characterization of ore sorting systems in open pit copper mining operations. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(4), 621–630. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.03.008>
- Câmara, T. R., Leal, R. S., Peroni, R. L., & Capponi, L. N. (2019). Controlling operational dilution in open-pit mining. *Mining Technology*, 128(1). <https://doi.org/10.1080/25726668.2018.1470275>
- Davenport, T. H., & Harris, J. G. (2007). *Competing on analytics: The new science of winning*. Harvard Business Press.
- Faraj, R., Ortiz, J., & Arnal, J. (2022). Data driven approaches for estimating bulk ore sorting value. *GeoMet*, Queen's University. <https://geomet.engineering.queensu.ca/wp-content/uploads/2022-07-Faraj-Bulk-Ore-Sorting-web.pdf>
- Faraj, F., Ortiz, J., & Arnal, J. (2025). Data driven block discretisation method for predicting the bulk ore sorting benefits applied at distinctly heterogeneous open pit mines. *Mining Technology*, SAGE Journals. <https://doi.org/10.1177/25726668251323986>
- Groundhog Apps. (2024). Harnessing high precision GPS for enhanced ore quality control in open-pit mines. Groundhog Apps. <https://groundhogapps.com>
- Hartman, H., & Mutmanský, J. (2002). *Introductory mining engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Huaman, J. M., & Mamani, W. (2020). Factores que contribuyen a la dilución mineral en operaciones mineras a tajo abierto: una revisión de la literatura científica [Trabajo de investigación, Universidad Privada del Norte]. Repositorio UPN. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/23494>

- Hustrulid, W., & Kuchta, M. (2006). Open pit mine planning and design (2nd ed.). Taylor & Francis.
- Lane, K. F. (1988). The economic definition of ore: Cut-off grades in theory and practice. Mining Journal Books.
- MineSense Technologies. (2024). Copper Mountain Mine case study. MineSense Technologies Ltd. <https://minesense.com/wp-content/uploads/2024/03/MineSense-Copper-Mountain-Case-Study-2-2.pdf>
- Mollehuanca Pablo, A. R., & Quispe Cárdenas, J. (2025). Reconciliación de polígonos de minado en la mina Constancia, provincia de Chumbivilcas, Cusco [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio UNSAAC.
- Sinclair, A. J., & Blackwell, G. H. (2002). Applied mineral inventory estimation. Cambridge University Press.

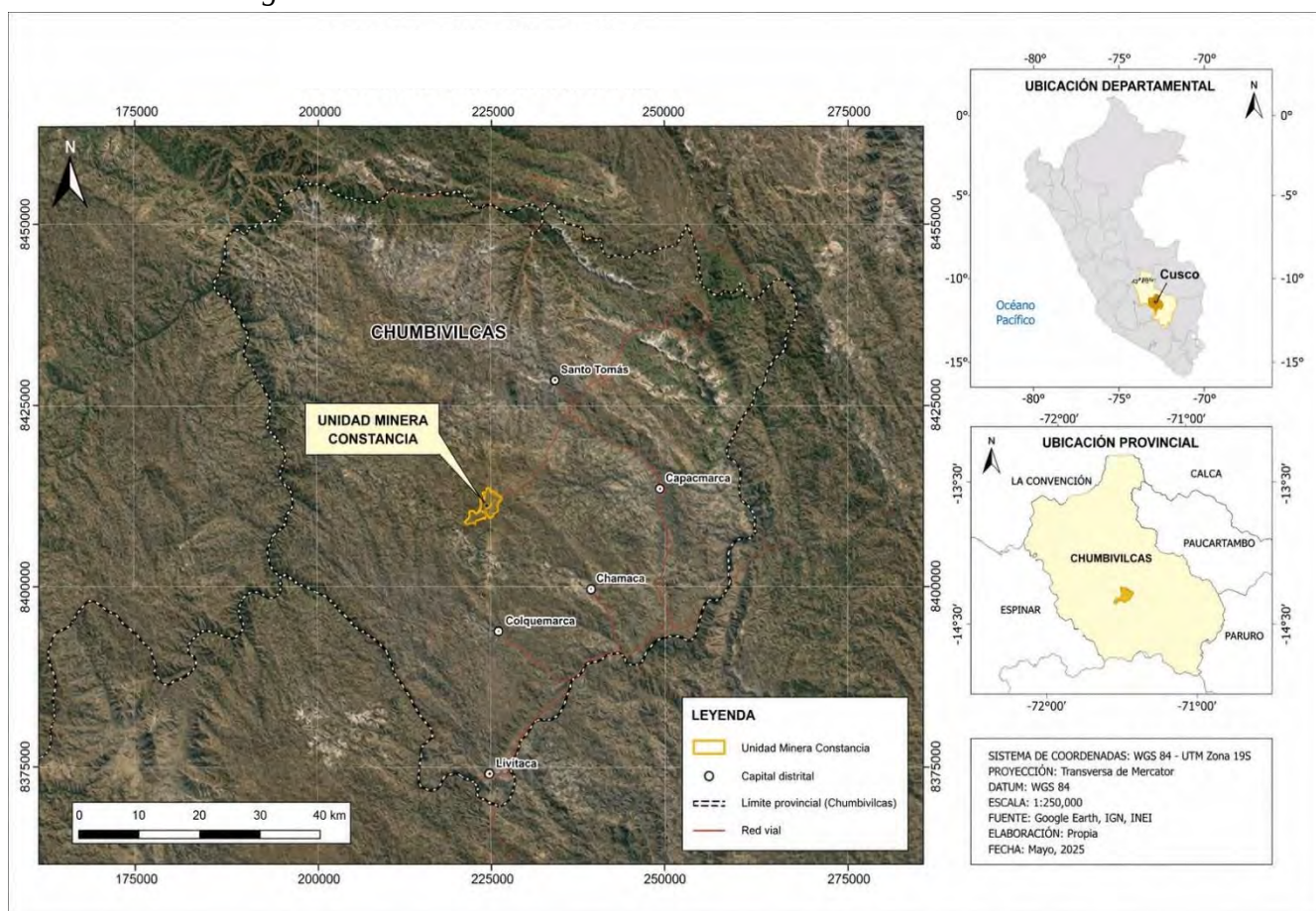
ANEXOS

ANEXO 01. Ámbito de estudio de la investigación

1.1. Ubicación geográfica y accesibilidad

La Unidad Minera Constancia, operada por Hudbay Minerals Inc., se encuentra en los distritos de Chamaca, Livitaca y Velille, provincia de Chumbivilcas, región Cusco, al sur del Perú. El yacimiento se asienta en la cordillera andina a una altitud que oscila entre 4,000 y 4,500 m.s.n.m., coordenadas de latitud -14.4618543 y longitud -71.7679385, en un paisaje de puna altoandina que combina amplias planicies, quebradas y formaciones rocosas características de esta franja altitudinal.

Figura 13: Ubicación satelital de la Unidad Minera Constancia.



Fuente: Hudbay Minerals Inc.

La operación abarca un total de 66 concesiones mineras que cubren aproximadamente 43,536 hectáreas, incluyendo los depósitos Constancia y Pampacancha, así como las

Figura 14: Mapa de Ubicación geográfica de la Unidad Minera

Ucayali

PERU

BRAZIL

ACOMAYO

ASURU



El acceso a la unidad minera se realiza por dos rutas terrestres principales. La primera

La infraestructura vial que conecta la mina con los centros urbanos está compuesta por carreteras afirmadas y tramos parcialmente asfaltados, lo que permite la movilización continua de equipos, insumos y personal durante los 365 días del año. Al interior de la operación, la mina cuenta con vías internas debidamente señalizadas y mantenidas que conectan el tajo con la planta concentradora, los botaderos de desmonte, el área de mantenimiento y las instalaciones administrativas y de bienestar del personal.

1.1.2. Clima y condiciones ambientales

Por su localización en la puna altoandina, la Unidad Minera Constancia presenta un clima bastante variado a lo largo del año. La temperatura oscila en promedio entre -2 °C y 25 °C, con posibilidad de alcanzar valores por debajo de -5 °C durante las madrugadas de los meses de invierno, o superar los 26 °C en los días más cálidos. La temporada más lluviosa se extiende de noviembre a marzo, con probabilidades superiores al 25% de lluvia por día, mientras que la estación seca abarca de marzo a noviembre, siendo junio el mes con menor precipitación y mayor disponibilidad de luz solar.

En términos de viento, la temporada más ventosa dura de junio a octubre, con velocidades promedio que superan los 8.5 km/h. La humedad relativa mínima promedio oscila entre 55% en septiembre y 65% en marzo. Estas condiciones climáticas imponen desafíos operativos importantes, especialmente durante la temporada de lluvias, donde la gestión de las pistas de acarreo y la estabilidad de las bermas del tajo requieren atención permanente.

1.1.3. Flora y fauna del área de influencia

El entorno de la Unidad Minera Constancia alberga una diversidad biológica característica de los ecosistemas de puna altoandina. En cuanto a flora, se han registrado 370 especies divididas en 69 familias y 208 géneros, siendo las familias Asteraceae y Poaceae las más representativas. Las formaciones vegetales predominantes incluyen bofedales, céspedes de puna, pajonales, matorrales y vegetación de roquedal, con especies como *Plantago tubulosa*,

Muhlenbergia peruviana, Calamagrostis recta y Festuca dolichophylla como las de mayor abundancia relativa.

En cuanto a fauna, las evaluaciones en el área han identificado representantes de anfibios del orden Anura, pertenecientes a las familias Bufonidae, Hemiphractidae, Telmatobiidae y Leptodactylidae, así como reptiles del orden Squamata de las familias Colubridae, Leptotyphlopidae y Liolaemidae. Los ecosistemas de pastizal de puna y pajonal concentran la mayor diversidad de especies. Hudbay realiza monitoreos de biodiversidad de manera periódica y aplica medidas de manejo ambiental orientadas a reducir los impactos de la operación sobre estos ecosistemas.

1.2. Historia y descripción general de la operación

La Unidad Minera Constancia es una de las principales productoras de cobre en el Perú, representando aproximadamente el 5% de la producción nacional del metal. La operación es propiedad al 100% de Hudbay Minerals Inc., empresa minera canadiense con sede en Toronto, y es catalogada como una de las minas de cobre sulfurado a cielo abierto de menor costo operativo en toda América del Sur.

La planta concentradora opera con una capacidad nominal de 90,000 toneladas de mineral por día, con una disponibilidad física del 94%, y ha operado consistentemente por encima de su capacidad de diseño desde el inicio de la producción comercial en 2015. En 2024, la operación procesó 29.5 millones de toneladas de mineral, produciendo aproximadamente 99,000 toneladas de cobre fino junto con subproductos de oro, plata y molibdeno.

Tabla 23: Producción histórica de metales – Unidad Minera Constancia (2019–2024)

Año	Cu (t)	Au (oz)	Ag (oz)	Mo (t)
2019	113,825	50,500	1,700,000	1,800
2020	94,200	43,200	1,450,000	1,500
2021	107,500	71,000	1,800,000	1,600
2022	115,300	89,500	2,100,000	1,750
2023	118,200	102,000	2,250,000	1,900
2024	99,000	88,000	1,950,000	1,300

Fuente: Elaboración propia con base en reportes anuales de Hudbay Minerals Inc.

1.3. Descripción geológica del yacimiento

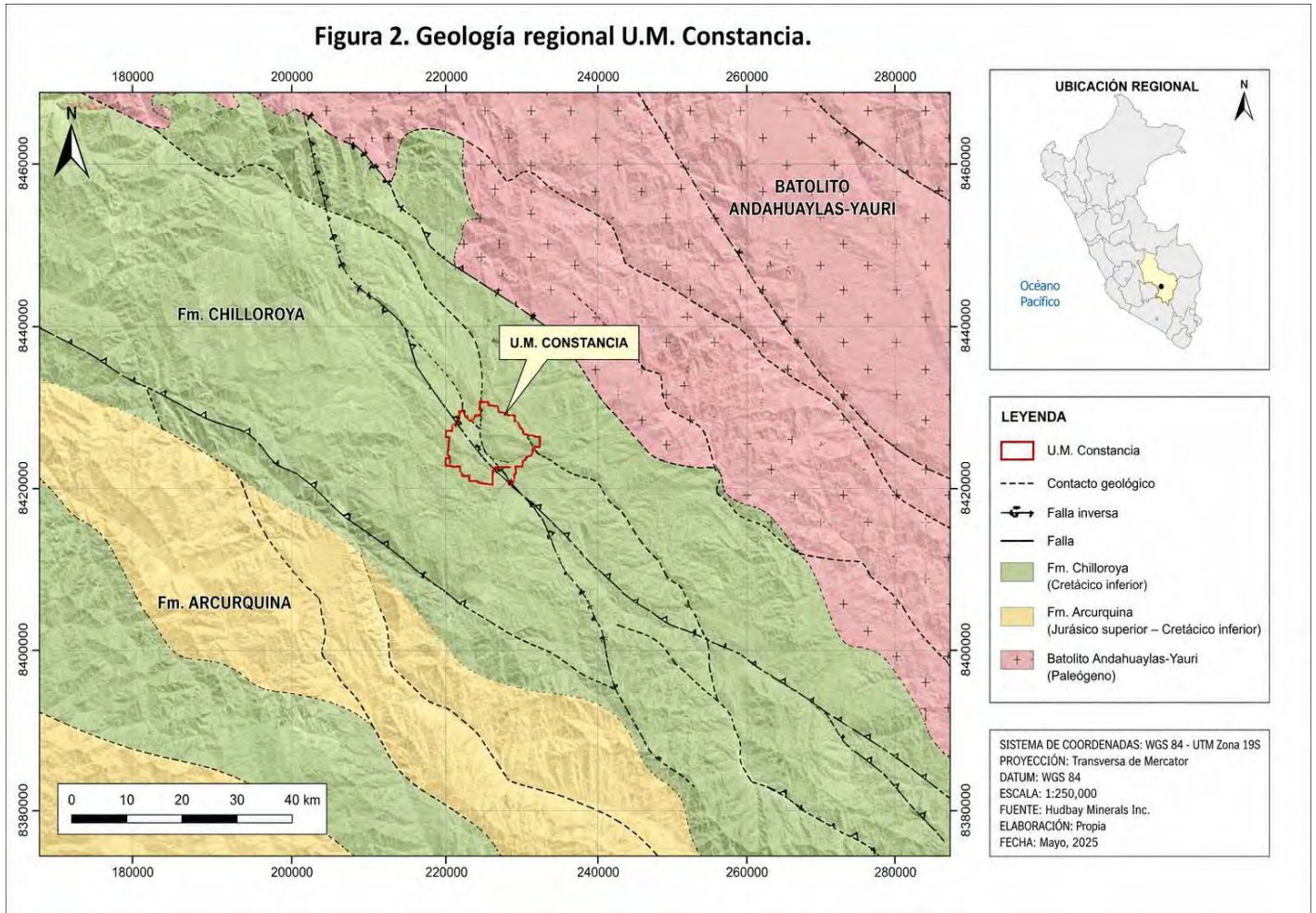
El yacimiento Constancia se ubica en los andes surorientales del Perú, en el margen este del Batolito Andahuaylas-Yauri, aproximadamente a 3 km al sureste de la antigua mina Katanga. Corresponde a un sistema de pórfido de cobre-molibdeno (Cu-Mo-Au) con componente Skarn, clasificación que determina en gran medida la complejidad geológica y operativa que caracteriza a la operación y que constituye el contexto central de la presente investigación.

1.3.1. Geología regional

Las rocas más antiguas del área son areniscas de la Formación Chilloroya del Cretácico Inferior, compuestas por materiales de grano medio de colores blanco, rojo, violeta y gris, con intercalaciones de esquistos rojizos. Sobre esta unidad se asienta la Formación Arcurquina, también denominada Formación Ferrobamba, que en contacto con rocas intrusivas se transforma en mármol o en skarn de piroxeno-diópsido-granate-magnetita-epidota. El Batolito Andahuaylas-Yauri, de composición diorítica-granodiorítica, constituye el basamento

intrusivo del depósito e intruye todas las litologías sedimentarias del área. Los sedimentos cuaternarios, incluyendo depósitos glaciales y aluviales, cubren los márgenes norte y este del depósito.

Figura 15: Geología Regional de la Unidad Minera



Fuente: Hudbay Minerals Inc.

1.3.2. Geología local y litología

La litología del yacimiento está dominada por múltiples fases de intrusión monzonítica y pórfido monzonítico. Se reconocen al menos cuatro etapas intrusivas principales. El Pórfido Monzonítico 1 (MP1) representa el stock principal de Cerro Constancia y concentra la mayor mineralización del sistema porfírico, con abundantes fenocristales de plagioclasa y hornblenda. La Micro Monzonita Porfírica (MMP) presenta textura de grano fino con cristales de

plagioclasa, biotita y magnetita. El Pórfido Monzonítico de Cuarzo (QMP) se presenta como diques norte-sur a noroeste de hasta 60 m de ancho, sin mineralización asociada. El Pórfido Monzonítico 2 (MP2) aparece como diques de hasta 150 m de ancho, con descenso marcado hacia el este.

La alteración hidrotermal se expresa en cuatro tipos. La alteración potásica incluye ortosa y biotita secundaria, vetillas tipo A y B, magnetita y mineralización de calcopirita, bornita y molibdenita-pirita. La alteración propílica presenta epidota, clorita y calcita con mineralización de pirita y calcopirita. La alteración fílica comprende sericita-cuarzo-pirita con vetillas tipo D. Finalmente, la alteración tipo Skarn incluye granates, calcosilicatos y magnetita, con mineralización de calcopirita, galena y esfalerita.

1.3.3. Tipo de depósito Skarn y sus implicancias operativas

El componente Skarn del yacimiento Constancia se origina en el contacto entre los intrusivos monzoníticos y las calizas de la Formación Arcurquina, generando una roca metasomática de grano grueso compuesta por calcosilicatos como granates, piroxenos y anfíboles. En estos cuerpos de Skarn la mineralización se presenta de manera altamente irregular, con variaciones significativas en la ley de cobre que pueden superar el 0.3% Cu dentro de una misma unidad de minado, pasando abruptamente a zonas con leyes menores al 0.05% Cu en distancias de apenas algunos metros.

Esta irregularidad tiene implicancias técnicas directas en el proceso de clasificación del material durante el carguío. Los sensores XRF del sistema Ore Sorting pueden subestimar las leyes de cobre en presencia de minerales interferentes característicos del Skarn, como la magnetita, la pirrotita y los granates ferromagnesianos, que absorben o dispersan parte de la radiación emitida por el sensor, alterando el espectro de fluorescencia y generando lecturas de ley por debajo de los valores reales. Por esta razón, el sistema HPGPS, que se apoya en el

modelo de bloques geológico en lugar de en la lectura sensorial, resulta fundamental como mecanismo de respaldo en estas zonas.

1.3.4. Modelo de bloques y estimación de recursos

El modelo de bloques del yacimiento Constancia constituye la herramienta central para la planificación del minado, ya que representa de manera tridimensional los dominios mineralizados y las zonas de ley identificadas en el depósito. Cada bloque del modelo incorpora información geológica y de leyes que permite diferenciar los distintos tipos de roca presentes en el yacimiento, asignando parámetros específicos —como la densidad— según el grupo litológico predominante en cada sector. Esta diferenciación resulta fundamental en un depósito con la complejidad geológica de Constancia, donde conviven múltiples unidades de roca con comportamientos metalúrgicos y estructurales distintos, incluyendo zonas de alteración tipo Skarn que presentan mayor densidad y variabilidad en su respuesta sensorial.

La estimación de recursos se sustenta en un extenso programa de perforación diamantina, cuyas muestras compósitas se analizan a intervalos regulares a lo largo de cada sondaje. Para la interpolación de leyes entre los puntos de muestreo, se emplean métodos geoestadísticos ampliamente validados en la industria minera, entre ellos el Kriging ordinario y las técnicas de inverso a la distancia, que permiten construir un modelo de bloques confiable y representativo del comportamiento real del yacimiento. Esta metodología es consistente con los estándares internacionales de reporte de recursos y reservas minerales (NI 43-101), bajo los cuales Hudbay Minerals divulga públicamente la información técnica de sus operaciones.

De acuerdo con los reportes técnicos más recientes publicados por la compañía, las reservas minerales de Constancia superan los 500 millones de toneladas, con una ley promedio de cobre cercana a 0.25%, lo que sustenta una vida útil de mina proyectada más allá del año 2040. Esta magnitud de reservas, sumada a la complejidad geológica del depósito, es precisamente lo que hace crítico contar con sistemas de clasificación de mineral robustos y

complementarios —como el Ore Sorting y el HPGPS— que permitan maximizar la recuperación del mineral económico y minimizar la dilución operativa a lo largo de la vida de la mina.

1.3.5. Geología estructural

La actividad estructural en el yacimiento Constancia ha jugado un papel determinante en el control de la distribución de la mineralización. Las principales estructuras de fractura tienen una orientación noreste, siendo la Falla de Barita la más reconocida, compuesta por una secuencia de vetas de falla paralelas que contienen sulfuros de metales base y barita. Un segundo sistema estructural de orientación norte-sur controla parte del depósito de San José y la mayoría de las brechas silicificadas del sistema. El tercer sistema, orientado de norte-noroeste a sur-sureste y representado principalmente por la Falla de Yanak, genera amplias zonas de gouge y roca triturada.

Estructuralmente, el yacimiento presenta fracturamiento de moderado a intenso, con fallas y discontinuidades que influyen en la estabilidad del macizo rocoso. Desde el punto de vista geotécnico, el tajo Constancia ha sido dividido en cuatro dominios geotécnicos: Dominio A (roca sedimentaria), Dominio B-I (roca intrusiva poco fallada), Dominio B-II (roca intrusiva fuertemente fallada) y Dominio C (sobrecarga o cobertura). La calidad del macizo rocoso varía de pobre a aceptable según la clasificación geomecánica RMR de Bieniawski.

1.4. Operaciones mineras

Las operaciones en la Unidad Minera Constancia se desarrollan mediante el método de minería a cielo abierto por bancos descendentes, con turnos de 12 horas durante los 365 días del año. El ciclo de minado comprende cuatro etapas principales que se ejecutan de manera continua y coordinada.

Gráfico 17: Ciclo de minado en la Unidad Minera Constanca.



Fuente: Elaboración propia.

1.4.1. Fases del tajo y planificación del minado

El tajo Constanca se desarrolla en fases sucesivas de minado que permiten la extracción progresiva del mineral conforme avanza la profundidad. Cada fase es diseñada a partir del modelo de bloques geológico, considerando criterios técnicos, económicos y geotécnicos para definir los límites de extracción, los ángulos de talud y los polígonos de minado. Durante el periodo de estudio (agosto 2025 – enero 2026), las operaciones analizadas en la presente investigación se concentraron en las Fases V y VI del tajo, donde la complejidad litológica del contacto entre zonas de pórfido mineralizado y cuerpos de Skarn generó los mayores desafíos para la clasificación correcta del material.

En 2024, Hudbay incorporó una décima fase de minado al plan de vida de la mina tras completar estudios geotécnicos positivos en 2023, lo que extendió la vida útil de la operación

en tres años adicionales. Esta expansión demuestra el potencial continuo del yacimiento y la importancia de optimizar la recuperación del mineral en cada fase para maximizar el valor económico del proyecto.

1.4.2. Perforación y voladura

La etapa de perforación se realiza mediante equipos de perforación rotatoria a percusión, generando mallas de perforación con espaciamiento de 7.5m x 8.5m y una longitud de taladro que varía según la altura del banco. El diámetro de perforación utilizado es de 10 7/8 pulgadas, con inclinación de los taladros para optimizar la fragmentación del material durante la voladura.

La voladura se ejecuta utilizando mezclas de ANFO y emulsión, con factores de carga que varían según el tipo de roca y el objetivo de fragmentación. El control de la voladura es un aspecto crítico en la operación, ya que el desplazamiento del material tras el disparo puede alterar las coordenadas originales de los polígonos de minado, generando uno de los tres factores de dilución no planificada identificados en la investigación.

1.4.3. Carguío y tecnologías de control

Las operaciones de carguío se realizan mediante palas hidráulicas Hitachi EX5600 de gran capacidad, con un balde de 28 m³ y un rendimiento de hasta 3,751 toneladas por hora. Cada pala está equipada con el sistema de posicionamiento de alta precisión HPGPS (Control Sense), cuya antena receptora se instala en la parte superior de la estructura del equipo, complementada con sensores de inclinación que permiten calcular la posición exacta del cucharón durante el ciclo de excavación. Adicionalmente, el sistema Ore Sorting ShovelSense se instala en el cucharón, con módulos sensores XRF que generan entre 140 y 210 lecturas por balde durante el llenado.

La integración de ambos sistemas en la plataforma R4M permite que, ante la ausencia de lectura válida del ShovelSense, el HPGPS asuma automáticamente la clasificación del

material apoyándose en el modelo de bloques geológico y los polígonos de minado. Esta jerarquía de decisión garantiza que ningún ciclo de carguío quede sin una asignación válida de destino, asegurando la continuidad operativa del proceso de clasificación.

Tabla 24: Jerarquía de integración tecnológica en la Unidad Minera Constancia

SISTEMA	FUNCIÓN	DATO APORTADO	PRIORIDAD
Ore Sorting (ShovelSense)	Lectura XRF en tiempo real por balde	Ley de Cu (%) estimado)	1° Fuente principal
HPGPS (Control Sense)	Posicionamiento centimétrico del cucharón	Ley de bloque (modelo geológico)	2° Respaldo activo
Polígonos de Minado	Límites geométricos del diseño de minado	Ley del polígono	3° Respaldo secundario
R4M (Plataforma)	Integración y jerarquía de decisión	Sugerencia de destino	Decisión final

Fuente: Elaboración propia.

1.4.4. Acarreo y gestión de flota

El transporte del material se realiza mediante camiones de acarreo CAT 793F de alto tonelaje, con una capacidad de carga de 227 toneladas y un rendimiento operativo de hasta 584 toneladas por hora. La flota de camiones opera bajo las indicaciones del sistema de gestión de flotas FMS, el cual asigna destinos en tiempo real en función de la clasificación del material determinada por el sistema R4M. Las rutas de acarreo conducen el material a dos destinos principales: la chancadora primaria para el mineral con ley superior a Cu, y el botadero de desmonte (WRF) para el material estéril o de baja ley.

A partir de julio de 2025, una empresa comunal de Chumbivilcas alquila el 100% de los equipos de carguío y acarreo utilizados en la operación, en el marco de la política de Hudbay de transferencia de servicios a las comunidades del entorno. Las empresas comunales

transportan actualmente el 35% del concentrado producido en la mina, siendo este uno de los programas de desarrollo comunitario más significativos de la operación.

1.5. Proceso de concentración

La planta concentradora de la Unidad Minera Constancia fue diseñada y construida por Ausenco bajo la modalidad EPCM (Engineering, Procurement and Construction Management), con una capacidad nominal de 90,000 toneladas por día y una disponibilidad física del 94%. Desde su puesta en marcha en 2015, la planta ha operado consistentemente por encima de su capacidad de diseño, consolidándose como uno de los procesos metalúrgicos más eficientes para el tratamiento de minerales de pórfido cuprífero en el Perú.

1.5.1. Etapas del proceso

El proceso inicia con el chancado primario, donde el mineral proveniente del tajo es reducido en una chancadora giratoria hasta un tamaño máximo de 125 mm. El mineral chancado se transfiere a un acopio (stockpile) con capacidad para almacenar el material y garantizar la continuidad de la alimentación a la planta ante variaciones en la producción del tajo. Desde el stockpile, el mineral se dosifica hacia los molinos de molienda.

La etapa de molienda comprende un molino SAG de 11.6 metros de diámetro y 28 MW de potencia, seguido de dos molinos de bolas de 16.4 MW de potencia cada uno. El producto de molienda pasa a los circuitos de flotación rougher y cleaner, donde se separan los sulfuros de cobre y molibdeno de la ganga estéril. La recuperación promedio de cobre en el proceso alcanza el 86%, con un grado de concentrado de cobre superior al 24% y un concentrado de molibdeno superior al 50% en contenido metálico.

Los tipos de mineral actualmente procesados en la concentradora incluyen mineral hipógeno, supérgeno, Skarn, mixto y de alto zinc, cada uno con respuestas metalúrgicas específicas que han requerido la optimización de los reactivos de flotación para cada tipo de

mena. Los productos finales, concentrado de cobre y concentrado de molibdeno, son transportados por carretera desde la mina hacia los puertos de embarque para su exportación.

Tabla 25: Diagrama simplificado del proceso de la planta concentradora Constancia.

CHANCADO PRIMARIO	STOCKPILE	MOLIENDA SAG	MOLIENDA BOLAS	FLOTACIÓN	CONCENTRADO
Chancadora giratoria P80: 125 mm	Acopio de mineral Capacidad: 60,000 t	Molino SAG Ø 11.6m 28 MW de potencia	2 molinos de bolas 16.4 MW c/u	Rougher + Cleaner Recuperación Cu	Cu Mo

Fuente: Elaboración propia con base en datos de Hudbay Minerals Inc.

1.6. Gestión ambiental y responsabilidad social

La Unidad Minera Constancia opera bajo un estricto marco de gestión ambiental y social que incluye el monitoreo periódico de la calidad del agua, aire y suelos en el área de influencia de la operación. Entre las iniciativas ambientales más destacadas se encuentra la implementación de un supresor de polvo en 10 kilómetros de vías de acceso, siendo Hudbay la primera empresa minera del sur del Perú en adoptar esta tecnología, que posteriormente fue adoptada por otras operaciones de la región.

En el ámbito de la gestión de colas, la operación cuenta con una instalación de depósito de relaves (Tailings Management Facility) que es monitoreada y gestionada de acuerdo con los estándares internacionales de la industria. La gestión del agua incluye sistemas de captación y recirculación que permiten reutilizar el agua de proceso, reduciendo la captación de fuentes naturales.

En el aspecto social, Hudbay ha contribuido con 15 millones de soles para la mejora y ampliación de los servicios de salud en la región, en colaboración con el Gobierno Regional de Cusco, además de asegurar cerca de 24 millones de soles para educación, desarrollo comunitario equitativo, generación de empleo y mejora de servicios de salud a través del programa Obras por Impuestos. La operación ha proporcionado más de 7,000 atenciones

médicas gratuitas en colaboración con la Red de Salud de Chumbivilcas y la Asociación Vida Perú.

1.7. Problemática operativa relacionada con la dilución

Durante las operaciones en las Fases V y VI del tajo Constancia durante el periodo agosto 2025 – enero 2026, se identificó como principal problemática operativa la presencia de dilución no planificada, originada por la incorporación de material estéril dentro del mineral enviado a planta. Los niveles de dilución registrados alcanzaron entre 10% y 13% en las fases de transición geológica, superando el límite técnico del 9% establecido para la operación y generando una desviación de 0.05 t/t adicionales en la relación estéril/mineral respecto al presupuesto planificado.

Esta situación fue el resultado de la interacción de tres factores principales:

La variabilidad geológica intrínseca del yacimiento tipo Skarn en las Fases V y VI, con contactos entre mineral y desmonte de geometría irregular y altamente variable en distancias cortas.

Las limitaciones del sistema Ore Sorting (ShovelSense) en zonas con presencia de minerales interferentes, donde los sensores XRF subestiman las leyes de cobre, generando ciclos de carguío sin lectura válida de ley que representaron el 31% del total de ciclos durante el periodo de estudio.

La incertidumbre en la delimitación espacial de los polígonos de minado en zonas de contacto, donde desviaciones menores en la ejecución del carguío generan incrementos significativos en la dilución operativa.

Los impactos directos identificados en la operación incluyeron la disminución de la ley promedio del mineral enviado a planta, el incremento de los costos de procesamiento por tonelada de mineral, la reducción de la recuperación de cobre fino y una brecha productiva de cobre fino del presupuesto establecido para el periodo.

Frente a esta problemática, la investigación propone y evalúa la integración del sistema HPGPS como mecanismo de respaldo activo ante la ausencia de lectura del Ore Sorting, estableciendo una jerarquía de decisión en la plataforma R4M que garantice la continuidad de la clasificación del material bajo cualquier escenario operativo y contribuya a la reducción de la dilución y mejora de la recuperación de mineral en las Fases V y VI durante el periodo de estudio.

ANEXO 02. Matriz de consistencia

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
TEMA: “MINADO DE ALTA PRECISIÓN POR BLOQUES (HPGPS) CON EL SISTEMA ORE SORTING, PARA UN CONTROL EN EL MINADO EN LA UNIDAD MINERA CONSTANCIA HUSBAY-CHUMBIVILCAS”				
FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	VARIABLES	INDICADORES
Problema General ¿Cuál es el efecto de integrar los sistemas Ore Sorting y Minado de Alta Precisión por Bloques (HPGPS) en la reducción de la dilución operativa y la mejora de la recuperación de mineral en la Unidad Minera Constancia – Husbay?	Objetivo General Determinar el efecto de integrar los sistemas Ore Sorting y Minado de Alta Precisión por Bloques (HPGPS) en la reducción de la dilución operativa y la mejora de la recuperación de mineral, mediante el análisis de los registros operativos del sistema FMS, en la Unidad Minera Constancia – Husbay.	Hipótesis General La integración de los sistemas Ore Sorting y Minado de Alta Precisión por Bloques (HPGPS) reduce la dilución operativa y mejora la recuperación de mineral en la Unidad Minera Constancia – Husbay.	Independientes: X ₁ : Sistema de Minado de Alta Precisión por Bloques (HPGPS) X ₂ : Sistema de Clasificación de Mineral Ore Sorting – ShovelSense) Dependiente: Y: Eficiencia Técnico–Operacional del Proceso Minero	Indicadores generales: - Factor de recuperación (%) - Dilución (%) - Relación estéril/mineral (t/t)
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas		
1. ¿En qué medida el sistema HPGPS garantiza la continuidad de la clasificación del material en ciclos donde el sistema Ore Sorting no genera lectura válida de ley?	1. Evaluar en qué medida el sistema HPGPS garantiza la continuidad de la clasificación del material en ciclos donde el sistema Ore Sorting no genera lectura válida de ley.	1. El sistema HPGPS garantiza la continuidad de la clasificación del material en los ciclos donde el Ore Sorting no genera lectura válida de ley, manteniendo la operación sin interrupciones en la asignación del destino del material.		
2. ¿Cuánto mineral es posible recuperar mediante el sistema HPGPS en zonas previamente clasificadas como desmonte por ausencia de lectura sensorial?	2. Cuantificar el mineral recuperado mediante el sistema HPGPS en zonas previamente clasificadas como desmonte por ausencia de lectura sensorial.	2. El sistema HPGPS permite recuperar mineral significativo en zonas clasificadas como desmonte por ausencia de lectura sensorial,		

		incrementando la recuperación de mineral de la operación.		
3. ¿Cómo influye la jerarquía de decisión integrada entre el sistema HPGPS y el Ore Sorting en la correcta asignación del destino del material en el frente de carguío?	3. Analizar cómo influye la jerarquía de decisión integrada entre el sistema HPGPS y el Ore Sorting en la correcta asignación del destino.	3. La jerarquía de decisión integrada entre el sistema HPGPS y el Ore Sorting mejora la correcta asignación del destino del material en el frente de carguío.		

ANEXO 04. Registro Fotográfico

Vista panorámica del Tajo Constancia – Fases de minado



Operación de carguío PH003 en fase V del Tajo Constancia



Capacitación a despachadores de flota para las acciones correspondientes



Operación de carguío PH002 en fase VI del Tajo Constanica



Calibración del sistema de alta precisión HPGPS



Revision de componente del sistema Ore Sorting (Shovelsense)



Perforadora de producción - Constanica



Camión minero CAT 793F

