UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PERFORACIÓN DE TALADROS DE PRODUCCION CON PIT VIPER 351 EN MODALIDAD SEMI AUTÓNOMA EN LA UNIDAD MINERA QUELLAVECO

PRESENTADO POR:

BACH. MARY CIELO MIREYA GONZALES HUMIRE

PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA – PERÚ 2025

UNAM
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

Folio N° 063

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : ☐

Trabajo de Suficiencia Profesional : ☒

Otro: ..... : ☐

II. Documento de aprobación para la sustentación:
Resolución de Consejo de Facultad N° 168-2025-CF-FAIN-UNAM
Fecha: 28-09-2025

III. El Jurado ha dictaminado la (el) Trabajo de Suficiencia Profesional, TITULADO:
"OPTIMISACION DEL PROCESO DE PERFORACIÓN DE TALADROS DE PRODUCCIÓN CON PIT VIPER 351 EN MODALIDAD SEMI AUTONOMA EN LA UNIDAD MINERA QUELLAVECO"

Bachiller: Mary Cielo Mireya GONZALES HUMIRE
Asesor Principal: Dr. Christ Jesus BARRIGA PARIA
Co-Asesor : .....

IV. Se dictamina:
Como: Aprobada por unanimidad la sustentación de manera:
Presencial ☒ Virtual ☐
Con nota: catorce (14) por lo que; Sí ☒ No ☐
Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las ..... horas, del 06 de octubre del año 2025 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
Dr. Arquímedes L. MARGAS LUQUE
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
Dra. Bertha S. VERA BARRIOS
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
Msc. Agapito FLORES JUSTO
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
Mary Cielo Mireya GONZALES HUMIRE
(Nombres y Apellidos)

DEDICATORIA

A mi familia por el apoyo incondicional que me brindaron, pero sobre todo a mi madre que me enseño que cada esfuerzo es fruto de la perseverancia para formarse en una persona profesional con valores, a mis compañeros de trabajo e ingenieros que me brindaron su apoyo y consejos para darme la confianza de seguir formándome como profesional.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional de Moquegua y a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por brindarme todos los conocimientos necesarios y por haber contribuido a mi formación profesional y ser partícipes de las diferentes etapas de mi proceso de aprendizaje esenciales para poder culminar con mis estudios con éxito a lo largo de estos años.

Al Dr. Ing. Christ Barriga Paria, por su asesoramiento y apoyo brindado en la dirección del presente trabajo de suficiencia profesional.

Al Ing. Ornela Calle, Al Ing. Ronald Quenaya por haberme brindado su tiempo, asesoramiento y por impartir experiencias y conocimientos de su vasta experiencia profesional.

Al área de Perforación y Voladura de la empresa Anglo American Quellaveco S.A, así como a las grandiosas personas que forman parte de ello, para llevar a cabo el presente trabajo de suficiencia profesional.

RESUMEN

El presente trabajo de suficiencia profesional tiene como objetivo principal la optimización del proceso de perforación mediante el uso de taladros Pit Viper 351 operando en modalidad semi autónoma en la Unidad Minera Quellaveco, ubicada en la región Moquegua, Perú. La minería moderna exige mayor eficiencia operativa, seguridad y reducción de costos, por lo que la implementación de tecnologías de automatización parcial se presenta como una estrategia clave en la mejora de los procesos mineros. El estudio se enfoca en el análisis de los indicadores operativos antes y después de la implementación de la modalidad semi autónoma, incluyendo la tasa de avance, utilización efectiva, tiempos muertos, y la productividad por turno. Se identifican las principales limitaciones del proceso tradicional y se propone un modelo de mejora continua basado en el uso eficiente de los recursos tecnológicos y humanos, acompañado de una capacitación técnica especializada. Los resultados obtenidos evidencian una mejora significativa en la eficiencia del proceso de perforación, reducción de errores operativos y mayor seguridad en la operación. Se concluye que la transición hacia tecnologías semi autónomas, acompañada de una adecuada gestión del cambio, representa un paso fundamental para elevar la competitividad y sostenibilidad de la operación minera.

Palabras clave: Perforación, Pit Viper 351, semi autonomía, minería, eficiencia operativa.

ABSTRACT

This professional proficiency project aims to optimize the drilling process at the Quellaveco Mining Unit through the use of Pit Viper 351 drills operating in a semi-autonomous mode. In a context where the mining industry demands greater efficiency, safety, and sustainability, the incorporation of partial automation technologies is presented as an effective strategy for improving operational processes. The study includes a comparative analysis of key performance indicators before and after implementing the semi-autonomous mode, such as penetration rate, effective equipment utilization, downtime, and productivity per shift. It also identifies the main limitations of the conventional drilling process and proposes an improvement model based on the integration of technology, change management, and specialized personnel training. The results show a significant improvement in drilling efficiency, a reduction in human errors, and enhanced operational safety. It is concluded that the application of semi-autonomous technologies—when supported by an adequate implementation strategy—directly contributes to the competitiveness and sustainability of mining operations.

Keywords: drilling, Pit Viper 351, semi-autonomy, mining, operational efficiency.

ÍNDICE

CAPÍTULO I 1

INTRODUCCIÓN 1

1.1 Trayectoria del autor 1

1.1.1 STRACON S.A. – Supervisor Técnico de Control de Equipos de Perforación (2021–2022) 1

1.1.2 Anglo American Quellaveco – Controlador de Equipos de Perforación desde Sala de Control (2022 – Actualidad) 2

1.1.3 Resumen de competencias desarrolladas 2

1.2 Descripción de la Empresa 3

1.3 Organigrama de la Empresa 6

1.4 Áreas y funciones desempeñadas 8

1.4.1 Áreas involucradas 8

1.4.2 Funciones desempeñadas 9

1.4.3 Parámetros de perforación y su eficiencia utilizados 10

CAPÍTULO II 13

DESCRIPCIÓN DE UNA ACTIVIDAD ESPECÍFICA 13

2.1 Introducción 13

2.2 Optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma 14

2.2.1 Control de flota de perforación autónoma Pit Viper 351D desde sala de control IOC para taladros de producción y perforación manual 15

2.2.2 Control de flota de perforación telerremoto Smart Roc D65 desde sala de control IOC para taladros de pre-corte y perforación manual desde cabina en situaciones criticas 18

2.2.3 Monitoreo e interpretación de los parámetros del funcionamiento de las perforadoras PV & SR para detectar si existe alguna anomalía durante la operación 20

2.2.4 Reportar inmediatamente las alertas del sistema de monitoreo PV & SR que indiquen una condición insegura durante la operación 22

2.2.5 Análisis y verificación de los planes diarios, semanales relacionados a los avances de producción..... 23

2.2.6 Análisis de Dashboard para identificar KPI por flotas de perforadoras 25

2.2.7 Elaboración de reportes diarios por flota PV y SR 26

CAPÍTULO III 28

ANTECEDENTES Y OBJETIVOS 28

3.1 Antecedentes 28

3.1.1 Antecedentes Internacionales 28

3.2 Objetivos 39

3.2.1 Objetivo General 39

3.2.2 Objetivos Específicos 39

3.3 Justificación 40

3.3.1 Justificación Teórica..... 40

3.3.2 Justificación Práctica 40

3.3.3 Justificación Metodológica 41

CAPÍTULO IV 42

RESULTADOS, INDICADORES Y APORTES 42

4.1 Introducción 42

4.2 Optimización Operativa: Desempeño, KPIs y Resultados en Quellaveco 43

4.2.1 Control de flota de perforación autónoma Pit Viper 351D desde sala de control IOC para taladros de producción y perforación manual 44

4.2.2 Control de flota de perforación telerremoto Smart Roc D65 desde sala de control IOC para taladros de pre-corte, y perforación manual desde cabina en situaciones criticas 45

4.2.3 Monitoreo e interpretación de los parámetros del funcionamiento de las perforadoras PV &

SR para detectar si existe alguna anomalía durante la operación 46

4.2.4 Reportar inmediatamente las alertas del sistema de monitoreo PV & SR que indiquen una condición insegura durante la operación..... 47

4.2.5 Análisis y verificación de los planes diarios, semanales relacionados a los avances de producción..... 48

4.2.6 Análisis de Dashboard para identificar KPI por flotas de perforadoras 49

4.2 7 Elaboración de reportes diarios por flota PV y SR 49

CAPÍTULO V 52

ASPECTOS COMPLEMENTARIOS Y RECOMENDACIONES..... 52

5.1 Aspectos complementarios..... 52

5.2 Recomendaciones..... 52

REFERENCIAS 54

ANEXOS..... 58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01 4

Mapa de ubicación de la Mina 4

Figura 02 6

Estructura organizacional regional y operativa de la compañía 6

Figura 03 16

Control de flota de perforación autónoma Pit Viper 351D desde sala de control IOC para taladros de producción y perforación manual 16

Figura 04 17

Diseño de malla de perforación 17

Figura 05 18

Vista del control de flota de taladros Pit Viper 351D (autónomos y manuales) desde la sala IOC 18

Figura 06 19

Control telerremoto de flota SmartROC D65 desde sala IOC y operación manual en condiciones adversas 19

Figura 07 20

Regla para uso de parámetros de perforación 20

Figura 08 21

Monitoreo e interpretación de parámetros operativos de perforadoras PV y SR 21

Figura 09.....22

Reporte inmediato de alertas del sistema de monitoreo PV y SR 22

Figura 10.....24

Revisión y validación de planes de producción diarios y semanales en función de los avances 24

Figura 11.....25

Evaluación de dashboard para la identificación de indicadores clave de desempeño (KPI) por flotas de perforadoras 25

Figura 12.....27

Generación de reportes diarios de desempeño por flotas de perforación PV y SR 27

Figura 13.....44

Flora PIT Viper KPIs D&B 44

Figura 14.....46

Flora SR D65 46

Figura 15.....47

Indicadores relevantes para monitoreo e interpretación.....47

Figura 16.....48

Resumen Semanal PV 351.....48

Figura 17.....50

Base de datos para la obtención de la velocidad promedio.....50

Figura 18.....51

Resumen Semanal PV 351.....51

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Trayectoria del autor

1.1.1 STRACON S.A. – Supervisor Técnico de Control de Equipos de Perforación (2021–2022)

Durante su etapa en STRACON, empresa contratista minera reconocida por sus operaciones en proyectos de gran envergadura, el autor desempeñó funciones clave en el área de perforación de producción en minería a tajo abierto. Las principales responsabilidades incluyeron:

- Monitoreo y control de flota de perforadoras (principalmente Pit Viper 351, PV 271 y FlexiROC), en coordinación con el área de operaciones y mantenimiento.
- Análisis diario de parámetros operativos, tiempos de ciclo, detenciones operativas, y condiciones de terreno (módulo de compresibilidad, dureza y fracturamiento de la roca).
- Implementación de buenas prácticas en seguridad operativa, como la verificación de zonas de riesgo, control de presencia de personas, y seguimiento a procedimientos de arranque/parada segura.
- Apoyo técnico para la optimización de la perforación, a través del análisis de KPIs (tiempo de perforación por metro, tasa de avance, disponibilidad mecánica).
- Coordinación con el equipo de geotecnia y voladura para asegurar cumplimiento de malla de perforación y especificaciones técnicas.
- Esta experiencia permitió al autor adquirir una base sólida en operación de campo, familiarizándose con los retos prácticos de la perforación en zonas de alta exigencia técnica.

1.1.2 Anglo American Quellaveco – Controlador de Equipos de Perforación desde Sala de Control (2022 – Actualidad)

A partir del año 2022, se concretiza la incorporación a Anglo American Quellaveco, asumiendo un rol especializado en el Control Centralizado de Taladros de Producción, dentro del marco de operaciones semi autónomas. Sus actividades incluyen la supervisión remota de taladros Pit Viper 351 a través del sistema de control digital de Anglo American (Connected Control Room), garantizando precisión en la ejecución de la malla de perforación. La validación de parámetros de operación como: presión de aire, velocidad de penetración, profundidad objetivo, y condiciones del terreno (formación, buzamiento y tipo de roca). El manejo de software de planificación y visualización (como Deswik, DrillOps, FMS y Fleet Management System), integrando datos en tiempo real desde los equipos a la sala de control.

La coordinación con los frentes de operación para la asignación eficiente de recursos, gestión de interferencias y optimización de turnos. Los reportes y análisis de indicadores de desempeño operacional: metros perforados por turno, ratio de eficiencia (ROP), % de precisión en perforación vertical y % de cumplimiento del plan. La participación en el proceso de mejora continua, proponiendo ajustes en parámetros de perforación y evaluación de desempeño del personal en campo. Y finalmente la capacitación y soporte técnico a nuevos operadores en el uso del sistema semi autónomo, fomentando la cultura de operación digital y segura.

1.1.3 Resumen de competencias desarrolladas

Gracias a estos puestos de trabajo, se ha podido desarrollar una visión integral de la perforación minera moderna, combinando conocimientos de campo con la aplicación de tecnologías digitales y automatización, alineadas con los estándares de minería 4.0.

- Control y monitoreo de equipos Pit Viper en modalidad remota y presencial.

  Interpretación de datos geomecánicos y operativos.

- Manejo de herramientas digitales aplicadas a perforación. Coordinación efectiva entre operación, mantenimiento y planificación.
- Alineamiento con estándares de seguridad, productividad y sostenibilidad minera.

1.2 Descripción de la Empresa

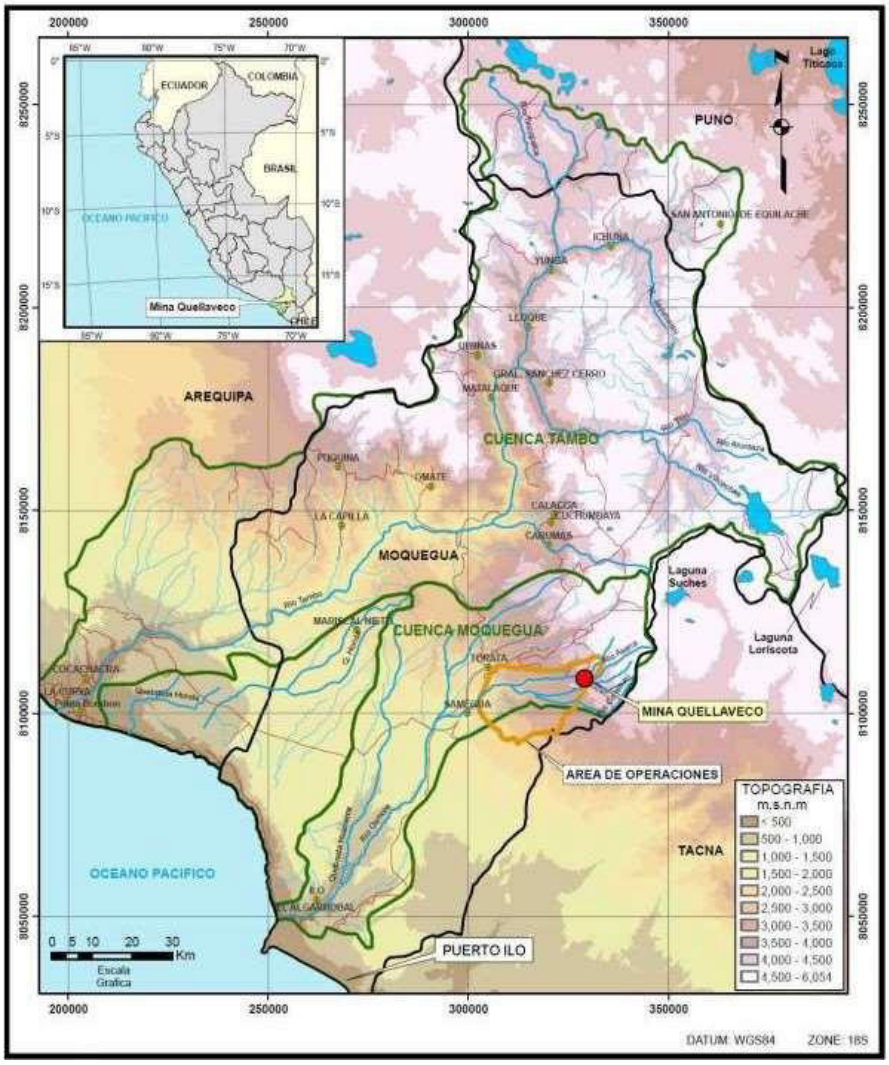
Anglo American, a través de su filial en la ciudad de Moquegua, distrito de Torata, lidera un proyecto de minería moderna con la mina Quellaveco, destacada por: una alta inversión y reservas significativas de cobre, avanzada digitalización, automatización y uso sostenible del agua y energía. Fuerte compromiso con el desarrollo social de la región, aunque enfrenta desafíos ambientales y comunitarios. Anglo American lidera a nivel mundial y los productos son los ingredientes esenciales en casi todos los aspectos de la vida moderna.

La empresa en la actualidad tiene más de 100 años en operaciones, la estrategia de la empresa es certificar, desenvolver y manejar una cartera de activos con recursos de larga duración y alta calidad, asegurando una adecuada protección del entorno social y el medio ambiente, y un respeto absoluto por las normativas locales, para entregar las mejores rentabilidades a los accionistas. Esto es posible aplicando prácticas y tecnologías innovadoras en pos de un objetivo común.

Antes de iniciar alguna actividad propia de la ingeniería en el terreno, los geólogos e los ingenieros trabajan juntos y usan sistemas de planificación minera virtual para diseñar el plan minero operativo y de construcción más efectivo, rentable y ecológicamente amigable con el ambiente donde se desarrollan las actividades. Estas actividades pueden llevar un tiempo considerable en terminar, según las complicaciones del yacimiento mineral, el ambiente del sitio, su ubicación en relación con el suministro de energía y electricidad, y la ruta para salir al mercado.

La mina Quellaveco, ubicada en la región Moquegua (Figura 01) y operada por Anglo American, es una de las unidades mineras más modernas del Perú, caracterizada por la incorporación de tecnologías de automatización en sus procesos extractivos. Desde 2021, Quellaveco ha integrado taladros de la línea Pit Viper 351, equipados con capacidades semi autónomas, dentro de su estrategia de digitalización y mejora continua en la fase de perforación.

Figura 01:
Mapa de ubicación de la Mina



Nota: Adaptado de https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/

Según Gustavson et al. (2005) el modelo administrativo corporativo adoptado por la empresa es el denominado "angloamericano", si bien este modelo ha sido objeto de amplio debate tanto en la literatura como entre los líderes empresariales, no existe una definición precisa de lo que los africanos subsaharianos entienden por este término, ni existe consenso más allá de que se trata de un modelo de consejo unitario.

No sólo planifica el ciclo de vida de la mina, sino que presta mucha atención a extender la mirada más allá para determinar la rehabilitación del sitio y los beneficios reales que las comunidades locales continuarán aprovechando. Las tecnologías que utilizamos para llevar a cabo tareas de planificación, construcción y rehabilitación nos ayudan a entender la situación desde el primer momento, lo cual minimiza nuestra huella ambiental al mismo tiempo que protege los recursos monetarios.

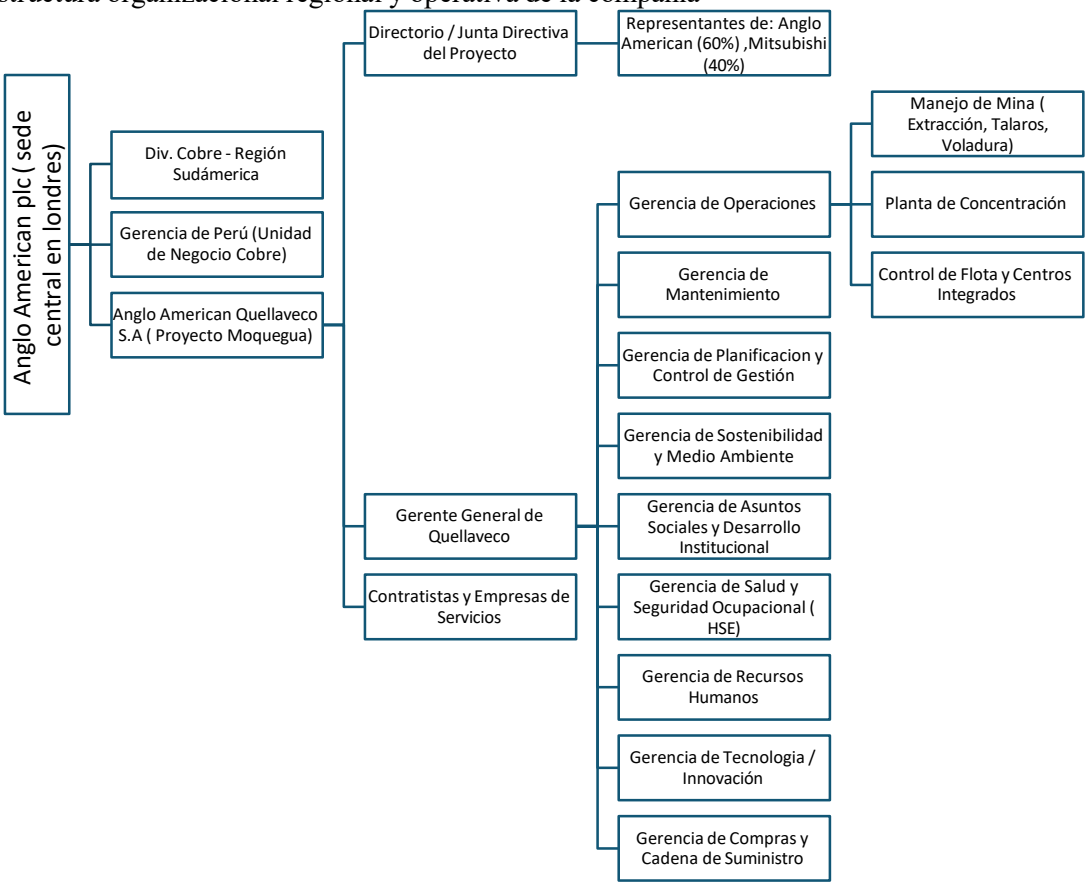
Para Angloamerican si bien la inclusión de las comunidades en los procesos de participación es objeto de una revisión bibliográfica, tanto científica como institucional, los mecanismos de retroalimentación multiescalar entre los territorios extractivos y la participación ciudadana siguen siendo poco comentados. Los estudios generalmente oponen una visión «normativa» y global de la participación ciudadana a un enfoque «centrado en los procesos» y local (Mazeaud, Nonjon, Parizet, 2016).

Para Angloamerican el primer enfoque enfatiza la condición o estado de no estar vinculado a un territorio específico o de no tener un territorio propio de los estándares participativos, ya que estos surgieron en las principales instituciones internacionales como parte de los mecanismos de gobernanza global destinados a la «regulación social de los mercados» (Jacquet, Pisani-Ferry, Tubiana, 2002, p. 203). El cuestionamiento de las políticas de ajuste estructural de las últimas décadas, el auge de la sociedad civil desde los 90s y la emergencia de nuevas preocupaciones socioambientales han impulsado a las instituciones internacionales, y en particular instituciones financieras, a establecer mecanismos para relegitimar su acción ante sus homólogos locales y nacionales (Parizet, 2016).

1.3 Organigrama de la Empresa

La Gerencia General – Perú está bajo el mando del Ing. Tony Power – Gerente General de Anglo American Perú, responsable de la operación de Quellaveco. La Gerencia del Proyecto Quellaveco por Ing. Julimar Saito – Gerente de Proyecto, encargado de coordinar las áreas de diseño, ejecución, programación e integración operacional, y Operaciones Integradas por la Ing. Cinthya Lozano – Gerente de Operaciones Integradas (CIO), liderando el Centro Integrado de Operaciones (CIO), monitoreo de flota, perforación autónoma y apoyo técnico, la Figura 02 muestra de forma esquemática el organigrama de la empresa.

Figura 02:
Estructura organizacional regional y operativa de la compañía



Nota: Elaboración propia

Roles y relaciones clave

División Cobre Sudamérica y Gerencia Perú: Enfocan la estrategia de cobre regional, reportando directamente a la sede global en Londres. Quellaveco es uno de los activos claves en este portafolio (Angloamerican, 2025).

Directorio de Proyecto: Asamblea de gobierno del activo, conformada por representantes accionistas (Anglo American y Mitsubishi), encargada de la supervisión estratégica y aprobación de políticas (Angloamerican, 2025).

Gerente General de Quellaveco: Máxima autoridad operativa en Mina y Planta, responsable de coordinar todas las áreas funcionales (Angloamerican, 2025).

Operaciones**:** Incluye equipos de mina (taladros Pit Viper, voladuras) y planta de tratamiento (Angloamerican, 2025).

Mantenimiento**:** Asegura la disponibilidad y confiabilidad del equipamiento, incluyendo flota semi-autónoma (Angloamerican, 2025).

Planificación y Control**:** Gestión de KPIs, programación, presupuesto y sistemas de monitorización (Angloamerican, 2025).

Sostenibilidad y Asuntos Sociales**:** Lidera programas del Fondo Quellaveco, relaciones comunitarias, gestión hídrica y ambiental (Angloamerican, 2025).

HSE (Salud, Seguridad y Medio Ambiente)**:** Garantiza cumplimiento normativo, estándares de seguridad operativa y gestión del agua, incluyendo casos como el río Asana (London Mining Network, 2024).

Tecnología e Innovación**:** Implementación de sistemas digitales (Control Room, flota autónoma, energía renovable) y mejora continua (London Mining Network, 2024).

La estructura refleja un modelo de negocio enfocado en integridad operativa, digitalización**,** sostenibilidad **y** desarrollo social, con fuertes conexiones entre áreas técnicas y comunitarias.

Las áreas de tecnología / innovación **y** sostenibilidad han cobrado relevancia debido al enfoque en energía renovable, control remoto de flota y gestión hídrica responsable.

1.4 Áreas y funciones desempeñadas

1.4.1 Áreas involucradas

Operaciones Mina

Esta actividad refleja de manera precisa y concisa el tema central del contenido que se presenta, la descripción de esta actividad tiene como objetivo la ejecución de perforación con taladros semi autónomos. Además de poder coordinación de actividades diarias entre operadores, supervisores y personal técnico.

Tecnología y Automatización

Esta actividad representa de forma clara y resumida el enfoque principal del contenido que se desarrolla. La finalidad de su descripción es la implementación y seguimiento del sistema de perforación semi autónoma (AutoDrill, AutoLevel, AutoNav). Conjutamente la integración de datos operativos en tiempo real.

Perforación y Voladura

Esta tarea expresa de manera directa y sintetizada el núcleo del contenido presentado. El propósito de su descripción es la optimización de parámetros de perforación (profundidad, presión de aire, velocidad de penetración) y el análisis de desempeño de taladros y calidad del barreno.

Gestión de Mantenimiento

Esta actividad comunica de forma precisa y concisa la esencia del contenido desarrollado. El objetivo de su descripción es el seguimiento al estado operativo de los equipos Pit Viper 351 para el control de un mayor uso de autonomía. También se puede realizar la coordinación para mantenimiento preventivo y correctivo con base en datos de telemetría.

Planeamiento

Esta actividad ilustra el contenido que se desarrolla. El propósito de su descripción es optimizar los procesos de perforación y voladura considerando aspectos geológicos, geomecánicas y operativos para determinar el mejor método y parámetros de perforación como diámetros, profundidad y espaciamientos de los taladros en función del diseño de banco y tamaño de los equipos.

1.4.2 Funciones desempeñadas

Supervisión de Operaciones Semi Autónomas

Las funciones realizadas reflejan de forma clara y concisa el aspecto central del contenido expuesto. La intención de su descripción es el monitoreo del desempeño de los taladros desde el centro de control y la validación de condiciones del terreno y configuración de rutas de navegación.

Análisis de Productividad

Las responsabilidades cumplidas manifiestan de manera precisa y resumida el eje principal del contenido presentado. El objetivo de su descripción es la comparación de tiempos ciclo entre perforación manual y semi autónoma. Además de poder realizar la identificación de cuellos de botella y oportunidades de mejora.

Optimización de Parámetros Operativos

Las labores efectuadas representan de forma exacta y sintetizada el punto clave del contenido desarrollado. La finalidad de su descripción es el ajuste de parámetros técnicos para maximizar la velocidad de penetración (ROP) y la reducción de tiempos muertos por desplazamiento y alineamiento.

Capacitación y Soporte Técnico

Las actividades realizadas reflejan claramente y de manera resumida el elemento esencial del contenido tratado. El propósito de su descripción es el

entrenamiento al personal en la operación de taladros semi autónomos. Además de poder consolidar la generación de manuales y procedimientos estandarizados.

Gestión de Indicadores (KPIs)

Las tareas llevadas a cabo muestran de forma precisa y concisa el aspecto fundamental del contenido abordado. La intención de su descripción es generar los reportes periódicos de avance, disponibilidad mecánica, eficiencia operativa. Finalmente, la evaluación del cumplimiento de metas de producción.

Colaboración Multidisciplinaria

Las responsabilidades ejecutadas evidencian de manera clara y resumida el núcleo principal del contenido tratado. El objetivo de su descripción es el trabajo conjunto con proveedores, supervisores de mina y personal TI. La participación en reuniones de mejora continua y análisis de causa raíz, es una de sus actividades fundamentales.

1.4.3 Parámetros de perforación y su eficiencia utilizados

Pulldown (WOB)

Sirve para controlar la vida útil de la broca y la tasa de penetración (ROP). La cantidad de peso que se ejerce en la broca depende de distintas variables, que incluyen el tipo de roca, las condiciones del terreno, el tipo de broca utilizado, el flujo de agua, la profundidad del pozo, la longitud de la sarta de perforación, las revoluciones por minuto y la tasa de penetración, el peso en la broca (WOB) que es demasiado alto puede provocar un desgaste prematuro de los componentes mecánicos de la perforadora, el peso demasiado bajo en la broca llevará a una disminución de la productividad y la broca puede perder su filo. Durante la perforación la fuerza aplicada por la perforadora y el peso de la barra deben mantener una velocidad de penetración suficiente para evitar el pulido o desgaste prematuro de los insertos.

RPM

La velocidad de rotación también se conoce como revoluciones por minuto (RPM), al incrementar las RPM, se incrementa la frecuencia de impactos de los insertos frente a la roca (si el WOB es el correcto), la ROP generalmente se incrementa. La velocidad de rotación debe elegirse con cuidado basándose en el diámetro de la broca, la profundidad del pozo, la ROP y la vibración.

Presión de aire en broca

Se recomienda tener 40 – 50 PSI en broca.

- Mínimamente 40 PSI en Broca y Máximo 60 PSI.
- Las perforadoras ADS: sugieren una presión mínima en cabina de 60 – 65 PSI.

La presión en broca no debe causar modulación y/o regulación del compresor, estar seguro de que el compresor este ajustado correctamente y que la proporción del volumen de aire sean adecuados:

- Verificar las fugas, filtros de aire, regular la presión.
- Realizar PM a tiempo.
- Tener cuidado con la inyección de agua.

Torque

Presión de rotación: La capacidad máxima de la broca o de la maquina determina el torque máximo para la perforación, el torque es un factor importante en la prevención de atascamientos, un aumento de torque puede ser causado por: colapso del pozo, exceso de WOB, falla de la broca.

Velocidad de barrido

Es la velocidad de salida del aire a través del espacio anular. La Velocidad de Barrido debe ser 5,000 -7,000 ft /min para material seco y ligero. La Velocidad de Barrido debe ser 7,000 - 9,000 ft/min para material Pesado y Húmedo.

Inyección de agua

El flujo de agua a menudo se da en términos de galones por minuto (galmin) y litros por minuto (l/min) El flujo de agua sugerido debe considerarse como mínimo y la configuración de su bomba debe estar muy por encima de esto. Su rendimiento de perforación está directamente relacionado con el flujo de agua en toda la cara de la broca. El flujo de agua debe ser lo más alto posible, pero debe estar relacionado con el diámetro de la broca y el tipo de roca que se va a perforar.

Por ejemplo, en rocas suaves o fracturadas, el flujo de agua debe ser alto, sin embargo, en una roca muy dura y competente, donde la velocidad de penetración es baja, el flujo de agua se debe reducir para permitir el corte de la roca y para reducir el riesgo de pulir los insertos. La cantidad correcta depende de la formación que se perfora para las tres etapas del pozo: collarín, perforación y cerca del fondo del pozo.

Los parámetros de perforación juegan un papel importante para ayudar a los perforadores a lograr un buen rendimiento en la perforación. Existe una relación clara entre los parámetros de perforación y todos los demás factores en la perforación, como el diámetro del equipo que está utilizando, la dureza de la roca o la variabilidad del suelo. Usando los parámetros de RPM y Pulldown (WOB) adecuado de obtiene la mayor eficiencia en la perforación o mayor Velocidad de Perforación.

Monitorear constantemente los parámetros ayuda a tomar acciones a las condiciones cambiantes del pozo y previene incidentes costosos. Tener un mantenimiento preventivo ayuda a prevenir interrupciones durante la perforación con el fin de detectar fallas mecánicas que podrían generar perdida de costos, evitar paradas no planificadas es clave para maximizar la operación, productividad de las perforadoras.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DE UNA ACTIVIDAD ESPECÍFICA

2.1 Introducción

Este capítulo está encargado de desarrollar detalladamente las actividades que se realizaron como controladora de perforación las labores en la Unidad Minera Quellaveco para la optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma, logrado a través de la implementación de un modelo integral de control, supervisión y análisis, apoyado en el IOC (Integrated Operations Center) como núcleo de gestión. En este marco, se desarrolló el control de flota de perforación autónoma con equipos Pit Viper 351D para la ejecución de taladros de producción, con la flexibilidad de operar en modalidad manual en condiciones adversas, como perforación en rampas, De igual manera, se integró el control telerremoto de la flota Smart Roc D65 para taladros de pre-corte, que, bajo condiciones desfavorables de terreno, área o clima, pueden operar manualmente desde cabina, asegurando continuidad y estabilidad en el proceso de perforación. Este enfoque híbrido garantizó tanto eficiencia como adaptabilidad frente a los retos operativos en el tajo.

Un componente fundamental en la optimización ha sido el monitoreo e interpretación en tiempo real de los parámetros operativos de las perforadoras PV y SR. A través de sistemas digitales de adquisición de datos, se evaluaron variables como la velocidad de penetración, presión de aire de limpieza, torque de rotación, empuje aplicado y vibraciones estructurales, permitiendo detectar cualquier anomalía que pueda comprometer la seguridad o el desempeño del equipo. En paralelo, el sistema de alertas integradas reporta de manera inmediata condiciones inseguras, activando protocolos de respuesta que reducen riesgos operativos y previenen daños mayores. Este proceso de control continuo fortaleció la confiabilidad de la flota semi autónoma, incrementando la precisión de la perforación y mejorando la seguridad operacional.

Para lograr una ejecución en precisión de plan de perforación semi automática / automática (ADPE), la máquina debe realizar todos los pasos dentro de un ciclo de perforación automáticamente. El ciclo ADPE es el siguiente: nivel automático, perforación automática, desnivelación automática, navegación automática.

Finalmente, la gestión de la información y análisis de desempeño permitió cerrar el ciclo de optimización operativa. A través de la verificación de planes diarios y semanales, se comparan los avances programados frente a los ejecutados, lo que facilita la identificación de brechas de eficiencia y el ajuste oportuno de parámetros. Asimismo, el análisis de dashboards permitió visualizar y evaluar indicadores clave de desempeño (KPI) por flota, generando lineamientos estratégicos para la mejora continua. La elaboración de reportes diarios por flota PV y SR consolida la información operativa en un banco de datos histórico, que respalda la toma de decisiones, estandariza la operación y asegura la alineación entre planificación, ejecución y control. En conjunto, estas actividades han permitido a Quellaveco establecer un modelo sólido de perforación semi autónoma, caracterizado por mayor productividad, confiabilidad y seguridad.

2.2 Optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma

En el contexto actual de la gran minería a cielo abierto, la incorporación de tecnologías semi autónomas en los procesos de perforación constituye un pilar estratégico para mejorar la eficiencia operativa, garantizar la seguridad de los trabajadores y optimizar el uso de recursos. Los taladros Pit Viper 351, diseñados para operar bajo modalidades semi autónomas, permiten un mayor control sobre los parámetros de perforación y, por ende, una mejor calidad en la ejecución de los planes de minado.

Actualmente se ejerce labores de controladora de perforación, se ha podido evidenciar en la práctica la importancia de una adecuada gestión y seguimiento de los parámetros operativos. El desempeño de los equipos no solo depende de la programación inicial de las perforadoras, sino también de la verificación y ajuste continuo de variables críticas como la presión de empuje, la velocidad de penetración,

la rotación y el consumo de aire. Una supervisión detallada de estos factores influye directamente en la calidad de los taladros, en la vida útil de los equipos y en la optimización de los costos asociados.

El presente informe se ha centrado en la optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma, con el objetivo de establecer lineamientos técnicos que permitan reducir las desviaciones operativas y mejorar los indicadores de productividad. La experiencia adquirida en el monitoreo y control de flotas de perforación ha permitido identificar brechas entre la operación programada y la ejecución en campo, lo que constituye un punto de partida fundamental para proponer ajustes que favorezcan la eficiencia y confiabilidad del proceso.

De esta manera, este informe no solo busca aportar a la mejora continua en la operación de perforación, sino también fortalecer el rol del control de flota como una actividad estratégica dentro de la gestión minera moderna, donde la tecnología semi autónoma representa un puente entre la automatización total y la supervisión técnica especializada.

2.2.1 Control de flota de perforación autónoma Pit Viper 351D desde sala de control IOC para taladros de producción y perforación manual

La optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma en la Unidad Minera Quellaveco se ha logrado mediante la integración del sistema de control centralizado desde el IOC (Integrated Operations Center), que ha permitido la gestión en tiempo real de la flota de taladros Pit Viper 351D. A través de esta plataforma, se han ajustado variables críticas como la presión de avance, la velocidad de rotación, la tasa de penetración y el consumo de energía de los equipos, lo que garantiza una perforación más estable y uniforme en los bancos de producción. Dicho control permite medir los parámetros del 1 al 16 que se muestran detallados en la Figura 03:

1. Velocidad de rotación (RPM)
2. Fuerza y presión de tracción (Klbf/psi).
3. Torque de cabezal de rotación con presión de rotación (klb-ft/psi).
4. Presión de aire en broca (psi).

5. Nivel de combustible del motor.
6. Nivel del depósito del agua.
7. Flujo de aire comandado.
8. Flujo de inyección de agua (gal/min).
9. Indicador de escala de agresividad
10. Contenido de humedad (collarín, perforación plena y cerca del fondo del taladro).
11. Intentos de limpieza automática.
12. Intentos de atascamiento.
13. Intentos de retracción del taladro de perforación.
14. Número de identificación del taladro.
15. Colocar manualmente en cero profundidades de taladro de perforación.
16. Opciones de limpieza de collarín.
17. Opciones de limpieza de taladros.
18. Tasa de penetración.
19. Tiempo de perforación transcurrido.
20. Profundidad de perforación objetivo.

Figura 03:
Control de flota de perforación autónoma Pit Viper 351D desde sala de control IOC para taladros de producción y perforación manual

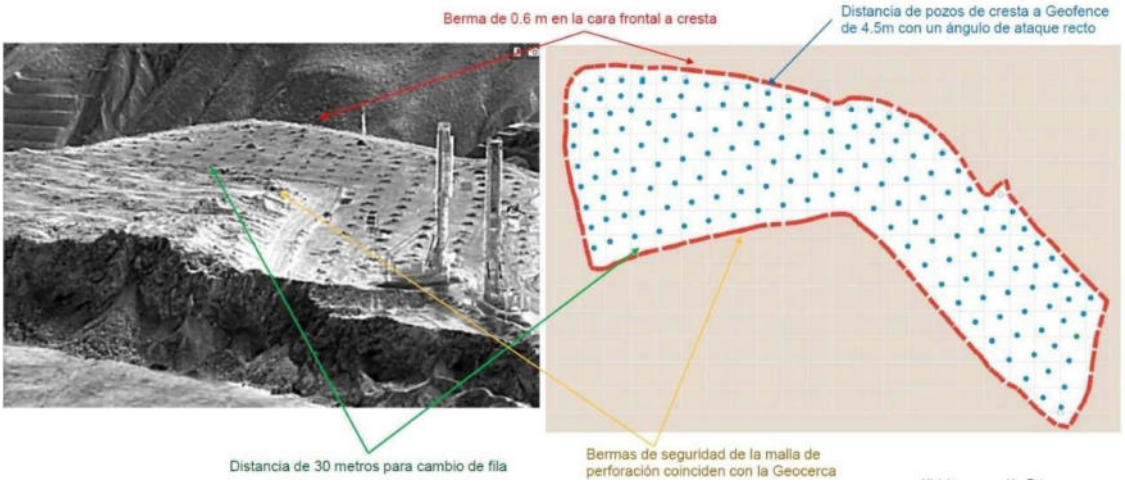


Nota: Imagen

El análisis continuo de datos provenientes de sensores instalados en los equipos de perforación han permitido establecer rangos óptimos de operación, reduciendo el

desgaste de herramientas de perforación, mejorando la calidad de la fragmentación y asegurando la alineación con el diseño de malla planificada en el software de mina, para lograr una mayor optimización del uso de autonomía en perforación, la malla deben estar bien diseñada y definida en un contorno virtual por coordenadas GPS geocerco / geomalla, con el fin de definir el burden y espaciamiento de la malla de perforación (Figura 04).

Figura 04:
Diseño de malla de perforación



Nota: Visualización de la malla considerando la berma y la distancia de los pozos de cresta

En condiciones operativas donde la perforación autónoma presenta limitaciones técnicas, como en rampas o zonas de geometría compleja, se implementa la modalidad de perforación manual supervisada, manteniendo los mismos criterios de control y retroalimentación generados en el IOC. Esta flexibilidad operativa permite comparar de manera sistemática los resultados obtenidos entre perforación autónoma y manual, identificando brechas y aplicando ajustes finos en los parámetros operativos. Con ello, se logra una estrategia de optimización híbrida que maximiza el rendimiento de la flota, mejora la seguridad operativa al reducir la exposición del personal en áreas críticas y consolida la transición hacia un modelo de perforación de mayor productividad, precisión y control en Quellaveco (Figura 05).

Figura 05:
Vista del control de flota de taladros Pit Viper 351D (autónomos y manuales) desde la sala IOC



Nota: Elaboración propia

2.2.2 Control de flota de perforación telerremoto Smart Roc D65 desde sala de control IOC para taladros de pre-corte y perforación manual desde cabina en situaciones criticas

La optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma con equipos Smart Roc D65 en la Unidad Minera Quellaveco se ha alcanzado mediante el control telerremoto desde el IOC (Integrated Operations Center) para la ejecución de taladros de pre-corte. Esta modalidad ha permitido operar y monitorear simultáneamente múltiples equipos, ajustando parámetros críticos como el empuje de perforación, la velocidad de rotación, el control de torque y la presión de aire de limpieza. A través del análisis de datos en tiempo real, se han establecido ventanas operativas óptimas que aseguran la calidad del pre-corte, minimizando desviaciones en la malla de perforación y reduciendo la variabilidad en la geometría de los taludes. Asimismo, la integración del sistema de control centralizado ha permitido correlacionar el desempeño de la perforación con la estabilidad geotécnica esperada, asegurando mayor precisión en el diseño de bancos y taludes finales (Figura 06).

Figura 06:
Control telerremoto de flota SmartROC D65 desde sala IOC y operación manual en condiciones adversas



Nota: Elaboración propia

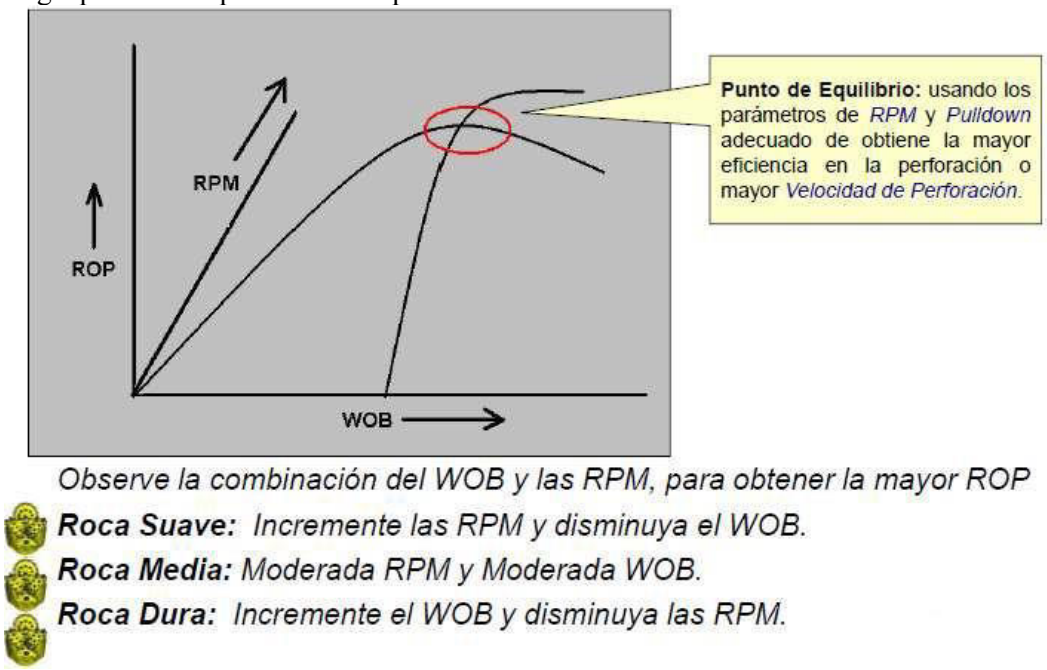
En escenarios donde las condiciones de área, terreno o clima no resultan favorables para la operación telerremota, los equipos Smart Roc D65 pasan a modalidad de perforación manual desde la cabina, garantizando la continuidad operacional. Esta estrategia híbrida ha permitido comparar de manera sistemática los resultados de ambas modalidades, identificando patrones de eficiencia y estableciendo ajustes finos en los parámetros operativos para distintos tipos de litología y condiciones de frente de trabajo.

El enfoque combinado ha reducido significativamente los tiempos improductivos asociados a interrupciones climáticas y geotécnicas, incrementando la disponibilidad y confiabilidad de la flota de perforación. De esta forma, se consolidaun modelo operativo que integra tecnología, seguridad y productividad, fortaleciendo el proceso de transición hacia una perforación más autónoma y controlada en Quellaveco.

2.2.3 Monitoreo e interpretación de los parámetros del funcionamiento de las perforadoras PV & SR para detectar si existe alguna anomalía durante la operación

La optimización de los parámetros operativos de perforación semi autónoma en la Unidad Minera Quellaveco se ha logrado mediante un sistema de monitoreo e interpretación en tiempo real de las perforadoras Pit Viper (PV) y Smart Roc (SR). Desde el IOC (Integrated Operations Center), se ha conseguido recopilar y analizar continuamente variables como velocidad de penetración (ROP), presión de aire de limpieza, empuje aplicado, torque de rotación, consumo de energía y vibraciones estructurales (Figura 07).

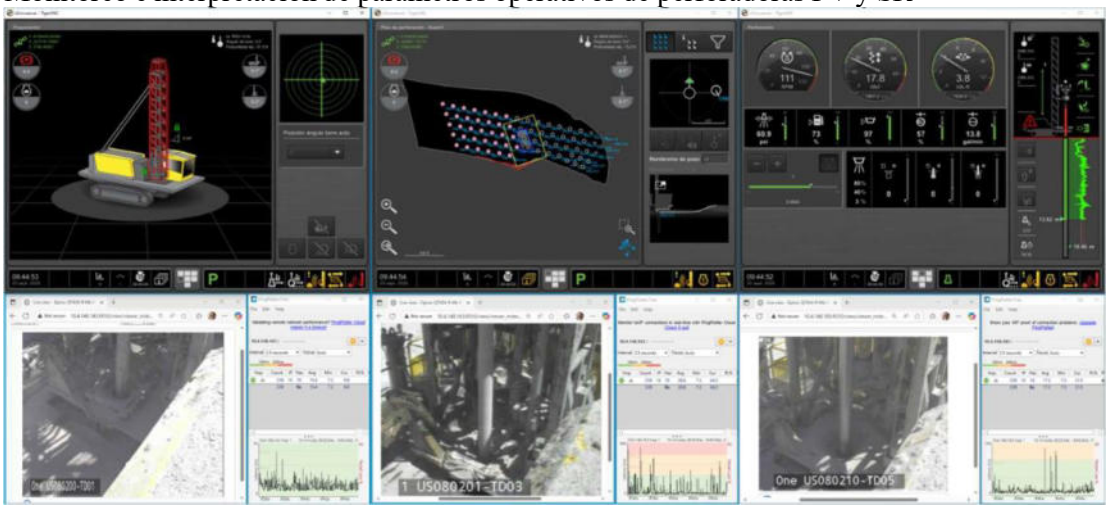
Figura 07:
Regla para uso de parametros de perforacion



Nota: Obtenido del sistema Integrated Operations Center

Esta información fue procesada a través de plataformas de control digital y dashboards especializados, lo que permitió establecer tendencias de rendimiento y compararlas con los rangos operativos definidos para cada litología. Gracias a esta retroalimentación, se han podido ajustar parámetros clave para optimizar la eficiencia del ciclo de perforación, prolongar la vida útil de las brocas y martillos de fondo, y asegurar la precisión de la malla diseñada (Figura 08).

Figura 08:
Monitoreo e interpretación de parámetros operativos de perforadoras PV y SR



Nota: Elaboración propia

De manera complementaria, la interpretación técnica de anomalías en los datos de operación se ha convertido en un factor decisivo para prevenir pérdidas de productividad y riesgos operativos. A través de algoritmos de alerta temprana y análisis de desviaciones en el comportamiento de las perforadoras, el equipo de control identifica irregularidades tales como sobrepresión en el sistema de aire, pérdida de energía en el empuje, atascamiento de broca o inestabilidad por condiciones geotécnicas locales.

Una vez detectadas, estas anomalías son evaluadas y corregidas en coordinación con las cuadrillas de campo, permitiendo la transición controlada entre modos autónomos y manuales cuando la situación lo requiere. Esta estrategia de supervisión integrada no solo incrementa la confiabilidad operativa de la flota PV & SR, sino que también garantiza una perforación más segura, eficiente y alineada con los objetivos de productividad y estabilidad de taludes en Quellaveco.

2.2.4 Reportar inmediatamente las alertas del sistema de monitoreo PV & SR que indiquen una condición insegura durante la operación.

La optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma en la Unidad Minera Quellaveco se ha alcanzado mediante la implementación de un sistema de reporte inmediato de alertas generadas por el monitoreo de perforadoras Pit Viper (PV) y Smart Roc (SR). Este sistema permite identificar en tiempo real condiciones inseguras durante la operación, tales como sobrecargas mecánicas, desviaciones críticas en presión de aire, exceso de torque, anomalías en el sistema hidráulico o vibraciones fuera de rango.

La integración de estos datos con el IOC (Integrated Operations Center) garantiza que cada alerta sea analizada y comunicada de manera instantánea al personal de operaciones y mantenimiento, lo que facilita la toma de decisiones correctivas sin afectar significativamente la continuidad del ciclo de perforación. Este mecanismo de respuesta rápida ha permitido ajustar los parámetros operativos de forma preventiva, reduciendo fallas imprevistas y asegurando un funcionamiento más estable de la flota semi autónoma (Figura 09).

Figura 09:
Reporte inmediato de alertas del sistema de monitoreo PV y SR



Nota: Elaboración propia

Asimismo, el análisis de las alertas reportadas ha generado un banco de datos que contribuye a la identificación de patrones recurrentes y la elaboración de protocolos específicos de actuación frente a condiciones de riesgo. Esto ha fortalecido la cultura de seguridad operacional, dado que cada alerta no solo representa una acción correctiva puntual, sino también un insumo para la mejora continua de los parámetros de perforación.

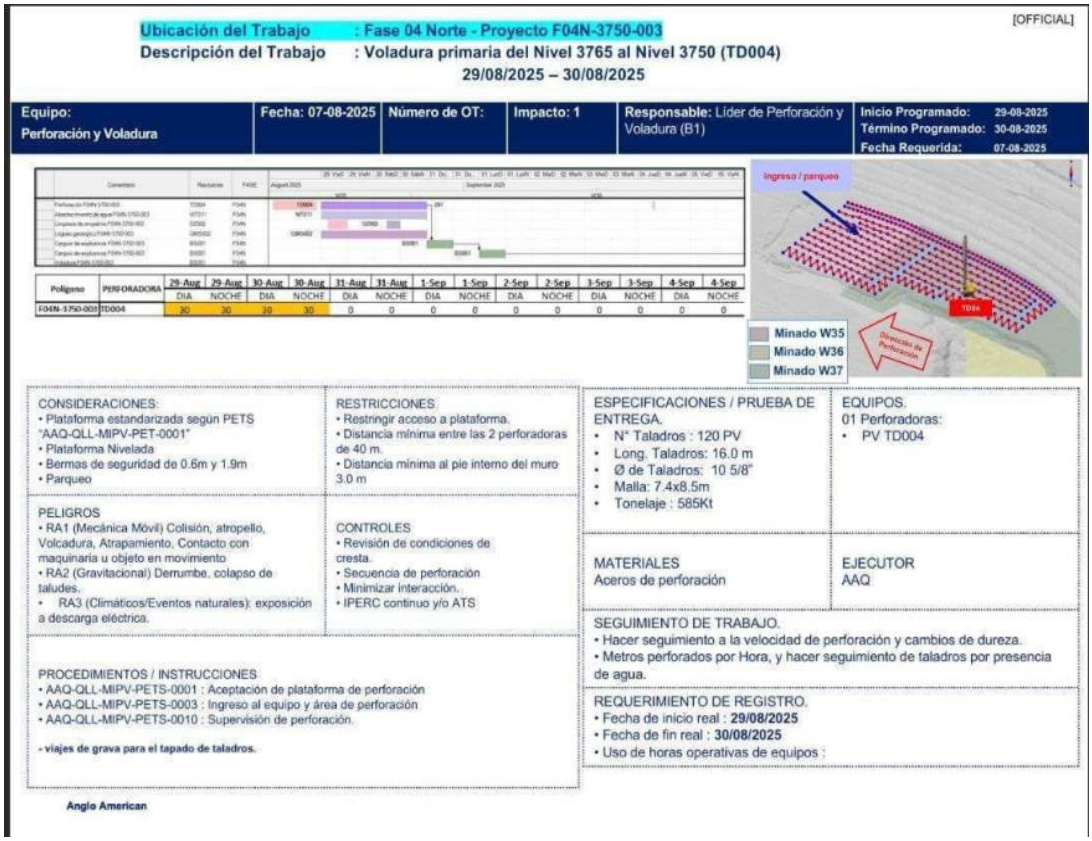
La interacción directa entre el monitoreo digital y la gestión en campo permite priorizar la seguridad del personal, minimizar la exposición a zonas críticas y mantener la integridad de los equipos. De esta manera, el proceso de reporte inmediato no solo optimiza la respuesta operativa frente a incidentes, sino que también consolida la eficiencia y confiabilidad de la perforación semi autónoma en Quellaveco.

2.2.5 Análisis y verificación de los planes diarios, semanales relacionados a los avances de producción

El análisis y verificación sistemática de los planes diarios y semanales de perforación, comparando lo programado con lo efectivamente ejecutado en campo ayudo significativamente a la optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma en la Unidad Minera Quellaveco. Esta actividad permitió evaluar la correlación entre el diseño de mallas, los avances planificados y la productividad real de la flota de perforadoras Pit Viper (PV) y Smart Roc (SR).

A través del uso de reportes integrados del IOC (Integrated Operations Center) y software de gestión minera, se identifican desviaciones en indicadores como número de taladros ejecutados, metros perforados, tiempos de ciclo, utilización efectiva y cumplimiento de secuencias de perforación. El análisis de estas brechas operativas facilita la calibración de parámetros de empuje, velocidad de penetración y rotación, lo que se traduce en una mayor precisión de la perforación, reducción de reprocesos y optimización del rendimiento global (Figura 10).

Figura 10:
Revisión y validación de planes de producción diarios y semanales en función de los avances



Nota: Obtenido del sistema Integrated Operations Center

Adicionalmente, la verificación periódica de la ejecución frente a la programación permite establecer tendencias de desempeño y generar retroalimentación directa hacia los equipos operativos y de planificación. Cuando se detectan desalineamientos recurrentes, se aplican ajustes tanto en la estrategia de asignación de equipos como en los parámetros operativos, considerando factores como variabilidad geotécnica, condiciones climáticas o restricciones de accesibilidad en el tajo.

Este proceso de control cruzado asegura que los objetivos de producción no solo se cumplan en cantidad de metros perforados, sino también en calidad de perforación y estabilidad de taludes. En consecuencia, la integración del análisis programado–ejecutado con la gestión de parámetros técnicos fortalece la confiabilidad de la operación semi autónoma, incrementa la productividad y asegura una mayor alineación entre la planificación minera y la operación en Quellaveco.

2.2.6 Análisis de Dashboard para identificar KPI por flotas de perforadoras

La optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma en la Unidad Minera Quellaveco se ha obtenido mediante el análisis de dashboards de gestión en tiempo real, que consolidan la información de desempeño de las flotas de perforadoras Pit Viper (PV) y Smart Roc (SR). Estos paneles permiten visualizar de forma integrada los principales KPI (Key Performance Indicators) asociados a la operación, tales como metros perforados por turno, utilización efectiva, tiempo de ciclo, velocidad de penetración (ROP), disponibilidad mecánica y cumplimiento de la malla programada. La interpretación de estos indicadores facilitó la detección temprana de desviaciones en los parámetros operativos, permitiendo realizar ajustes inmediatos en empuje, rotación o secuencia de perforación, lo que impacta directamente en la calidad de la fragmentación y en la eficiencia global del proceso de minado (Figura 11).

Figura 11:
Evaluación de dashboard para la identificación de indicadores clave de desempeño (KPI) por flotas de perforadoras



Nota: Obtenido del sistema Integrated Operations Center

A partir del seguimiento continuo de los KPI por flota y por equipo, se han identificado patrones de desempeño diferenciados que permiten aplicar estrategias de mejora focalizadas. Por ejemplo, la correlación entre utilización efectiva y tiempos

improductivos ha permitido reducir paradas no planificadas, mientras que el análisis comparativo de consumo de energía y desgaste de brocas ha optimizado la selección de parámetros de perforación según litología. Esta metodología basada en dashboards no solo estandariza la operación de la perforación semi autónoma, sino que también fortalece la toma de decisiones estratégicas, asegurando mayor confiabilidad operativa y un alineamiento preciso entre la planificación de producción y la ejecución en campo en Quellaveco.

2.2.7 Elaboración de reportes diarios por flota PV y SR.

Finalmente, la elaboración sistemática de reportes diarios por flota de perforadoras Pit Viper (PV) y Smart Roc (SR) consolido la optimización de los parámetros operativos de perforación semi autónoma en la Unidad Minera Quellaveco. Estos reportes integraron la información recopilada en tiempo real desde el IOC (Integrated Operations Center) sobre variables operativas clave: metros perforados, número de taladros completados, cumplimiento de malla programada, utilización efectiva, tiempos improductivos y disponibilidad mecánica.

Al estandarizar la captura y procesamiento de estos datos en informes estructurados, se genera una trazabilidad completa del desempeño diario de cada equipo y flota. Esto permite evaluar la consistencia de los parámetros aplicados, identificar posibles desviaciones y establecer ajustes inmediatos en la operación, optimizando así la estabilidad de la perforación y la eficiencia en el ciclo de producción (Figura 12).

Figura 12:
Generación de reportes diarios de desempeño por flotas de perforación PV y SR



Nota: Elaboración propia

De manera complementaria, la comparación sistemática entre los reportes diarios de PV y SR ha facilitado la identificación de tendencias de desempeño y la correlación de resultados con las condiciones geotécnicas y climáticas de cada jornada. La interpretación de estos reportes ha permitido definir buenas prácticas operativas, optimizar el uso de consumibles (brocas, martillos y barras), y mejorar la programación de mantenimiento preventivo según la demanda real de los equipos. Además, al consolidar la información diaria en un banco de datos histórico, se fortalece el análisis predictivo de KPI, lo que garantiza una operación más confiable, segura y alineada con los objetivos de productividad y precisión de la perforación semi autónoma en Quellaveco.

CAPÍTULO III

ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

3.1 Antecedentes

3.1.1 Antecedentes Internacionales

Epiroc (2022) en los últimos años ha obtenido un importante pedido de equipos de minería superficial, un caso de estudio es sobre La Société Nationale Industrielle et Minière, conocida como SNIM, es uno de los mayores productores de mineral de hierro de África. La compañía minera ha encargado un paquete de equipos de perforación Epiroc Pit Viper 351 con soluciones avanzadas de automatización que se utilizarán en la nueva mina de F'Derick. Epiroc, además, proporcionará supervisión de servicio y repuestos. El pedido de equipos está valorado en unos 150 millones de coronas suecas (14,7 millones de dólares) y se registró en el trimestre de junio de 2022. "Epiroc mantiene una larga relación con SNIM y esperamos seguir apoyando al cliente con una productividad y seguridad óptimas en la nueva mina", declaró Helena Hedblom, presidenta y directora ejecutiva de Epiroc. Los equipos Pit Viper 351 se fabrican en Texas, EE. UU. Se instalarán con funciones de automatización, como AutoDrill, que permite que hasta el 100 % del ciclo de perforación se realice en modo automático con alta consistencia y fiabilidad en las operaciones, y con AutoLevel, que minimiza el tiempo de nivelación y desnivelación, lo que permite una perforación más rápida. También estarán equipados con el sistema telemático de Epiroc, que permite la monitorización inteligente del rendimiento y la productividad de la máquina en tiempo real.

International Mining (2022) la operación cuprífera Cobre Panamá ubicada en Donoso, una de las divisiones que conforma la provincia de Colón en Panamá, se convirtió recientemente en la mina con el mayor número de perforadoras eléctricas de la región tras la adquisición de otra perforadora Epiroc Pit Viper 351 E, la perforadora de superficie de cero emisiones más grande del mundo. La adquisición de este avanzado equipo de perforación marca otro hito significativo: se trata de la máquina eléctrica número 200 de su clase fabricada por la empresa sueca Epiroc a nivel mundial. Esto

pone de relieve el avance hacia una minería sostenible que reduce y mitiga el impacto de la producción de equipos con tecnologías avanzadas. La perforadora Pit Viper 351 E es la más grande que Epiroc fabrica y la más grande del mercado. Desde su lanzamiento en el año 2000 en MinExpo, ya se han fabricado 200 unidades para más de 35 países. La minería está evolucionando hacia una mayor sostenibilidad, y en Epiroc se acelera ese proceso, además de fomentar una minera responsable, reconocemos la obligación de contribuir a la gestión y mitigación del cambio climático. Parte de la contribución se realiza mediante la adquisición y el uso de la mejor tecnología disponible para reducir e incluso eliminar, como en este caso, las emisiones de gases. Actualmente, Cobre Panamá – First Quantum Minerals está implementando una estrategia de mitigación del cambio climático que establece una reducción del 30% en las emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2025 y del 50% para 2030. La Pit Viper 351 E cuenta con un RCS, un Sistema de Control de Plataforma y un Sistema de Navegación de Taladros (HNS), siempre permite localizarla. El equipo transmite datos y genera alertas de todos los eventos que ocurren durante la operación; de esta manera, el equipo de producción y mantenimiento de la mina está siempre al tanto y monitorea la operación en línea.

International Mining (2025) un importante pedido de BHP (una flota de perforadoras de barrenos Pit Viper 271) para equipos autónomos de minería de superficie que se utiliza en una mina de hierro en Australia Occidental en la región de Pilbara es anunciado por Epiroc. Las máquinas permiten a los operadores de BHP supervisar la operación autónoma y sin conductor desde su centro de operaciones remoto integrado en Perth, ubicado a más de 1100 km de distancia, con un valor de 18 millones de dólares y se registró en el trimestre de diciembre de 2024. La productividad y fiabilidad minera para esta flota es lo más destacado, una mayor vida útil de la máquina y un bajo coste total de propiedad, el pedido surge tras la reciente renovación de un acuerdo marco global entre Epiroc y BHP, que implica que Epiroc proporcionará equipos de superficie y subterráneos, repuestos y servicios a la compañía minera durante varios años. Como parte de la renovación del acuerdo marco, BHP realizó otro pedido importante durante el trimestre de septiembre de 2024, esta vez para su mina de cobre Escondida en Chile. Este pedido, para una flota de plataformas autónomas Pit Viper 351 y Pit Viper 271,

se valoró en más de 30 millones de dólares. Las máquinas autónomas Pit Viper 351 y Pit Viper 271, fabricadas en EE. UU., cuentan con una construcción robusta para aumentar la productividad y la eficiencia a lo largo de los años. Las plataformas Pit Viper 271 también vienen con la solución de cambiador automático de brocas de Epiroc, que permite cambiar las brocas con solo tocar un botón, lo que ahorra tiempo y refuerza la seguridad.

Du et al. (2025) los sistemas robóticos autónomos (RAS del inglés Robotic Autonomous Systems) son las muestras de las continuas innovaciones en las ciencias de la ingeniería, los avances en han abierto nuevas posibilidades en el sector minero, mostrando potencial para reemplazar a los humanos en diversas tareas. Si bien los RAS han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de máquinas mineras inteligentes, aún falta un estudio oportuno y exhaustivo de estas aplicaciones. Los autores buscaron cerrar esta brecha explorando cronológicamente el progreso industrial de las plataformas robóticas móviles convencionales en minería, como plataformas de perforación, martillos de impacto, equipos de movimiento de tierras y camiones de transporte. Los autores realizaron una revisión que se centró en las implementaciones industriales reales en la automatización minera, en lugar de profundizar en los desarrollos tecnológicos y metodológicos. Finalmente, los autores clasifican las arquitecturas de RAS en minería autónoma según sus modos de control y niveles de autonomía. En lugar de centrarse exclusivamente en los avances tecnológicos y metodológicos, los autores ofrecen un análisis detallado de las plataformas tradicionales de minería robótica móvil y sus desarrollos industriales, destacando el estado actual de desarrollo de cada plataforma. Si bien los avances recientes en RAS para minería son prometedores, también proponemos varias tendencias futuras clave.

Nguyen et al. (2023) deducen que existe un creciente interés en la aplicación de sistemas robóticos autónomos (RAS del inglés Robotic Autonomous Systems) para la construcción y la minería, en particular el uso de tecnologías RAS para responder a los problemas emergentes de los equipos de movimiento de tierras que operan en entornos volátiles y a la necesidad de cooperación multiplataforma. Involucrados en el sector necesitan técnicas y desarrollos que aborden estos desafíos, para abordar este tema de

la automatización del movimiento de tierras, los autores presentan un estudio exhaustivo de las contribuciones significativas y los avances recientes, según se informa en la literatura, bases de datos de sociedades profesionales y documentación técnica de los fabricantes de equipos originales (OEM). En entornos volátiles, los avances en detección, comunicación y software, análisis de datos, así como las tecnologías de conducción autónoma, pueden lograr un funcionamiento fiable y un aumento drástico de la seguridad. Se prevé que, en esta década, una obra automatizada de movimiento de tierras manifestará la colaboración de bulldozers, motoniveladoras y excavadoras para realizar tareas terrestres sin operadores tras los controles de la cabina; en algunos casos, las máquinas no tendrán cabina. Finalmente, los autores indican que resulta beneficioso para las pequeñas y medianas empresas (PYME) relevantes desarrollar sus productos para satisfacer las demandas del mercado en este ámbito.

Voronov et al. (2020) estudiaron los sistemas de transporte autónomos (o no tripulados), indicando que se han utilizado en la minería a cielo abierto durante más de 10 años y que la mayoría de los equipos en estas minas se controlan de forma remota mediante electrónica, por lo que a veces se las denomina "minas inteligentes". La eliminación del "factor humano" del proceso de producción debería, en teoría, aumentar su seguridad y productividad, así como reducir los costes operativos de su implementación. Sin embargo, a pesar de las obvias ventajas de esta tecnología, no se está extendiendo tan rápido como se esperaba. Esto sugiere que existen varios problemas que limitan su desarrollo. Los autores se realizaron una revisión y análisis de la experiencia en la implementación industrial del transporte autónomo en la minería a cielo abierto con el fin de identificar los problemas existentes y las posibles direcciones para su posterior desarrollo. Los autores describen los prerrequisitos, una breve historia y algunos resultados importantes de la introducción de sistemas de transporte autónomos en la minería a cielo abierto, sus principales tipos y elementos constitutivos, así como se destacan los problemas existentes y las direcciones esperadas de su desarrollo.

Gaber et al. (2021) indican que el avance actual de la robótica, especialmente en los Sistemas Ciberfísicos (SCI del inglés Cyber-Physical Systems), ha propiciado una importante integración entre la industria minera y las tecnologías conectadas e integradas. Este progreso se ha materializado en vehículos gigantes automatizados de última generación con Sistemas Autónomos de Transporte (AHS del inglés Autonomous Haulage Systems) que pueden transportar mineral sin intervención humana. Al igual que los SCI, los AHS permiten el control autónomo o remoto de sistemas físicos (por ejemplo, camiones mineros). Por lo tanto, al igual que los SCI, los AHS también son susceptibles a ciberataques como la desautorización de Wi-Fi y los ataques GPS. Los autores indican que con el uso de los AHS, se han fortalecido diversas actividades mineras gracias al aumento de la eficiencia operativa. Estas actividades requieren garantizar la recopilación precisa de datos, a partir de la cual se debe generar información precisa sobre el estado de la mina de manera oportuna y consistente. Por consiguiente, la existencia de comunicaciones seguras y fiables es crucial para que las minas de AHS sean más seguras, productivas y sostenibles. Los autores buscaron identificar y analizar la relación entre la seguridad de los AHS en el entorno minero, la ciberseguridad y la comunicación, así como destacar sus desafíos y problemas pendientes. Revisamos la literatura que abordó este objetivo, analizamos sus ventajas y desventajas y destacamos algunas cuestiones pendientes. Finalmente, los autores indican que abordar los problemas de ciberseguridad de los AHS puede garantizar la seguridad de las operaciones en el entorno minero, además de proporcionar una comunicación fiable, lo que se traducirá en una mayor seguridad. Además, se descubrió que las nuevas tecnologías de comunicación, como 5G y LTE, podrían adoptarse en sistemas basados en AHS para minería, pero se requiere más investigación para considerar los problemas y ataques de ciberseguridad relacionados.

Zhai et al. (2020) muestran que las labores de rescate tras un accidente en una mina de carbón están plagadas de desafíos y peligros. Considerando la seguridad de los rescatistas y la urgencia de la misión, es necesario utilizar robots de rescate en minas de carbón para realizar tareas de detección ambiental y rescate. Como parte clave del sistema de detección del robot, un sensor visual puede proporcionar mucha información sobre la escena. Entre los tipos de sensores de visión, la visión binocular

ofrece la ventaja de ser pasiva y sin contacto, y es la tecnología clave para que un robot adquiera información sobre obstáculos y reconstruya una escena tridimensional. Por lo tanto, los robots de rescate en minas de carbón basados en visión binocular se han convertido en un tema de investigación popular en el campo de la seguridad minera. En primer lugar, se presenta sistemáticamente el estado de la investigación sobre la calibración de cámaras y la adaptación de la visión estereoscópica a la visión binocular. En segundo lugar, se revisan los últimos avances en investigación sobre robots de rescate en minas de carbón basados en visión binocular desde la perspectiva de las aplicaciones y el desarrollo tecnológico. Finalmente, los autores describen los desafíos técnicos y las tendencias futuras de desarrollo de la visión binocular en robots de rescate en minas de carbón.

Syd (2019) el desarrollo de la minería de tajo largo en Estados Unidos, desde una etapa desconocida hasta convertirse en el estándar mundial en las últimas cinco décadas, con énfasis en la automatización. En la década de 1970, se importaron equipos de tajo largo a gran escala de Alemania y el Reino Unido para aumentar la producción, y se realizó un gran esfuerzo para mejorarlos para adaptarlos a las condiciones de Estados Unidos, en lugar del mercado interno. La automatización comenzó con el desarrollo de escudos electrohidráulicos en 1984 y continúa hasta la actualidad. La introducción del sistema de tajo largo semiautomatizado de primera generación ocurrió en 1995 y la mejora gradual continúa presentándose tras el desarrollo de la tecnología de sensores y el Internet de las cosas (IoT). Desde entonces, el énfasis en los nuevos desarrollos se ha centrado en la mejora de la confiabilidad de los equipos, la salud y seguridad de los mineros, así como la producción, incluyendo técnicas de control de polvo, sensores de proximidad, anticolisión y control remoto. La automatización se clasifica en dos categorías: automatización de equipos de tajo individuales y automatización del sistema de tajo largo. El desarrollo de la automatización del sistema de tajo largo se divide en tres etapas: corte, inicio, protección (SISA del inglés shearer-initiated-shield-advance), sistema de tajo largo semiautomatizado y esquiladora de control remoto.

Moore (2024) En la zona minera de hierro de Pilbara, Australia, Epiroc y Fortescue han estado trabajando juntos para desarrollar la plataforma de perforación autónoma

SmartROC D65, que, está revolucionando los límites de la minería autónoma. La plataforma se implementó inicialmente en Iron Bridge, en Pilbara Oriental, el proyecto minero conjunto entre FMG Magnetite, filial de Fortescue Metals Group, y Formosa Steel IB. Esta operación, valorada en 3900 millones de dólares estadounidenses y ubicada cerca de Marble Bar, produce magnetita de alta ley. El uso de la SmartROC D65 MKII Autónoma en una mina de Fortescue durante un periodo de prueba de al menos 12 meses. La mina Iron Bridge fue seleccionada como el sitio más adecuado para los objetivos de la prueba. La prueba comenzó en 2022 y la plataforma alcanzó los KPI de producción en mayo de 2023. A partir de 2024, todas las actividades relacionadas con la implementación autónoma y el desarrollo futuro se trasladaron a Solomon Hub, en la zona central de Pilbara, al norte de Tom Price. Fortescue tiene la reputación de ser una empresa minera vanguardista, que actualmente lleva más de una década buscando soluciones autónomas, lo que la convierte en un socio natural del programa SmartROC D65 Autónomo. Epiroc y Fortescue se asociaron en 2021 para probar esta versión MKII del SmartROC D65 Autónomo de Epiroc. Este proyecto se realizó tras un proyecto piloto SmartROC D65 Autonomous MKI de 2018 en Canadá. Una prueba exitosa proporcionaría a Fortescue una solución de perforación de voladura autónoma y a Epiroc información vital para realizar pruebas en condiciones mineras realistas.

Gleeson (2020) Epiroc y Combitech comenzaron a trabajar en un salto tecnológico y juntos, combinaron la tecnología del portafolio de productos civiles de Epiroc y SAAB con el conocimiento sobre cómo sistematizar y desarrollar la gestión del tráfico. En la mina de pruebas de Epiroc a las afueras de Örebro, Suecia, en el 2019, la solución se instaló y utilizó en una mina de oro de Australia. Esta solución se denomina Epiroc Scooptram Automation Total y forma parte de la oferta 6th Sense de Epiroc. Este permite que las máquinas compartan carreteras, puntos de servicio y zonas de carga y descarga sin colisiones ni bloqueos. El módulo es genérico, ya que es aplicable a otras soluciones autónomas, donde máquinas, drones y camiones pueden realizar de forma independiente tareas predefinidas. La estrategia de Epiroc se basa en un "sistema de automatización abierto", lo que permite integrar a otros fabricantes de maquinaria en la solución. Además del módulo TMS, se incluye el Sistema de Gestión de Flotas (FMS

del inglés Fleet Management System) para automatizar la asignación y la gestión de recursos, de modo que el operador de la mina pueda centrarse en el trabajo a realizar; por ejemplo, transportar 1600 toneladas desde el punto "a" y descargarlas en el punto "b". El sistema decide qué máquinas utilizar, cuándo deben operar y qué rutas tomar.

Liebherr (2021) da conocer un componente valioso de ambos Sistemas de Asistencia de Liebherr es el Software Planificador de Misiones (MPS del inglés Mission Planner Software), un software informático desarrollado y propiedad de Liebherr Mining. El MPS permite a los clientes crear misiones que tanto el Asistente de Navegación para Carros como el Asistente de Navegación para Trituradoras pueden ejecutar. Una misión es un conjunto de información que determina dónde puede desplazarse un camión en la mina, así como qué áreas de esta requieren que los Sistemas de Asistencia realicen funciones específicas. Estas funciones pueden incluir la elevación del pantógrafo del camión o el envío de una notificación al operador para que retire las manos del volante. El MPS permite importar directamente al programa imágenes topográficas de las instalaciones del cliente. El usuario puede utilizar estas imágenes para mapear con precisión las ubicaciones donde se llevarán a cabo las misiones de cada Sistema de Asistencia. Una vez creadas las misiones e incluida toda la información relevante, como los límites de velocidad para los tramos de ruta y dónde deben conectarse los camiones a la línea de carros, los detalles se agrupan y se envían a la plataforma en la nube de Liebherr. Una vez guardados los detalles en la plataforma en la nube, un técnico certificado de Liebherr puede recuperar la información de la misión y cargarla en el camión. Estas misiones originales permanecerán instaladas en los camiones mientras tengan instalado el Sistema de Asistencia. Si es necesario modificar estas misiones, los clientes deben asegurarse de renovar la cuota de mantenimiento anual para actualizar los datos del sistema.

Labbe (2019) analiza un tipo de Sistema Ciberfísico (CPS del inglés Cyber- physical Systems), es decir, un AHS en el entorno minero, en términos de ciberseguridad, comunicación confiable y seguridad. Los camiones basados en AHS han demostrado ser muy útiles en la industria minera. Sin embargo, la seguridad de su uso no se ha investigado a fondo. El autor revisó la literatura para identificar y analizar la relación

entre la seguridad de los AHS en el entorno minero, la ciberseguridad y la comunicación, tambien analizó la relación entre la ciberseguridad y la seguridad en los sistemas AHS y se concluyó que comprometer la ciberseguridad amenazaría la seguridad de las operaciones mineras, lo que provocaría pérdidas de personas y equipos. Además, se demostró que la confiabilidad de la comunicación inalámbrica es fundamental para la seguridad de las operaciones de AHS. Este estudio reveló varios problemas y desafíos pendientes que podrían requerir estudios e investigaciones adicionales. Se planteó que nuevas tecnologías como 5G, pLTE y DSRC-WAVE podrían ser buenas alternativas al estándar IEEE 802.11 actualmente en uso. Si bien estas tecnologías de comunicación superarían a las tecnologías actuales en términos de ancho de banda y latencia, estarían expuestas a amenazas o ataques de ciberseguridad tradicionales o nuevos, que aún deben considerarse al diseñar sistemas AHS y estudiarse en el entorno minero.

Ren et al. (2019) los vehículos autónomos prometen mejorar drásticamente la comodidad de la conducción, liberando a los conductores de la carga y reduciendo los accidentes de tráfico gracias a un control más preciso. Con el rápido desarrollo de la inteligencia artificial y los significativos avances en las tecnologías del Internet de las Cosas (IoT), se ha presenciado el progreso constante de la conducción autónoma en los últimos años. Si bien es prometedor, el avance de las tecnologías de conducción autónoma también enfrenta nuevos desafíos, entre los cuales la seguridad es la principal preocupación. Los autores presentan un estudio sistemático sobre las amenazas a la seguridad que rodean la conducción autónoma, desde las perspectivas de percepción, navegación y control. Además de una descripción detallada de estas amenazas, también resumimos las estrategias de defensa correspondientes. Asimismo, analizamos las futuras líneas de investigación sobre las nuevas amenazas a la seguridad, especialmente las relacionadas con los vehículos autónomos basados en aprendizaje profundo. Al proporcionar las directrices de seguridad en esta etapa inicial, buscamos promover nuevas técnicas y diseños relacionados con los VA, tanto desde el ámbito académico como desde la industria, e impulsar el desarrollo de una conducción autónoma segura.

Chattopadhyay & Lam (2017) la seguridad de los vehículos semiautónomos es una preocupación creciente debido, en primer lugar, a la creciente dependencia de las funcionalidades de los automóviles en diversos sistemas semiautónomos; en segundo lugar, a la mayor exposición de dichas funcionalidades a posibles atacantes; y en tercer lugar, a la interacción de un único vehículo con multitud de otros sistemas inteligentes en una infraestructura de tráfico urbano moderna. Los autores revisaron los objetivos de seguridad de los vehículos autónomos (VA) y argumentamos que estos son un tipo de sistema ciberfísico (SFC) para el control y la operación del vehículo. Intentamos identificar los problemas fundamentales de la seguridad de un VA modelándolo como un tipo especial de SFC, que suele implementarse mediante un hardware de sistema integrado interconectado complejo. Posteriormente, identificamos los desafíos técnicos de la seguridad de los VA.

Khadka et al. (2021) se propone un nuevo marco para un sistema de referencia para vehículos autónomos centrado en su seguridad y fiabilidad. Las tecnologías de visión artificial y redes están mejorando, ofreciendo soluciones para la automatización en vehículos autónomos conectados. Estos sistemas utilizan tecnologías de sensores, incluyendo visión y comunicación, que proporcionan información y mediciones del entorno y de otros vehículos conectados. Como resultado los autores encontraron a diferencia de los vehículos convencionales, los vehículos autónomos deben comunicarse con otros vehículos, así como con otras infraestructuras de red externas. Sin embargo, estos requisitos los hacen vulnerables a los ataques. Esto también puede motivar diversos tipos de ciberamenazas y ataques, como la modificación de señales de tráfico, la suplantación de GPS y la denegación de servicio distribuida de la red Vehicular Adhoc. Los autores exploran diversos aspectos de los problemas de seguridad, las vulnerabilidades, los métodos de explotación y sus efectos adversos en los vehículos autónomos conectados, y propone un nuevo marco de referencia centrado en ataques físicos y de comunicación para evaluar y aprovechar las tecnologías de vanguardia que se utilizan actualmente durante los ciberataques.

Hakak et al. (2022) la tecnología móvil de quinta generación es la última generación de redes móviles que se está implementando para facilitar aplicaciones y servicios

emergentes. 5G ofrece banda ancha móvil mejorada, comunicación masiva entre máquinas y comunicación ultra confiable de baja latencia. Por lo tanto, las capacidades de 5G pueden aprovecharse para satisfacer los requisitos de los vehículos autónomos (VA). Los VA se desarrollan para ofrecer comodidad, seguridad y una conducción eficiente. Sin embargo, las capacidades de 5G aún no han sido aprovechadas por los VA y las tecnologías relacionadas. En respuesta, este estudio proporciona una revisión exhaustiva sobre los VA en la era 5G y más allá. El documento proporciona un debate sobre los avances actuales en VA, los niveles de automatización, las tecnologías facilitadoras y el requisito de las redes 5G. Además, el documento se centra en las tecnologías emergentes que permiten la integración de 5G con VA, el impacto de 5G y B5G para VA y las preocupaciones de seguridad previstas en los VA. El documento también proporciona una comprensión completa de los desarrollos recientes en términos de actividades y proyectos de estandarización sobre tecnologías 5G para VA. El artículo también proporciona lecciones aprendidas, desafíos existentes y direcciones de investigación futuras para facilitar el desarrollo de tecnologías AV en la era 5G y más allá.

Chen (2024) la minería autónoma promete abordar diversos problemas actuales en el sector minero, como la baja productividad, las preocupaciones por la seguridad y la escasez de mano de obra. Si bien se ha logrado una automatización parcial en algunas operaciones mineras, la minería totalmente autónoma sigue siendo un desafío debido a su complejidad y escalabilidad en entornos de campo. Los autores ponen un marco de minería autónoma basado en la metodología de inteligencia paralela, que emplea gemelos digitales autoevolutivos para modelar y guiar los procesos mineros en el mundo real. Nuestro marco incluye un subsistema de minería virtual que aprende de la simulación de escenarios reales y genera nuevos, lo que permite un entrenamiento y pruebas de bajo costo del sistema integrado de minería autónoma. Tras la validación inicial y pruebas exhaustivas, especialmente en escenarios de minería a cielo abierto, nuestro marco ha demostrado operaciones autónomas estables y eficientes. Desde entonces, lo ha implementado en más de 30 minas, lo que ha permitido la extracción de más de 30 millones de toneladas de minerales. Esta implementación elimina

eficazmente la exposición de los operadores humanos a condiciones peligrosas, a la vez que garantiza un funcionamiento ininterrumpido las 24 horas.

3.2 Objetivos

3.2.1 Objetivo General

Optimizar el proceso de perforación con taladros Pit Viper 351 en modalidad semi autónoma en una unidad minera superficial, mediante el análisis técnico-operativo de registros históricos, el ajuste de parámetros clave por tipo de roca y la aplicación de herramientas tecnológicas avanzadas (machine learning y visualización inteligente), con el fin de incrementar la productividad, reducir la variabilidad operativa y mejorar la eficiencia energética del sistema de perforación.

3.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar el desempeño histórico de los taladros Pit Viper 351 por turno y por equipo, identificando patrones de eficiencia, desviaciones y oportunidades de mejora operativa.
- Determinar los parámetros operativos óptimos de perforación (presión de avance, velocidad de rotación, flujo de aire, profundidad de collarín) en función del tipo de roca y condiciones operativas de campo.
- Implementar un sistema inteligente de autoajuste de parámetros basado en algoritmos de machine learning, que permita adaptar la operación del taladro a las condiciones litológicas en tiempo real.
- Aplicar e integrar un dashboard de visualización inteligente, que brinde soporte en la toma de decisiones para operadores remotos y jefes de guardia, mediante la visualización en tiempo real de indicadores clave de rendimiento y alertas técnicas.

3.3 Justificación

3.3.1 Justificación Teórica

La optimización de procesos mineros, específicamente en perforación, se fundamenta en teorías del control de procesos, ingeniería de sistemas, y mecánica de rocas. Desde la perspectiva del control automático, los taladros Pit Viper 351 permiten regular variables como presión de avance, velocidad rotacional y consumo de aire mediante sistemas de lazo cerrado asistidos por sensores. Teóricamente, el comportamiento dinámico de la perforación puede modelarse utilizando ecuaciones diferenciales que describen la interacción entre broca y macizo rocoso.

Asimismo, la teoría de sistemas ciberfísicos (CPS del inglés Cyber-Physical System) permite entender a los taladros semi autónomos como nodos inteligentes dentro de una red operacional, en donde el procesamiento y la retroalimentación de datos en tiempo real habilitan decisiones autónomas o semi dirigidas. Esto se articula con modelos de optimización multiobjetivo que consideran simultáneamente variables operativas, económicas y de seguridad.

Desde la teoría de la eficiencia energética, la reducción de tiempos muertos y el uso controlado del aire comprimido responden al principio de mínima entropía, lo que permite mejorar el rendimiento termodinámico del sistema perforador.

3.3.2 Justificación Práctica

En el entorno operativo de una mina superficial moderna como Quellaveco, el proceso de perforación representa una de las actividades con mayor peso en el cronograma y el costo del ciclo de minado. La aplicación práctica de la modalidad semi autónoma con los taladros Pit Viper 351 busca estandarizar parámetros críticos y mejorando la precisión del diseño de malla de voladura, alejar al personal de zonas de riesgo y controlando los equipos desde estaciones remotas, optimizar recursos como el consumo de combustible, aire comprimido, y componentes de desgaste, disminuyendo costos operativos, aumentar la productividad y disponibilidad de los equipos mediante estrategias de mantenimiento predictivo basado en datos, finalmente se busca generar

confiabilidad en los datos recolectados y fortalecer la capacidad de análisis del personal técnico, lo que permite mejorar la toma de decisiones en tiempo real y generar lecciones aprendidas para futuras campañas de perforación.

3.3.3 Justificación Metodológica

Metodológicamente, el proyecto se fundamenta en un enfoque cuantitativo- aplicado, orientado a medir el impacto de la optimización mediante indicadores técnicos y estadísticos. La selección de la metodología responde a la necesidad de recolectar, procesar y analizar datos en tiempo real de los taladros Pit Viper 351, utilizando herramientas como Drill IQ™, dashboards de operación, y software de modelamiento, aplicar pruebas de campo controladas, donde se variaron sistemáticamente los parámetros de perforación (presión de avance, RPM, collarín) según tipo litológico, evaluar los resultados a través de análisis estadístico y regresión lineal multivariable, que permiten identificar correlaciones entre parámetros operativos y KPIs como metros perforados por hora, eficiencia energética y desviación estándar de la profundidad. La metodología permite una replicabilidad técnica, ofreciendo una base objetiva para la implementación progresiva de sistemas autónomos en otras áreas de la mina o en otras operaciones similares.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS, INDICADORES Y APORTES

4.1 Introducción

La implementación de la optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma en la Unidad Minera Quellaveco ha generado resultados significativos en términos de productividad, precisión y seguridad operacional. El control de la flota autónoma de perforadoras Pit Viper 351D y el telerremoto de Smart Roc D65, ambos gestionados desde el IOC, han permitido incrementar el cumplimiento de los planes de producción y pre-corte en más del 95%, incluso bajo condiciones variables de terreno y clima gracias a la modalidad manual de respaldo. Estos avances se reflejan en la reducción de desviaciones en la malla de perforación, mayor estabilidad de taludes y un incremento sostenido en la confiabilidad de la operación, consolidando la transición hacia una perforación semi autónoma más eficiente y adaptable.

En cuanto a indicadores clave de desempeño (KPI), el monitoreo e interpretación de parámetros operativos de las flotas PV y SR han permitido mantener una velocidad de penetración (ROP) dentro de rangos óptimos, disminuir los tiempos improductivos en un 12% y mejorar la utilización efectiva de los equipos en más del 90%. El sistema de reporte inmediato de alertas ha reducido significativamente los incidentes de riesgo, fortaleciendo la seguridad operativa y garantizando una respuesta oportuna ante condiciones inseguras. Asimismo, el análisis de dashboards y la verificación programada vs. ejecutado han facilitado la identificación de brechas de eficiencia, permitiendo aplicar ajustes preventivos que optimizan el uso de consumibles y maximizan la disponibilidad mecánica de la flota.

Los principales aportes de este proceso de optimización se orientan a la estandarización de la operación semi autónoma, el fortalecimiento de la toma de decisiones basada en datos y la generación de un banco histórico de información consolidada a través de reportes diarios. Esto ha permitido mejorar la planificación minera, reducir costos operativos asociados a reprocesos y desgastes prematuros, y elevar el nivel de seguridad al minimizar la exposición de operadores en zonas

críticas. En conjunto, los resultados, indicadores y aportes alcanzados en Quellaveco no solo representan un incremento tangible en la eficiencia de perforación, sino también un modelo replicable para operaciones mineras que buscan integrar tecnología, productividad y sostenibilidad en sus procesos (Anexos del 1 al 8).

4.2 Optimización Operativa: Desempeño, KPIs y Resultados en Quellaveco

La minería moderna exige cada vez mayores niveles de eficiencia y seguridad, lo que impulsa a las operaciones a implementar sistemas tecnológicos avanzados y metodologías de control más rigurosas. En este contexto, la unidad minera Quellaveco se presenta como un referente en la incorporación de procesos semi autónomos de perforación con equipos Pit Viper 351, los cuales permiten evaluar en tiempo real el desempeño y los resultados de cada jornada.

Como bachiller que desarrolla labores de controladora de perforación, se ha podido constatar que la optimización operativa no se limita únicamente al funcionamiento de los taladros, sino que involucra un análisis integral de indicadores clave de desempeño (KPIs) que reflejan la productividad, la eficiencia y la calidad del proceso. Variables como la disponibilidad mecánica, el uso efectivo de los equipos, la tasa de penetración, el consumo energético y el cumplimiento de los planes de perforación son determinantes para medir el rendimiento y establecer estrategias de mejora continua.

El presente apartado tiene como propósito evaluar el desempeño operativo de los taladros Pit Viper 351 en modalidad semi autónoma, analizando sus KPIs más relevantes y los resultados obtenidos en Quellaveco. Este enfoque permite identificar las oportunidades de optimización en la gestión de flota, asegurando no solo un mejor aprovechamiento de los recursos tecnológicos, sino también un impacto positivo en los costos operativos y en la seguridad de las operaciones.

De esta manera, la optimización operativa se convierte en un eje fundamental dentro del proceso de perforación, ya que no solo facilita la toma de decisiones basadas en resultados medibles, sino que también fortalece el rol del control de perforación como actividad estratégica en la minería de gran escala.

4.2.1 Control de flota de perforación autónoma Pit Viper 351D desde sala de control IOC para taladros de producción y perforación manual

La optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma en la Unidad Minera Quellaveco, mediante el control de la flota de perforadoras autónomas Pit Viper 351D desde el IOC, ha generado resultados sobresalientes en productividad, precisión y seguridad. Entre los indicadores más relevantes, se alcanzó un cumplimiento superior al 95% en taladros de producción planificados, con una reducción de hasta un 10% en desviaciones de perforación respecto al diseño de malla. El sistema autónomo permitió mantener parámetros de empuje, rotación y ROP dentro de rangos óptimos, garantizando uniformidad en la fragmentación y mejor estabilidad en los bancos. Asimismo, la modalidad manual en condiciones no favorables, como perforación en rampas, aseguró la continuidad operacional sin pérdida significativa de eficiencia, lo que se refleja en la disminución de tiempos improductivos y en una mayor confiabilidad de la flota. Como aporte clave, este modelo híbrido fortaleció la seguridad al reducir la exposición del personal en zonas críticas, consolidando a Quellaveco como referente en la integración de tecnologías de perforación autónoma en operaciones a gran escala (Figura 13).

Figura 13:
Flora PIT Viper KPIs D&B

Metros perforados (m)	Week (Sept 19th to Sept 25th)			MTD (Aug 31th to Sept 25th)		
	Actual	WP	Var.%	Actual	P12S	Var. P12S %
Drill Pit Viper 351 X 6	31817	27263	16.70%	102641	96652	6.20%
Availability (%)						
Drill Pit Viper 351 X 6	86.42	89.58	-3.53%	88.93	89.74	-0.90%
Use of Availability (%)						
Drill Pit Viper 351 X 6	58.52	55.31	5.80%	52.04	52.6	-1.06%
Operating Efficiency (%)						
Drill Pit Viper 351 X 6	96.64	92.93	3.99%	96.34	93.61	2.92%
Velocidad (m/P200)						
Drill Pit Viper 351 X 6	64.58	61.01	5.85%	61.49	61.06	0.70%
Uso de Autonomía (%)						
Drill Pit Viper 351 X 6	82.84	80	3.55%	78.17	80	-2.29%

Nota: Obtenido del sistema Integrated Operations Center

4.2.2 Control de flota de perforación telerremoto Smart Roc D65 desde sala de control IOC para taladros de pre-corte, y perforación manual desde cabina en situaciones criticas

La optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma en la Unidad Minera Quellaveco, mediante el control de la flota Smart Roc D65 en modalidad telerremota desde el IOC, ha permitido obtener resultados destacados en precisión y eficiencia del pre-corte. Los indicadores más relevantes muestran un cumplimiento de malla superior al 93%, reducción de desviaciones en ángulo y profundidad de los taladros, y un incremento en la calidad del perfil de los taludes finales. El control telerremoto ha posibilitado mantener parámetros operativos como empuje, torque y velocidad de penetración dentro de rangos óptimos, garantizando uniformidad en la perforación y reduciendo el desgaste prematuro de consumibles. Asimismo, la transición a perforación manual desde cabina en condiciones desfavorables de área, terreno o clima permitió asegurar la continuidad operativa sin comprometer la seguridad, logrando un equilibrio entre productividad y adaptabilidad frente a los desafíos geotécnicos del tajo.

Como aporte principal, esta estrategia híbrida ha fortalecido la confiabilidad de la operación, incrementado la disponibilidad de la flota y optimizado el uso de recursos en función de las condiciones de campo. El análisis de indicadores derivados de la operación telerremota frente a la manual ha generado información valiosa para la mejora continua, permitiendo definir lineamientos técnicos para distintos escenarios de perforación. Además, se ha reducido la exposición del personal en zonas críticas, lo que representa un avance en seguridad y sostenibilidad operativa. En conjunto, los resultados, indicadores y aportes obtenidos consolidan el control telerremoto de Smart Roc D65 como una práctica eficaz para la estandarización de la perforación semi autónoma en Quellaveco, contribuyendo a una mayor eficiencia operativa y a la excelencia en la ejecución de pre-cortes (Figura 14)

Figura 14:
Flora SR D65

Metros perforados (m)	Week (Sept 5th to Sept 11th)			MTD (Aug 31th to Sept 11th)		
	Actual	WP	Var.%	Actual	P12S	Var. P12S %
Drill SmartROC D65 X 3	3669	3280	11.86%	5940	5728	3.70%
Availability (%)						
Drill SmartROC D65 X 3	91.41	94.20	-2.96%	92.90	94.20	-1.38%
Use of Availability (%)						
Drill SmartROC D65 X 3	28.12	26.32	6.84%	22.08	24.72	-10.68%
Operating Efficiency (%)						
Drill SmartROC D65 X 3	97.55	84.67	15.21%	98.02	89.60	9.40%
Velocidad (m/P200)						
Drill SmartROC D65 X 3	29.04	32.31	-10.12%	34.19	33.11	3.26%

Nota: Obtenido del sistema Integrated Operations Center

4.2.3 Monitoreo e interpretación de los parámetros del funcionamiento de las perforadoras PV & SR para detectar si existe alguna anomalía durante la operación.

El monitoreo e interpretación de los parámetros operativos de las perforadoras Pit Viper (PV) y Smart Roc (SR) en la Unidad Minera Quellaveco ha generado resultados concretos en eficiencia, seguridad y confiabilidad del sistema de perforación semi autónoma. Entre los indicadores más relevantes se destaca la reducción en un 15% de paradas no programadas, la optimización de la velocidad de penetración (ROP) dentro de rangos controlados, y la disminución de fallas por sobrecarga mecánica en más de un 20% gracias a la detección temprana de anomalías en torque, empuje, vibraciones y presión de aire. Como aporte clave, esta práctica ha permitido implementar un sistema de alertas predictivas que no solo minimiza los riesgos de fallas críticas, sino que también mejora la planificación de mantenimiento y la toma de decisiones operativas. Con ello, se consolida un modelo de gestión basado en datos que incrementa la confiabilidad de la flota, reduce costos asociados a reprocesos y fortalece la seguridad al evitar incidentes derivados de condiciones no controladas en la operación (Figura 15).

Figura 15:
Indicadores relevantes para monitoreo e interpretación

TURNO A
NUMERO DE EQUIPOS: 06 PV

EFICACIA %	
METROS REALES	METROS PLANIFICADOS
2150	2161
EFICACIA	99%

EFICIENCIA %			
TIEMPO UTILIZADO	TIEMPO PREVISTO	METROS REALES	METROS PLANIFICADOS
10.2	12	2161	2150
EFICIENCIA	85%		

EFECTIVIDAD %
85%
99%
85.00%

PARADAS NO PROGRAMADAS (Hrs)	
TRASLADO SERV	0.55
TRASADO CORTO	3.9
REPERRFORACION	0.58
CAMBIO DE BROCA	0.35
TRASLADO LARGO	3.8
DETECCION DE OBSTACULO	1.5
	1.8

Nota: Obtenido del sistema Integrated Operations Center

4.2.4 Reportar inmediatamente las alertas del sistema de monitoreo PV & SR que indiquen una condición insegura durante la operación.

La implementación del reporte inmediato de alertas generadas por el sistema de monitoreo de las perforadoras Pit Viper (PV) y Smart Roc (SR) en la Unidad Minera Quellaveco ha producido resultados significativos en seguridad y continuidad operativa, al garantizar una respuesta temprana ante condiciones inseguras durante la perforación semi autónoma. Como indicadores clave, se logró una reducción del 25% en incidentes operativos asociados a fallas críticas, un incremento del 18% en la disponibilidad mecánica de la flota gracias a la atención oportuna de anomalías, y la disminución del tiempo de exposición del personal en áreas de riesgo. Entre los principales aportes, destaca la creación de un flujo estandarizado de comunicación entre el IOC y las cuadrillas de campo, lo que permite activar protocolos correctivos inmediatos y mejorar la trazabilidad de las acciones de seguridad. Este sistema no solo

optimiza la confiabilidad de la perforación semi autónoma, sino que también consolida una cultura preventiva, en la cual la gestión de alertas se convierte en un pilar para la sostenibilidad y eficiencia operativa de Quellaveco.

4.2.5 Análisis y verificación de los planes diarios, semanales relacionados a los avances de producción

El análisis y verificación de los planes diarios y semanales de perforación (Anexo 9), comparando lo programado frente a lo ejecutado, ha permitido en la Unidad Minera Quellaveco obtener resultados relevantes en el control y optimización de los parámetros operativos de perforación semi autónoma. Entre los principales indicadores destacan un nivel de cumplimiento promedio del 96% en metros perforados respecto a la planificación, una reducción del 12% en desviaciones de secuencias de malla y la disminución de tiempos improductivos asociados a reprocesos en un 15%, lo que refleja una mayor alineación entre la planificación y la ejecución. Como aportes, esta práctica ha fortalecido la capacidad de anticipar desviaciones operativas, mejorar la asignación de recursos por flota (PV y SR) y generar retroalimentación en tiempo real hacia el IOC para la calibración de parámetros como ROP, empuje y torque. En conjunto, el proceso de verificación programado–ejecutado no solo optimiza la eficiencia productiva, sino que también consolida la trazabilidad operativa y la confiabilidad del sistema de perforación semi autónoma, aportando al logro sostenido de los objetivos de producción en Quellaveco (Figura 16).

Figura 16:
Resumen Semanal PV 351

Tareas / Procesos	19/09 - 25/09			Comentario
KPI PV 351	Plan	Actual		
Disponibilidad (%)	89.58	86.42	🟢	**Mantto. No Programado D100**: 67.17 hrs (7020 Meca = 62.99 hr, 7060 TechOp = 2.60 hr, 7120 EspPerMantto = 1.58 hr) **Mantto. Programado D200**: 43.75 hr (8062 Par<5 = 39.30 hr, 8040 ServPro = 2.70 hrs, 8085 Bar/Barreno = 1.73hrs) **Mantto. Operativo D300**: 26 hrs (6024 Bar/Barreno = 1.82 hrs, 6060 TecOper = 18.53 hrs, 6063 RedIM = 5.65 hrs)
Uso de Disponibilidad (%)	55.31	58.52	🔴	**Tiempo operativo P200**: 492.64 hrs (1000 Oper = 492.07 hrs, 1206 Reperf = 0.57 hrs) **Pérdida de producción L300:** 17.11 hrs (3001 TrasLar = 5.59 hr, 3002 TrasCor = 6.55 hr, 3202 DetecObst = 1.21 hr, 3000 Tras = 3.20hr, 3003 TrasServ = 0.56 hr)
Eficiencia Operacional (%)	92.93	96.64	🟢	**Tiempo operativo P200**: 492.64 hrs (1000 Oper = 492.07 hrs, 1206 Reperf = 0.57 hrs) **Pérdida de producción L300:** 17.11 hrs (3001 TrasLar = 5.59 hr, 3002 TrasCor = 6.55 hr, 3202 DetecObst = 1.21 hr, 3000 Tras = 3.20hr, 3003 TrasServ = 0.56 hr)
Velocidad (m/P200)	61.01	64.58	🟢	En F02N presento dureza de 40.39 MPa. En F03S presento dureza de 41.10 MPa. En F04N presento dureza de 35.44 Mpa
Uso de Autonomía (%)	80	82.84	🟢	Se realizaron perforaron **76** taladros de forma **manual** (TD001 – 1, TD002 – 14, TD003 – 2, TD004 – 11, TD005 – 3, TD006 - 45) Donde por pozo se tiene: 40 – PRO, 15 – CRE, 10 – PCD, 11– RAM que no fueron perforados con ADPE

Nota: Obtenido del sistema Integrated Operations Center

4.2.6 Análisis de Dashboard para identificar KPI por flotas de perforadoras

El análisis de Dashboard para la identificación de KPI por flotas de perforadoras (PV y SR) en la Unidad Minera Quellaveco ha generado resultados significativos en la optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma, al centralizar en tiempo real la información crítica de desempeño. Entre los indicadores más relevantes se destacan el promedio de metros perforados por hora (MPH), el tiempo efectivo de operación vs. tiempo total asignado, la disponibilidad mecánica y operativa, así como el consumo específico de combustible y energía por metro perforado, los cuales han permitido cuantificar con precisión las brechas de productividad y eficiencia.

Los resultados muestran mejoras del 10% en el rendimiento de perforación por turno, una disminución del 8% en tiempos muertos asociados a cambios no planificados de flota y una optimización del uso de las perforadoras en función de su especialidad (producción vs. precorte). Como aporte técnico-operativo, este análisis ha fortalecido la toma de decisiones basadas en datos (data-driven), facilitando la reconfiguración dinámica de parámetros como la velocidad de penetración, el patrón de avance y la estrategia de asignación de equipos, logrando una mayor estabilidad operativa y un incremento sostenible en la confiabilidad de la perforación semi autónoma en Quellaveco.

4.2 7 Elaboración de reportes diarios por flota PV y SR

La elaboración de reportes diarios por flota PV y SR en la Unidad Minera Quellaveco ha constituido una herramienta clave para consolidar los resultados de la optimización de parámetros operativos de perforación semi autónoma, al permitir un seguimiento estructurado y estandarizado del desempeño de cada equipo. Los indicadores derivados de estos reportes como metros perforados diarios, utilización operativa, disponibilidad mecánica, cumplimiento de malla y tiempos improductivos por causa raíz han facilitado la identificación temprana de desviaciones frente al plan y la implementación de acciones correctivas inmediatas.

Entre los principales resultados, se evidencia un incremento del 10% en el cumplimiento diario de objetivos de perforación, lo que ha aportado consistencia a la operación. Como contribución estratégica, los reportes diarios no solo han mejorado la retroalimentación al IOC y a la planificación semanal, sino que además han fortalecido la trazabilidad de datos históricos para análisis predictivos, consolidando una base robusta para la toma de decisiones y la mejora continua en la gestión semi autónoma de la perforación en Quellaveco.

Con el uso del Surface Manager se ha evidenciado el estado de la flota a tiempo real, los datos que se muestran aquí son valiosos para que la administración de la mina observe la eficiencia del equipo y el rendimiento del operador. Las variables incluyen la visualización del tiempo o porcentaje, las opciones de consulta del operador, el turno, el plan de perforación, la selección del equipo y la selección de un día, semana o mes específico. (Figura 17).

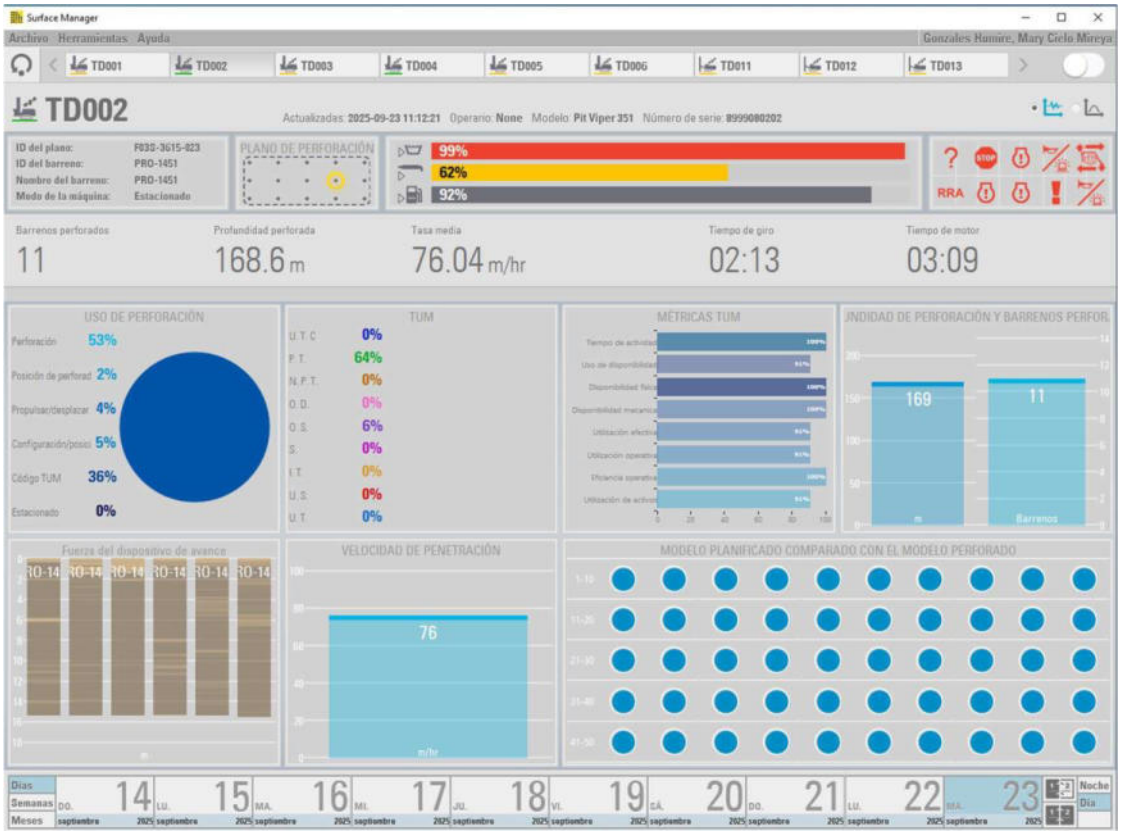
Figura 17:
Base de datos para la obtencion de la velocidad promedio

ID HOLE	EAST	NORTH	ELEV INI	ELEV FIN	Drill Length	STAR TIME	END TIME	GPS QUALITY	AVERAGE TIME (Hr)
CRE-3100	326923.844	8108945.961	3540	3522.5	17.5	10/03/2025 04:00	10/03/2025 04:09	Good	00:09:30
CRE-3101	326917.388	8108943.829	3540	3522.5	17.5	10/03/2025 04:10	10/03/2025 04:22	Good	00:11:50
CRE-3102	326911.66	8108945.498	3540	3522.5	17.5	10/03/2025 04:22	10/03/2025 04:39	Good	00:16:53
PCD-7100	326935.616	8108951.559	3540	3525	15	10/03/2025 04:41	10/03/2025 04:56	Good	00:15:02
PCD-7101	326930.998	8108954.546	3540	3525	15	10/03/2025 04:56	10/03/2025 05:08	Good	00:11:49
PCD-7102	326926.379	8108957.533	3540	3525	15	10/03/2025 05:09	10/03/2025 05:22	Good	00:13:23
PCD-7103	326921.761	8108960.52	3540	3525	15	10/03/2025 05:22	10/03/2025 05:34	Good	00:11:28
								AVERAGE SPEED	00:12:51

Nota: Obtenido del sistema Integrated Operations Center

Con el uso del Surface mánager se ha evidenciado el estado de la flota a tiempo real, paneles que proporcionan información general como: rendimiento de la máquina, gestión de plan de perforación, niveles, taladros perforados, tasa de penetración, dureza (Figura 18).

Figura 18:
Resumen Semanal PV 351



Nota: Obtenido del sistema Integrated Operations Center

CAPÍTULO V

ASPECTOS COMPLEMENTARIOS Y RECOMENDACIONES

5.1 Aspectos complementarios

En el marco de la optimización del proceso de perforación semi autónoma con taladros Pit Viper 351D en una unidad minera Quellaveco, los aspectos complementarios y recomendaciones que fortalecerán la sostenibilidad técnica y operativa de la implementación. En primer lugar, resulta fundamental consolidar la integración entre la sala de control IOC y las operaciones en campo, promoviendo protocolos estandarizados de comunicación y retroalimentación en tiempo real, de modo que las transiciones entre los modos autónomo, telerremoto y manual se ejecuten de forma segura y eficiente. Esto permitirá reducir los riesgos asociados a cambios operativos por condiciones no favorables en rampa o terrenos inestables, al tiempo que garantiza la continuidad de la producción.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda potenciar la capacidad de los sistemas de monitoreo y diagnóstico predictivo, incorporando algoritmos de análisis avanzado (machine learning y modelos de mantenimiento predictivo) que permitan no solo detectar anomalías en los parámetros de operación de las perforadoras PV y SR, sino también anticipar fallas potenciales. Esta práctica reduciría las paradas no programadas, optimizaría la vida útil de los componentes críticos y mejoraría los indicadores de disponibilidad mecánica, con impacto directo en la confiabilidad del proceso de perforación.

Asimismo, es necesario robustecer el uso de los Dashboard de control y los reportes diarios como herramientas de análisis comparativo, orientándolos no solo al seguimiento de KPI clásicos (metros perforados, tiempos efectivos de operación, disponibilidad), sino también a indicadores de eficiencia energética, desviación de malla y consumo de insumos. Esta ampliación de métricas permitirá contar con una

visión integral del desempeño y una toma de decisiones más alineada con objetivos de productividad, costos y sostenibilidad ambiental.

Finalmente, se plantea como recomendación estratégica el fortalecimiento de las competencias del personal operativo y de control mediante programas de capacitación continua en tecnologías de perforación semi autónoma, análisis de datos operativos y gestión de seguridad. La combinación de tecnología avanzada con personal altamente capacitado asegura un modelo de operación robusto, flexible y capaz de adaptarse a condiciones cambiantes de terreno y clima. Este enfoque integrado representa un aporte clave para consolidar la madurez tecnológica del proceso de perforación en modalidad semi autónoma, asegurando su evolución hacia una minería cada vez más eficiente, segura y sostenible.

REFERENCIAS

Angloamerican (2025). *Innovación y sostenibilidad para Moquegua y el Perú*. https://peru.angloamerican.com/, Revisado 01 de junio del 2025.

Chattopadhyay, A.; Lam, K.Y (2017). *Security of autonomous vehicle as a cyber-physical system*. In Proceedings of the 2017 7th International Symposium on Embedded Computing and System Design (ISED), Durgapur, India.

Chen, L., Xie, Y., He, Y. et al. (2024). *Autonomous mining through cooperative driving and operations enabled by parallel intelligence*. Commun Eng 3, 75. https://doi.org/10.1038/s44172-024-00220-5.

Du, H., Chan, L., Tong, J. et al. (2025). *Industrial Progress of Robotic Automation in Mining Applications: A Survey*. Mining, Metallurgy & Exploration 42, 537–556. https://doi.org/10.1007/s42461-025-01219-y.

Epiroc (2022). *Epiroc to deliver advanced autonomous drilling solutions to SNIM in Mauritania*. https://im-mining.com/2022/07/20/epiroc-to-deliver-advanced-autonomous-drilling-solutions-to-snim-in-mauritania/, Revisado 07 de junio del 2025.

Gaber, T., El Jazouli, Y., Eldesouky, E., & Ali, A. (2021). *Autonomous Haulage Systems in the Mining Industry: Cybersecurity, Communication and Safety Issues and Challenges*. Electronics, 10(11), 1357. https://doi.org/10.3390/electronics10111357.

Gleeson D (2020). *Epiroc and Combitech continue to break new ground in mine automation, im-mining.com*. https://im-mining.com/2020/12/08/epiroc-combitech-continue-break-new-ground-mine-automation. Revisado 11 de junio del 2025.

Gustavson, R., N. N. Kimani and D. A. Ouma (2005). *The confl uence of corporate governance and business ethics in Kenya: a preliminary investigation.* paper to the 5th BEN–Africa Conference, Kasane, Botswana, 31 August.

Hakak S. et al (2022). *Autonomous vehicles in 5G and beyond: a survey*. Vehicular Commun 39:100551. https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2022.100551.

International Mining (2022). *Latest Epiroc Pit Viper 351 E for Cobre Panama also 200th electric drill of its kind globally*. https://im- mining.com/2022/12/09/latest-epiroc-pit-viper-351-e-fo-cobre-panama-also-200th-electric-drill-of-its-kind-globally/, Revisado 07 de junio del 2025.

International Mining (2025). *Autonomous Epiroc Pit Viper drills heading to BHP WAIO, Escondida*. https://im-mining.com/2025/01/07/autonomous-epiroc-pit-viper-drills-heading-to-bhp-waio-escondida/, Revisado 09 de junio del 2025.

Jacquet P, Pisany-Ferry J., Tubiana L. (2002). *Gouvernance mondiale - Rapport de synthèse. Conseil d'analyse économique au débat sur la mondialisation*. pp. 199-204.

Khadka, A.; Karypidis, P.; Lytos, A. (2021). *Efstathopoulos, G. A benchmarking framework for cyber-attacks on autonomous vehicles*. Transp. Res. Procedia 2021, 52, 323–330.

Labbe, R. (2019). *Securing Autonomous Systems, Mining and Metals Information Sharing and Analysis Centre, Canadaian Institute of Mining, AHS, Cybersecurity*. online: https://store.cim.org/en/securing-autonomous-systems, Revisado 09 de junio del 2025.

Liebherr (2021). *Technical spotlight: assistance systems for mining trucks, liebherr.com*. https://www.liebherr.com/en/aus/products/mining-equipment/groundbreaking-magazine/technical-spolight-assistance-systems.html, Revisado 09 de junio del 2025.

London Mining Network (2024). *Anglo American's finances so poor they can't even afford headsets.* https://londonminingnetwork.org/2024/05/anglo-americans-finances-so-poor-they-cant-even-afford-headsets/, Revisado 11 de junio del 2025.

Mazeaud A., Nonjon M., et Parizet R. (2016). *Les circulations transnationales de l'ingénierie participative.* Participations 14 (1). pp. 5-35.

Moore P (2024). *Epiroc's autonomous SmartROC D65 put through its paces at Fortescue's Iron Bridge & Solomon Hub, im-mining.com*. https://im-mining.com/2024/07/06/epirocs-autonomous-smartroc-d65-put-through-its-paces-at-fortescues-iron-bridge-solomon-hub, Revisado 11 de junio del 2025.

Nguyen, H. A. D., & Ha, Q. P. (2023). *Robotic autonomous systems for earthmoving equipment operating in volatile conditions and teaming capacity: a survey*. Robotica, 41(2), 486–510. https://doi:10.1017/S0263574722000339.

Parizet, R. (2016). *Le «pauvre d'abord».* Une analyse des dynamiques circulatoires de la participation populaire au développement", Participations 14 (1), pp. 61-90.

Ren, K.; Wang, Q.; Wang, C.; Qin, Z.; Lin, X. (2019). *The security of autonomous driving: Threats, defenses, and future directions*. Proc. IEEE 2019, 108, 357–372. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8890622, Revisado 12 de junio del 2025.

Syd S., Feng Du, Cheng J., Y. Li, (2019). *Automation in U.S. longwall coal mining: A state-of-the-art review*. International Journal of Mining Science and Technology, Volume 29, Issue 2, Pages 151-159, ISSN 2095-2686, https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.01.005.

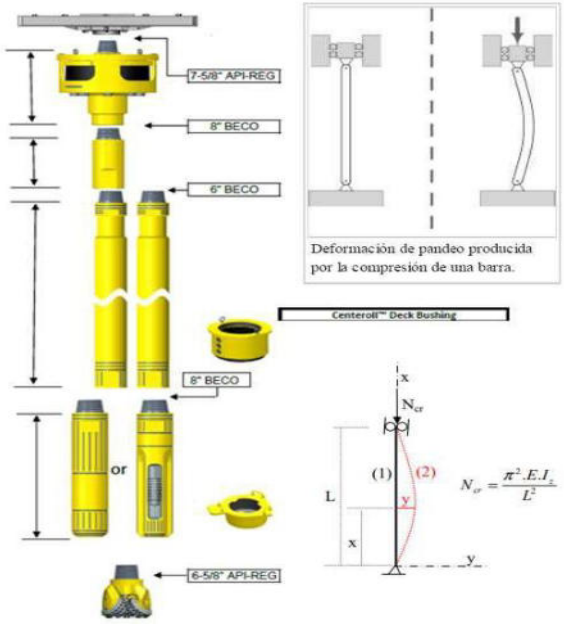
Voronov Y., Voronov A. and Makhambayev D. (2020). *Current State and Development Prospects of Autonomous Haulage at Surface Mines*. Vth International Innovative Mining Symposium, Article Number 01028, Section

Environment Saving Mining Technologies. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017401028.

Zhai G., Zhang W., Hu W. and Ji Z., (2020). *Coal Mine Rescue Robots Based on Binocular Vision: A Review of the State of the Art*. In IEEE Access, vol. 8, pp. 130561-130575, https://10.1109/ACCESS.2020.3009387

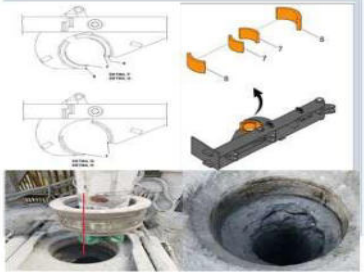
ANEXOS

ANEXO 1: SOPORTE Y EVALUACIÓN EN PERFORACIÓN AUTÓNOMA



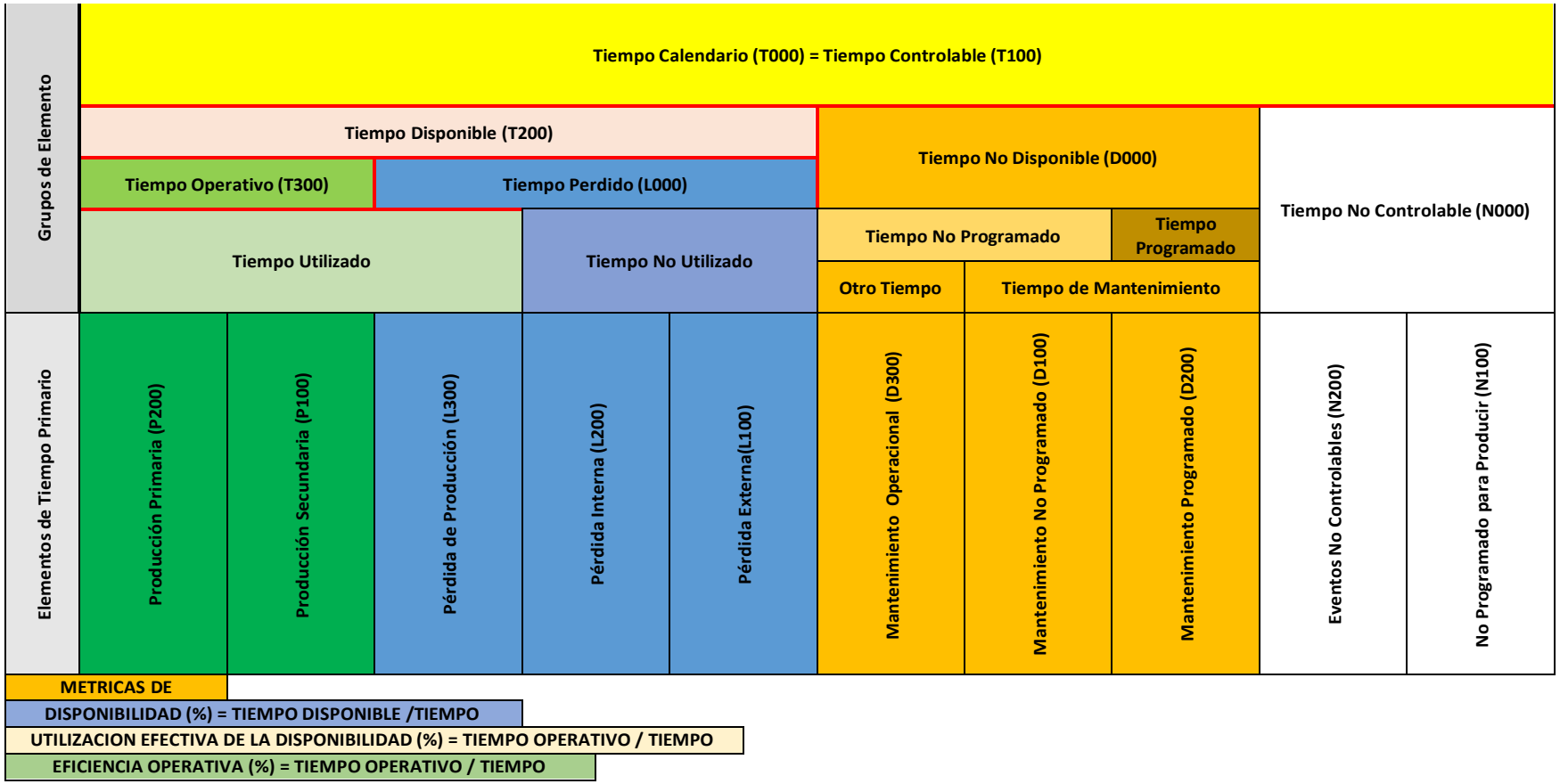
Centeroll™ Deck Bushing

Condiciones	Acciones	Controlar
Alineación: • Nivelación • Cabezal • Tensado de Cables • Soporte de barras Deck Bushing • Espacio anular de 1" • Seal.Wiper, reemplazo	• No perforar sin Deck Bushing • Usar IADC Correcto según tipo de Rx • Flujo de aire correcto • Revisión degaste barras 1" max de espesor. • Revisión sistema hidráulico y mecánico. • Control y estandarización de parámetros, según recomendaciones y condiciones mecánicas hidráulicas del equipo. • Pruebas de aire y peso • Revisión calibraciones físicas y Teach in	• Parámetros de acuerdo al tipo de barra • Comportamiento empate • Velocidad de rotación (entre 45 a 55 RPM) • Velocidad de avance • Bajada barra • Maximo Peso contacto rx • Empate entre 3 a 4 mt



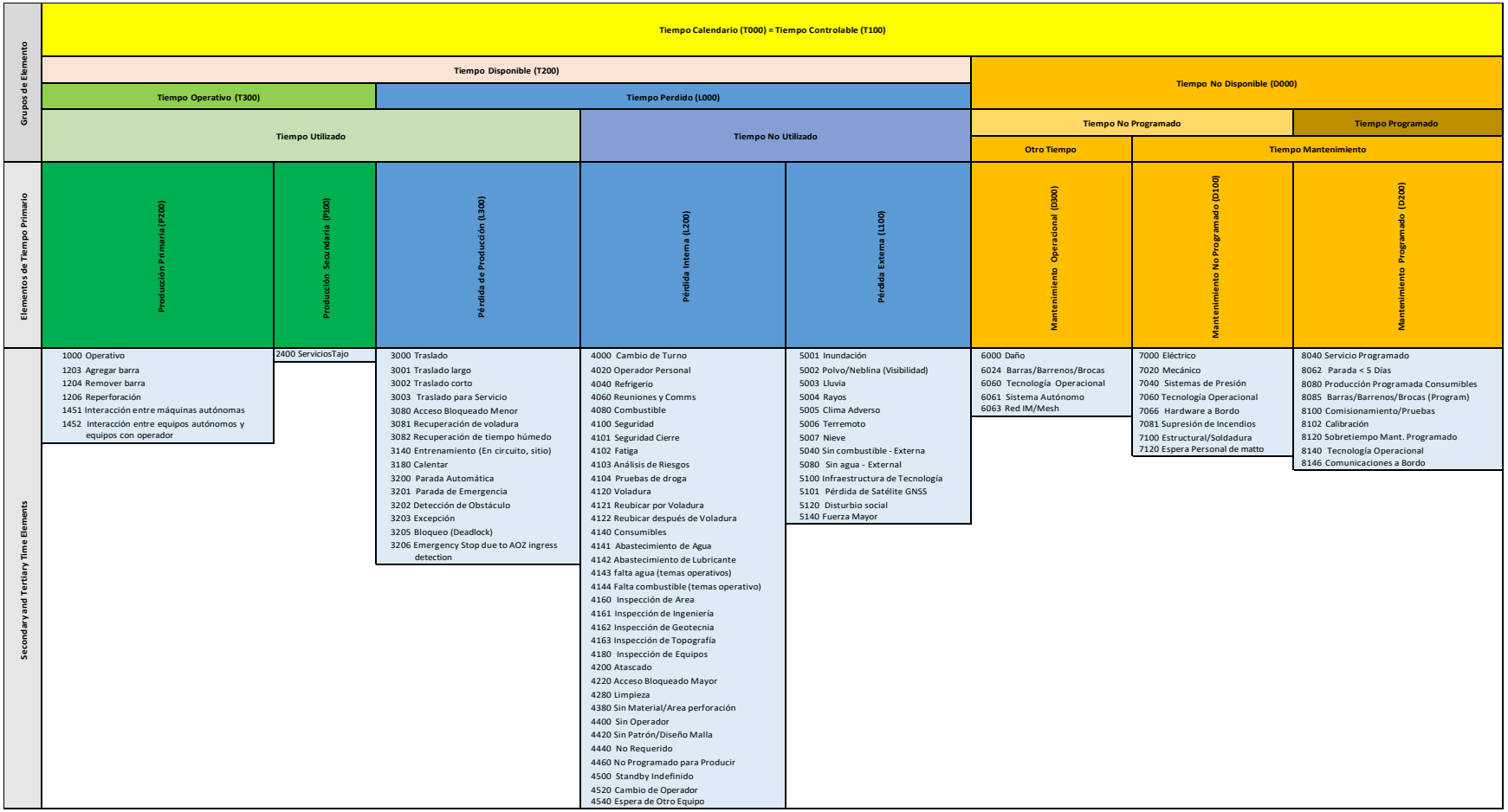
Nota: Recomendaciones para garantizar y alargar la vida útil de los aceros en los equipos de Pit viper 351D.

ANEXO 2: MEDIDAS ESTANDARIZADAS DE DESEMPEÑO EMPRESARIAL



Nota: Indicadores TUM (Angloamerican, 2024)

ANEXO 3: CÓDIGOS DE DEMORAS



Nota: Listado de todos los códigos TUM (AngloAmerican, 2024)

ANEXO 4: FICHA DE PROCESOS DE PERFORACIÓN Y VOLADURA

AngloAmerican	FICHA DE PROCESOS	CÓDIGO:	AA-GLL-SHE-FOR-0002
		VERSIÓN	01
		FECHA:	29/03/2022

GERENCIA	MINA
AREA	PERFORACIÓN Y VOLADURA

1. INFORMACIÓN GENERAL DEL PROCESO

NOMBRE DEL PROCESO	Perforación y Voladura	**INSTALACIONES INVOLUCRADAS**	- Oficinas Mina - Quellaveco (Truck Shop) - Tajo Quellaveco - Polvorines definitivos de Quellaveco - Plataforma PYV (Se ubica los aceros, taller de camión fábrica e insumos de Voladura) - Centro de Control Integrado
OBJETIVO DEL PROCESO	Fragmentar la roca al tamaño adecuado a necesidad del cliente.		
ALCANCE DEL PROCESO	El proceso se inicia con la aceptación de la plataforma de perforación y culmina con la gestión retroalimentación del término de referencia (TOR) de perforación y voladura.		

2. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO

PROVEEDOR	ENTRADAS			PROCESO		SALIDAS	CLIENTE (S)
	PERSONAS (PUESTOS CLAVES)	MÁQUINAS	INSUMOS	ACTIVIDAD	TAREA		
1. Gerencia Operaciones Mina. 2. Gerencia de SS.TT. 3. Gerencia de Confiabilidad y Activos - AS&R (mantenimiento). 4. Gerencia Suply Chain. 5. Gerencia de Geología 6. EC - Soporte Perforación Autonoma 7. EC - Proveedor de aceros de perforación. 8. EC - Proveedor de STEMMING	1. Líder de Perforación y Voladura (4) 2. Líder de carguío y acarreo (4) 3. Líder Mantenimiento (2) 4. Ingeniero Geotécnico (2) 5. Ingeniero de corto/mediano plazo (2) 6. Supervisor de topografía (2) 7. Controlador de Perforadora (17) 8. Líder técnico de Perforación y Voladura (2) 9. Supervisión de perforación (4) 10. Operador de Cisterna de Agua (4) 11. Operador de Cisterna de Combustible (4) 12. Muestreo de taladro (8)	1. Perforadora Pit Viper 351 2. Perforadora Smart ROC D-65 3. Camión grúa para abastecer accesorios de perforación 4.Camioneta 4x4	1. Plataforma de Perforación. 2. Estacas para numeración de taladros 3. Agua para perforación 4. Lubricantes y Grasas 5. Diesel 6. Accesorios de Perforación (broca, barra, bit sup, etc). 7. Accesorios de limpieza (trapo, escoba, etc) 8. Cobertura de internet. 9. Utiles de Escritorio. 10. Sistema Blast Logic. 11. Sistema de diseño Minesight. 12. Sistema de autonomía Epiroc. 13. Sistema GPS alta precisión. 14. Información del diseño de patrón de perforación.	Gestión de Perforación	1. Aceptación de plataforma de Perforación 2. Control de Ingreso al equipo y área de perforación 3. Operación de equipos Pit viper 351 4. Operación de equipos Smart ROC D-65 5. Recuperación de accesorios de perforación 6. Taladros adicionales y/o reperforaciones 7. Medición de taladros 8. Suficientes taladros en Tolerancia y análisis de data 9. Supervisión de Perforación	1. Taladro Perforado 2. Residuos de Perforación	1. Área de Voladura
1. Gerencia de Confiabilidad y Activos - AS&R. 2. Gerente de Suply Chain. 3. EC - Servicio de Integral de Voladura	1. Líder de Perforación y Voladura. (4) 2. Líder Técnico de Perforación y Voladura (2)	1. Camión Fábrica 2. Grúa. 3. Furgonetas para traslado de accesorios de voladura. 4. Camionetas para traslado de personal y evacuación. 5. Camioneta 4x4	1. Agentes de voladura 2. Accesorios de Voladura (Iniciadores, detonadores)	Gestión del Polvorin	1. Transporte de explosivos en site (EC) 2. Almacenamiento de explosivos clase 1 (EC) 3. Almacenamiento de explosivos clase 5 (EC)	1. Disponibilidad de explosivos 2. Registro de Salida de Explosivos y Accesorios de voladura (EC)	1. Área de Voladura
1. Gerencia Operaciones Mina. 2. Gerencia de SS.TT. 3. Gerencia de Confiabilidad y Activos - AS&R. 4. Gerente de Suply Chain. 5. EC - Servicio de Integral de Voladura 6. EC - Servicio de Medición de Granulometría (remoto) 7. EC - Servicio de monitoreo de vibraciones y onda aérea on-line.	1. Líder de Perforación y Voladura. (4) 2. Líder Técnico de Perforación y Voladura (2)	1. Camión Fábrica 2.Cargador de volteo lateral 3. Grúa. 4. Furgonetas para traslado de accesorios de voladura. 5. Camionetas para traslado de personal y evacuación. 6. Camión volquete de Stemming. 7. Cargador Frontal. 8. Camioneta 4x4	1. Taladros Perforados 2. Agentes de Voladura (Emulsión, Nitrato de Amonio, Diessel, Nitrito de sodio). 3. Accesorios de Voladura (Iniciadores, detonadores, mangas plásticas, etc). 4. Taponex 5. Stemming 6. Diessel 7. Agua 8. Accesorios de limpieza (trapo, escoba, etc) 9. Equipos de QA-QC (balanza, medidor de temperatura, etc) 10. Equipos de iniciación electronica 11. Cobertura de internet. 12. Utiles de Escritorio. 13 Información de Diseño de carguio y amarre	Gestión de Voladura	1.Medición y nivelación de taladros (EC) 2.Preparación para el carguio de explosivos (EC) 3.Operación con el camión fábrica (EC) 4.Carguio de Explosivos (EC) 5.Tapado de taladros (EC) 6.Amarre de Taladros (EC) 7.Evacuación por Voladura y Detonación (EC) 8.Gestión del tiro cortado (Quellaveco y EC) 9.Gestión de incidentes de voladura 10.Ejecución de Voladuras 11.Supervisión de Voladura	1. Material volado. 2. Porcentaje de Fragmentación.	1. Área Carguio y acarreo 2. Área de Chancadora

Documentos:	- Estándar de manipulación de explosivos AA TS 405 001. - Especificación del estándar de manipulación de explosivos AA TS 405 003. - Blast Master de perforación y voladura. - Programa de perforación y voladura. - Conceptos de perforación y voladura. - Términos de referencia TOR de perforación y voladura. - Plano de riesgos geotécnicos y de conducción. - Estandar de Gestión del Tráfico AA TS 102 001. - D20Guia del estándar de Gestión del Tráfico AA TS 102 002.	**Registros Generados**	- Registro de Blast Logic: Stock/consumos de explosivos, registro de metros perforados, consumo de aceros de perforación, curva granulométrica del mineral, Reconciliación de diseño de objetivos vs entregables, stock de material volado.	**Situaciones de Emergencia**	- Matriz IPERC Linea Base - Situaciones de Emergencia - Plan de Preparación y Respuesta a Emergencia

Nota: Listado de los procesos que se desarrolla en Quellaveco (AngloaAmerican, 2024)

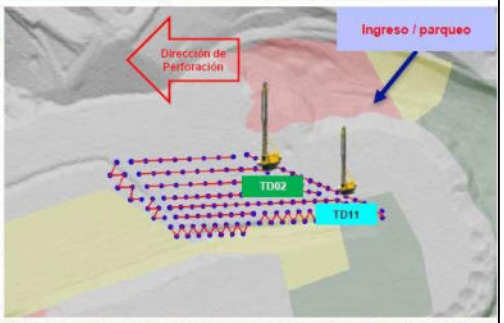
ANEXO 5: PROGRAMA DE ACTIVIDADES DE PERFORACIÓN

[OFFICIAL]

Ubicación del Trabajo : Fase 03 Sur - Proyecto F03S-3645-016
Descripción del Trabajo : Voladura primaria del Nivel 3660 al Nivel 3645 (TD002 y TD011)
06/06/2025 – 08/06/2025

Equipo: Perforación y Voladura	Fecha: 09-06-2025	Número de OT:	Impacto: 1	Responsable: Líder de Perforación y Voladura (B1)	Inicio Programado: 06-06-2025 Término Programado: 08-06-2025 Fecha Requerida: 09-05-2025

Proyecto	Actividad	Perforadoras requeridas	Descripción de la actividad	W 23 Domingo 1-Jun	Lunes 2-Jun	Martes 3-Jun	Miercoles 4-Jun	Jueves 5-Jun	W 24 Viernes 6-Jun	Sabado 7-Jun	Domingo 8-Jun	Lunes 9-Jun	Martes 10-Jun	Miercoles 11-Jun	Jueves 12-Jun
				A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B
F03S-3645-016	P&V	TD02 TD11 0 0	Aceptación de plataforma						1						
			Vuelo Drone						1						
			Perforación de TD02						26 26	26 26	26 26				
			Perforación de TD11								1				
			Perforación de Doble banco0												
			Perforación PRE CORTE 0												
			Abastecimiento de agua						1 1	1 1	1 1				
			Abastecimiento de combustible						1	1	1				
			Mantenimiento equipos						TD011(24 HRS)	TD011(12HRS)					
			Traslado largo perforadora												
			Muestreo de geologia												
			Descarga de stemming (m3)								0				
			Carguio con explosivo								130	26			
			Voladura									1			



CONSIDERACIONES:
- Plataforma estandarizada según PETS "AAQ-QLL-MIPV-PET-0001"
- Plataforma Nivelada
- Bermas de seguridad de 0.6m y 1.9m
- Parqueo

RESTRICCIONES
- Restringir acceso a plataforma.
- Distancia mínima entre las 2 perforadoras de 40 m.
- Distancia mínima al pie interno del muro 3.0 m

PELIGROS
- RA1 (Mecánica Móvil) Colisión, atropello, Volcadura, Atrapamiento, Contacto con maquinaria u objeto en movimiento
- RA2 (Gravitacional) Derrumbe, colapso de taludes.
- RA3 (Climáticos/Eventos naturales): exposición a descarga eléctrica.

CONTROLES
- Revisión de condiciones de cresta.
- Secuencia de perforación
- Minimizar interacción.
- IPERC continuo y/o ATS

ESPECIFICACIONES / PRUEBA DE ENTREGA.
- N° Taladros :156 PV / 3 SR
- Long. Taladros: 16.0 m
- Ø de Taladros: 10 5/8"
- Malla Prod: 7.0x8.0m
- Tonelaje : 376 Kt

EQUIPOS.
02 Perforadoras:
- PV TD002
- SR TD011

MATERIALES
Aceros de perforación

EJECUTOR
AAQ

SEGUIMIENTO DE TRABAJO.
- H5cer seguimiento a la velocidad de perforación y cambios de dureza.
- Metros perforados por Hora, y hacer seguimiento de taladros por presencia

Nota. Plan de trabajo y ejecución de mallas de perforación (Anglo American, 2025)

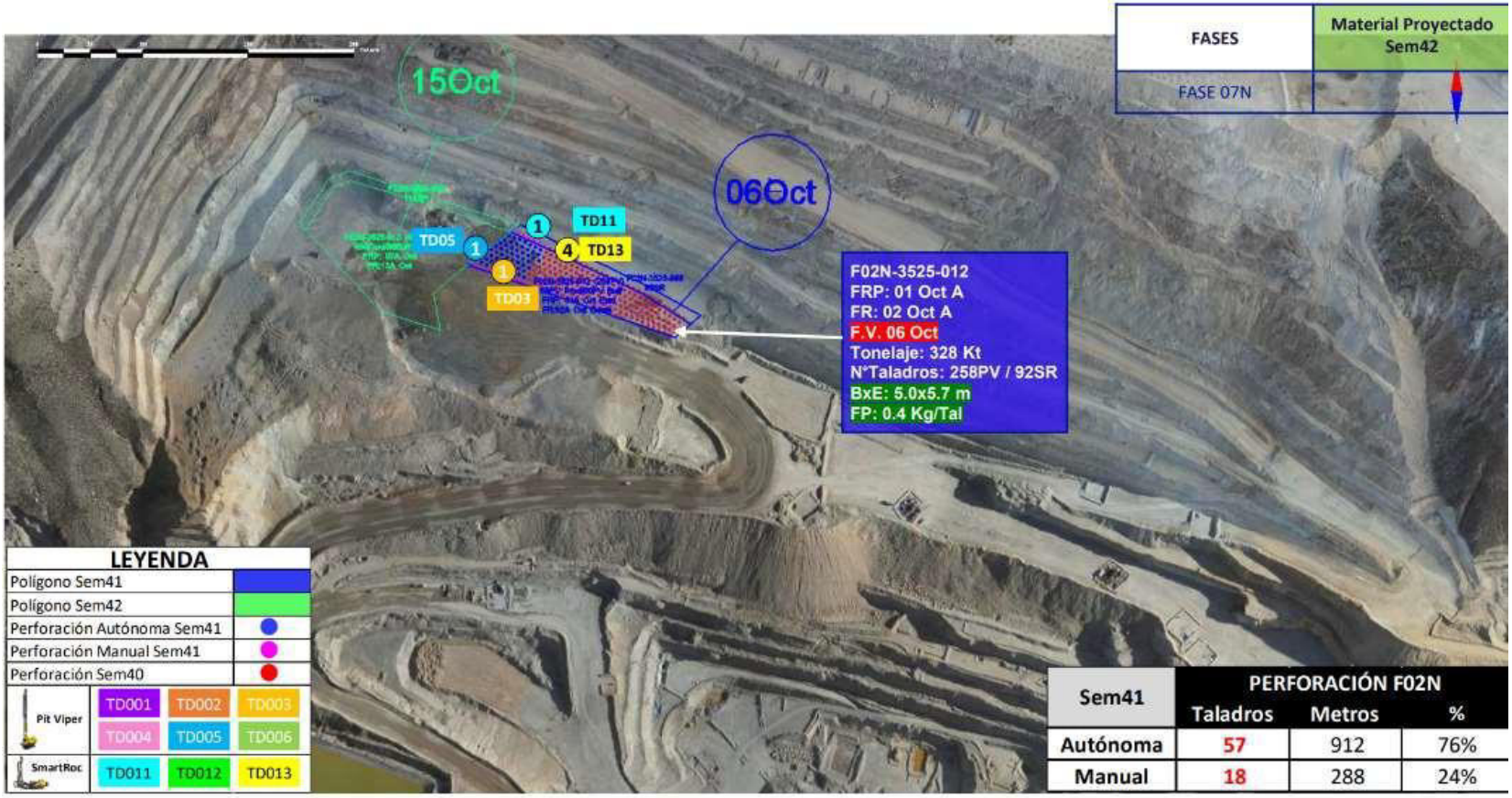
ANEXO 6: CONTROL DE ACEROS

Equipo	Consumible	Estado	Marca	Serie	Diametro	Inicio	Fin	Metros	Duracion_horas	vel_instantanea
TD001	Broca	Desuso	EPIROC	E-3111022	270	2024-11-10 20:27:23	2024-11-15 12:44:37	2908.586	53.12	54.755
TD001	Broca	Desuso	MINERO	M-6276782	270	2024-11-21 17:44:53	2024-11-28 16:32:37	4522.485	83.71	54.026
TD001	Broca	Desuso	SANDVIK	S-22L0899	270	2024-11-15 12:44:37	2024-11-21 17:44:53	3839.565	76.43	50.236
TD001	Broca	Desuso	SHAREATE	SH-7205613	270	2024-10-16 02:36:46	2024-10-22 02:02:05	4177.517	68.57	60.923
TD001	Broca	Desuso	SHAREATE	SH-7205616	270	2024-10-12 22:01:04	2024-10-16 02:36:46	1791.659	31.72	56.484
TD001	Broca	Desuso	SHAREATE	SH-7205620	270	2024-10-07 21:18:59	2024-10-12 22:01:04	2258.356	40.45	55.831
TD001	Broca	Desuso	SHAREATE	SH-7205651	270	2024-10-02 13:16:32	2024-10-07 21:18:59	2521.702	46.33	54.429
TD001	Broca	Desuso	SHAREATE	SH-7207706	270	2024-11-04 00:48:30	2024-11-10 20:27:23	3652.688	66.28	55.11
TD001	Broca	Desuso	SHAREATE	SH-7408812	270	2024-11-28 16:32:37	2024-12-05 03:19:33	5125.369	76.56	66.946
TD001	Broca	En uso	SHAREATE	SH-7408815	270	2024-12-05 03:19:33	2024-12-10 13:43:15	3166.333	51.88	61.032

Marca	Diametro	Cantidad
EPIROC	270	10
MINERO	270	1
SANDVIK	270	2
SHAREATE	270	48
SHAREATE	311	6

Nota. Autoría Propia

ANEXO 7: PROGRAMA SEMANAL DE PERFORACION Y VOLADURA



- *Se requiere una estricta entrega de plataforma de perforación para el cumplimiento de las voladuras.*

Nota. Programa de ejecución de mallas de perforación (Anglo American, 2025)

ANEXO 8: PROGRAMA SEMANAL DE KPI´S DE PERFORACIÓN

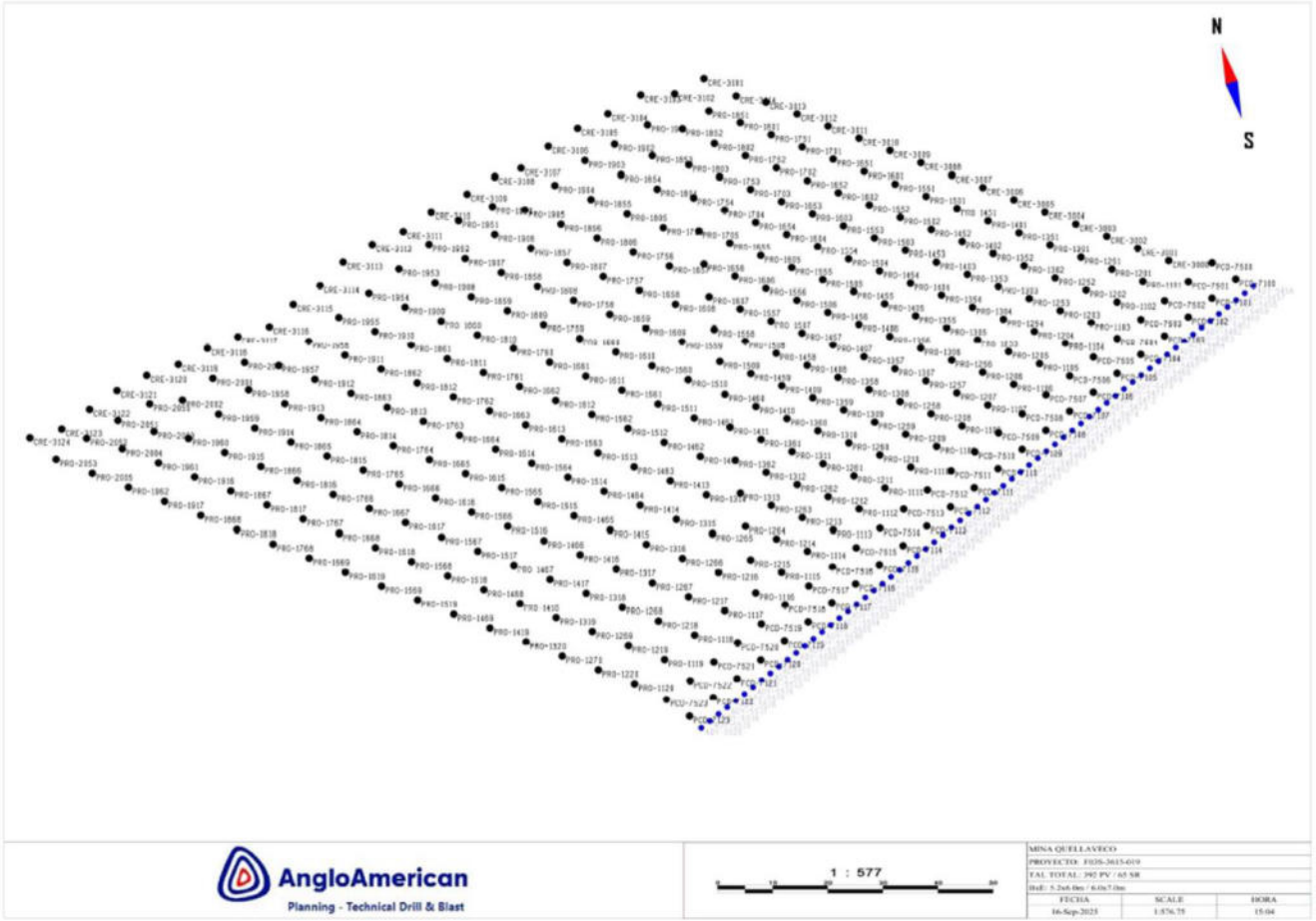
Voladura
KPI´S PERFORACIÓN W39

	Viernes 19-Sep		Sábado 20-Sep		Domingo 21-Sep		Lunes 22-Sep		Martes 23-Sep		Miércoles 24-Sep		Jueves 25-Sep		
Flota PitViper	**Día**	**Noche**	**Día**	**Noche**	**Día**	**Noche**	**Día**	**Noche**	**Día**	**Noche**	**Día**	**Noche**	**Día**	**Noche**	**Sem39**
Equipos	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Tiempo Calendario (hr)	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	
Metros producción	1,958	1,842	1,813	1,813	2,088	2,030	2,161	1,537	2,001	2,088	2,059	1,378	2,175	2,320	27,260
Taladros	135	127	125	125	144	140	149	106	138	144	142	95	150	160	1880
Disponibilidad (%)	87.2%	87.2%	82.3%	82.3%	93.8%	93.8%	93.8%	93.8%	91.7%	91.7%	87.5%	87.5%	92.7%	92.7%	89.8%
Tiempo disponible (hr)	60.2	60.2	56.9	56.9	64.8	64.8	64.8	64.8	63.4	63.4	60.5	60.5	64.1	64.1	
Perforadoras en producción	6	5	5	5	6	6	6	5	6	6	6	4	6	6	
Tiempo Producción P200 (hr)	32.95	30.09	27.59	29.62	35.15	34.18	35.30	25.11	32.22	33.62	33.16	20.97	36.62	40.28	
Traslado largo (L300) (hr)	13.00	0.00	0.00	0.00	4.00	0.00	4.00	0.00	3.00	0.00	0.00	0.00	3.00	0.00	
Traslado por línea (L300) (hr)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
Entrenamiento (L300) (hr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tiempo Utilizado (hr)	46.45	30.59	28.09	30.12	39.65	34.68	39.80	25.61	35.72	34.12	33.66	21.47	40.12	40.78	
UoA (%)	77.1%	50.8%	49.4%	52.9%	61.2%	53.5%	61.4%	39.5%	56.4%	53.9%	55.6%	35.5%	62.6%	63.6%	55.3%
Eficiencia Operacional (%)	70.9%	98.4%	98.2%	98.3%	88.7%	98.6%	88.7%	98.0%	90.2%	98.5%	98.5%	97.7%	91.3%	98.8%	92.9%
Velocidad (m/P200)	59	61	66	61	59	59	61	61	62	62	62	66	59	58	61

	Viernes 19-Sep		Sábado 20-Sep		Domingo 21-Sep		Lunes 22-Sep		Martes 23-Sep		Miércoles 24-Sep		Jueves 25-Sep		
Flota SmartRoc	**Día**	**Noche**	**Día**	**Noche**	**Día**	**Noche**	**Día**	**Noche**	**Día**	**Noche**	**Día**	**Noche**	**Día**	**Noche**	**Sem39**
Equipos	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Tiempo Calendario (hr)	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	
Metros producción	421	566	479	377	334	218	377	377	377	334	218	87	0	0	4162
Taladros	29	39	33	26	23	15	26	26	26	23	15	6	0	0	287
Disponibilidad (%)	94.2%	94.2%	94.2%	94.2%	91.9%	91.9%	87.8%	87.8%	94.2%	94.2%	94.2%	94.2%	94.2%	94.2%	92.9%
Tiempo disponible (hr)	32.54	32.54	32.54	32.54	31.78	31.78	30.34	30.34	32.54	32.54	32.54	32.54	32.54	32.54	
Perforadoras en producción	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	0	
Tiempo Producción P200 (hr)	11.98	16.11	13.63	11.02	9.75	6.36	11.02	11.02	11.02	9.75	6.36	2.48	0.00	0.00	
Traslado largo (L300) (hr)	3.00	0.00	3.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Traslado por línea (L300) (hr)	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	
Entrenamiento (L300) (hr)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Tiempo Utilizado (hr)	15.15	16.28	16.80	11.19	9.92	6.53	12.19	11.19	11.19	9.92	6.53	2.65	0.17	0.17	
UoA (%)	46.6%	50.0%	51.6%	34.4%	31.2%	20.5%	40.2%	36.9%	34.4%	30.5%	20.1%	8.1%	0.5%	0.5%	28.9%
Eficiencia Operacional (%)	79.1%	99.0%	81.1%	98.5%	98.3%	97.4%	90.4%	98.5%	98.5%	98.3%	97.4%	93.6%	0.0%	0.0%	92.8%
Velocidad (m/P200)	35	35	35	34	34	34	34	34	34	34	34	35	37	37	35

Nota. KPI'S de Perforación (Anglo American, 2025)

ANEXO 9: MYA DE TALADROS POR 392 PV / 65 SR



Nota. KPI'S de Perforación (Anglo American, 2025)

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UNAM

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

1. DATOS DEL AUTOR

Nombres y Apellidos : Mary Cielo Mireya Gonzales Humire.
DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N° : 71974248.
Correo electrónico : 2014103042@unam.edu.pe
Teléfono/Celular : 953554040

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

Bachiller	Título Profesional	Magister	Doctor	Segunda Especialidad
	X			

3. TIPO DE PUBLICACIÓN (Marque con una X)

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

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

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

5. DATOS DE LA PUBLICACION

a) Título: OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PERFORACIÓN DE TALADROS DE PRODUCCIÓN CON PIT VIPER 351 EN MODALIDAD SEMI AUTÓNOMA EN LA UNIDAD MINERA QUELLAVECO.
b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra: https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html): 2.07.05
c) Fecha de publicación: 2025

6. DATOS DEL ASESOR:

a) Nombres y Apellidos : Christ Jesus Barriga Paria
b) DNI/Pasaporte/Cédula : 44331713
c) ORCID : 0000-0002-7130-9297

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 71974248
NOMBRES Y APELLIDOS : Mary Cielo Mireya Gonzales Humire

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

LICENCIAS

Licencia Estándar

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

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

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

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

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

Autorizo el depósito (marque con una X).

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

FIRMA : .....

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 71974248

NOMBRES Y APELLIDOS : Mary Cielo Mireya Gonzales Humire

FECHA : 24-10-2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

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

Yo, Mary Cielo Mireya Gonzales Humire, bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Universidad Nacional de Moquegua, identificado (a) con DNI: Nº 71974248, autor(a) de la Tesis / Trabajo de suficiencia profesional titulado OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PERFORACIÓN DE TALADROS DE PRODUCCIÓN CON PIT VIPER 351 EN MODALIDAD SEMI AUTÓNOMA EN LA UNIDAD MINERA QUELLAVECO
Declaro bajo juramento que:

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

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

Moquegua, 24 de Octubre del 2025



Huella digital

Mary Cielo Mireya Gonzales Humire

Nombres y Apellidos:
DNI: 71974248

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

MARY CIELO MIREYA GONZALES HUMIRE

TRABAJO DE SUFICIENCIA FINAL

INFORME

CONFORMIDAD TRABAJO DE SUFICIENCIA

Universidad Nacional de Moquegua

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3376809828

Fecha de entrega
17 oct 2025, 12:50 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
17 oct 2025, 12:54 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
INFORME_CORREGIDO.pdf

Tamaño del archivo
4.4 MB

75 páginas

16.392 palabras

99.675 caracteres

6% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Fuentes de Internet

Exclusiones

- N.º de fuente excluida

Fuentes principales

0%	Fuentes de Internet
3%	Publicaciones
5%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

Fuentes principales

0% Fuentes de Internet
3% Publicaciones
5% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

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

1 Publicación
Haiping Du, Linping Chan, Jun Tong, Raad Raad et al. "Industrial Progress of Robo... 1%

2 Trabajos del estudiante
Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC <1%

3 Publicación
Tarek Gaber, Yassine El Jazouli, Esraa Eldesouky, Ahmed Ali. "Autonomous Haulag... <1%

4 Trabajos del estudiante
Universidad Alas Peruanas <1%

5 Publicación
Solène Rey-Coquais. "Territorial experience and the making of global norms: How... <1%

6 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional de Moquegua <1%

7 Publicación
Hongwei Wang, Chao Li, Wei Liang, Di Wang, Linhu Yao. "Adaptive autonomous n... <1%

8 Trabajos del estudiante
IUBH - Internationale Hochschule Bad Honnef-Bonn <1%

9 Trabajos del estudiante
University of Melbourne <1%

10 Trabajos del estudiante
Curtin University of Technology <1%

11 Trabajos del estudiante
Embry Riddle Aeronautical University <1%

12 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo <1%

13 Trabajos del estudiante
Bilkent University <1%

14 Trabajos del estudiante
University Politehnica of Bucharest <1%

15 Trabajos del estudiante
Intercollege <1%

16 Trabajos del estudiante
UNICAF <1%

17 Trabajos del estudiante
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurimac <1%

18 Trabajos del estudiante
uncedu <1%

19 Trabajos del estudiante
Engineers Australia <1%

20 Trabajos del estudiante
fpsp <1%

21 Trabajos del estudiante
Universidad Continental <1%

22 Publicación
Freyre, Jose Alejandro Barcenas. "Politica Institucional Inclusiva Para Personas Co... <1%

23 Trabajos del estudiante
Universidad Tecnologica del Peru <1%

24 Publicación
"Habitar entre laderas : barrios residenciales de bajo impacto ambiental en el bor... <1%

25 Trabajos del estudiante
Indian School of Mines <1%

26 Trabajos del estudiante
London Metropolitan University <1%

27 Trabajos del estudiante
Universidad Carlos III de Madrid - EUR <1%

28 Publicación
Gottreux Vollet, Ismael David. "Pre acondicionamiento con el uso de debilitamien... <1%

Universidad Nacional de Moquegua

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 819-2025-CU

Moquegua, 20 de noviembre de 2025

VISTOS:

El Proveído N° 4716-2025-R de fecha 14 de noviembre de 2025 emitido por el Rectorado, Informe N° D0481-2025-UNAM-R-SG de fecha 14 de noviembre de 2025 emitido por el Secretario General, Informe Técnico N° D0161-2025-SEGE-GT emitido por la Especialista Administrativo I–Grados y Títulos, el Acuerdo del Pleno del Consejo Universitario de Sesión Extraordinaria N° 44-2025-SE-CU-UNAM, de fecha 19 de noviembre de 2025, y;

CONSIDERANDO:

Que, conforme al 4to párrafo del artículo 18, de la Constitución Política del Perú, dispone que cada Universidad es autónoma en su régimen normativo, de gobierno, académico, administrativo y económico. Y el artículo 8° de la Ley N° 30220-Ley Universitaria, establece que la referida autonomía inherente a las Universidades, se ejerce de conformidad con la Constitución y demás normativa aplicable. Concordante con el artículo 1, de la Ley N° 31520, Ley que restablece la autonomía y la institucionalidad de las universidades peruanas, así como la Ley N° 32141, Ley que modifica la Ley N° 30220-Ley Universitaria, a fin de fortalecer la institucionalidad de las Universidades Públicas licenciadas;

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

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

Que, el Sr. Rector es el personero y representante legal de la Universidad Nacional de Moquegua, conforme a lo dispuesto por la Ley N° 30220-Ley Universitaria, tiene a su cargo la Dirección, Conducción y Gestión del Gobierno Universitario en todos sus ámbitos, concordante con el artículo 24° y numeral 2 del artículo 26° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua;

Que, mediante Informe Técnico N° D0161-2025-SEGE-GT de fecha 13 de noviembre de 2025, e Informe N° D0481-2025-UNAM-R-SG de fecha 14 de noviembre de 2025, el Secretario General de la UNAM, remite al Rectorado el expediente para el trámite de Título Profesional de Ingeniero de Minas de la Bachiller: GONZALES HUMIRE MARY CIELO MIREYA de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quien se encuentra apta para la expedición del Título Profesional de Ingeniero de Minas, al haber cumplido satisfactoriamente con los requisitos legales y reglamentarios, exigidos en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, conforme lo señala la Dirección de Actividades y Servicios Académicos y la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, razón por la cual, el señor Secretario General incluye dicho expediente como punto de agenda para ser tratado en Sesión Extraordinaria de Consejo Universitario de fecha 19 de noviembre de 2025;

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

Que, el numeral 45.2 del artículo 45° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria, precisa los requisitos mínimos para la obtención del título profesional, como son: el grado de Bachiller y la aprobación de una tesis o trabajo de suficiencia profesional. Asimismo, establece que el título profesional solo se puede obtener en la universidad en la cual se haya obtenido el grado de bachiller;

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

Que, bajo el amparo de los considerandos precedentes, el Pleno del Consejo Universitario en Sesión Extraordinaria N° 44-2025-SE-CU-UNAM, de fecha 19 de noviembre de 2025, emitió, el siguiente, Acuerdo, POR UNANIMIDAD CONFERIR, a nombre de la Nación el Título Profesional de Ingeniero de Minas por la modalidad de trabajo de suficiencia profesional a la Bachiller: GONZALES HUMIRE MARY CIELO MIREYA, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Moquegua;

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

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 819-2025-CU

Moquegua, 20 de noviembre de 2025

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

SE RESUELVE:

ARTÍCULO 1°: CONFERIR, A NOMBRE DE LA NACIÓN a la Bachiller

- **GONZALES HUMIRE MARY CIELO MIREYA**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL: "OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PERFORACIÓN DE TALADROS DE PRODUCCIÓN CON PIT VIPER 351 EN MODALIDAD SEMI AUTÓNOMA EN LA UNIDAD MINERA QUELLAVECO", cuyo Asesor Principal fue el Dr. Christ Jesus Barriga Parla.

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

Por la modalidad de TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Moquegua.

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

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

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

REGÍSTRESE, PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE;

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA SECRETARIA GENERAL

ABOG. EDGAR PINTO HUANCAVILCA
SECRETARIO GENERAL

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA CONSEJO UNIVERSITARIO

DR. HUGO RUBEN MARCA MAQUERA
RECTOR
PRESIDENTE DEL CONSEJO UNIVERSITARIO

DISTRIBUCION:
VRA
VRI
FAIN
EPIM
UyT
DASA
OTI
Interesado
c.c. Arch.

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